

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

№ 4 (100)

Ростов-на-Дону
2025

ВЕСТНИК

Ростовского государственного университета путей сообщения

2025
№ 4 (100)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала

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

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

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

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

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

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

О.А. Ворон, д-р техн. наук, доц., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

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

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

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

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

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

П.Г. Ивановкин, д-р техн. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

А.Н. Чукарин, д-р техн. наук, проф., Донской государственный технический университет (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

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

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

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

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

VESTNIK RGUPS
Scientific and Technical Journal

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

V.I. Kolesnikov, academician of Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

M.P. Bader, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Moscow State Transport University (RUT MIIT), Moscow

A.V. Belyj, Corresponding member NAS of Belarus, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Physic Technical Institute NAS of Belarus, Minsk, Belarus

A.V. Bozhenyuk, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southern Federal University (SFedU), Taganrog

M.A. Butakova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute of Information, Automation and Communication in Railway Transport (NIIAS), Moscow

V.D. Vereskun, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

O.A. Voron, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don

A.N. Guda, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don (deputy editor-in-chief)

Ph. Daniel', Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Universite du Maine, Le Mans, France

I.D. Dolgiy, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow

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

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

P.G. Ivanochkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

S.M. Kovalev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport, Moscow

I.V. Kotenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

A.G. Kochur, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

N.N. Lyabakh, Doctor of Engineering Sciences, Professor, The International Academy for Management and Technology (INTAMT), Dusseldorf, North Rhine-Westphalia, Germany

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

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

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

V.I. Novakovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

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

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

A. Sladkowski, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Silesian University of Technology, Katowice, Poland

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

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

V. Stýskala, Doctor, PhD, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

V.N. Taran, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU),

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

O.N. Chislov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

A.N. Chukarin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Don State Technical University (DSTU),

V.V. Shapovalov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RSTU, Rostov-on-Don

V.L. Shapovalov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, RSTU, Rostov-on-Don

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

A.O. Kudelina, executive secretary, RSTU, Rostov-on-Don

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Наконечная М.О., Пеньков А.С., Костоглотов А.А., Леонов Е.С., Тавунов В.П.** Синтез адаптивного алгоритма оценки угловой ориентации подвижных объектов на базе квазиоптимальных моделей движения с учетом команд автопилота..... 8

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Больших И.В., Кохановский В.А., Ананко А.М., Шишияну Д.Н., Ткаленко Е.С.** Технология нанесения покрытия с матричным связующим на основе каучука..... 19
- Игнатов М.С., Елагина О.Ю.** Трибодиагностика турбинного масла ТП-22С..... 26
- Колесников И.В., Аникина Е.Д., Политыко К.Н., Четверик М.М.** Влияние концентрации Al_2O_3 в полимерном композиционном материале на его трибологические свойства..... 35
- Кротов С.В.** Напряженное состояние прессового соединения колесной пары..... 44
- Малышев В.Н., Матюшенко Д.Д.** Влияние модификации электролита углеродными нанотрубками на механические и триботехнические характеристики МДО-покрытий..... 53
- Набоков А.Е., Чукарин А.Н., Яицков И.А.** Исследование частотных характеристик вибраций источников звука при обработке консольно закрепленными дисковыми и гребенчатыми фрезами на резьбообрабатывающих станках..... 65

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

- Шаповалов В.Л., Морозов А.В., Окост М.В., Горбачева Т.П.** Пористый геокомпозитный материал для сложных условий строительства..... 71

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

- Дмитренко А.В., Наурузбаев С.М.** Оценка влияния среднего веса грузовых поездов на размеры их движения по магистральным железнодорожным линиям..... 81
- Ковалев К.Е., Новичихин А.В.** Формирование сценариев организации работы малоинтенсивных железнодорожных линий по набору параметров..... 90
- Нутович В.Е., Тулина Т.В.** Методы ведения специализированного информационного обеспечения для решения задач логистического навигатора..... 100

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Ковалев С.М., Котенко И.В., Родзин С.И., Гуда А.Н., Суханов А.В., Бутакова М.А., Гришаев С.Ю.** Аналитический обзор трудов конференции ПТГ'25..... 108
- Новиков В.Г., Сафронов А.И., Бесчастный М.А.** Повышение пропускной способности участков движения автотранспорта посредством адаптации времени закрытия регулируемого железнодорожного переезда 151
- Розенберг Е.Н., Кузьмин В.С., Озеров А.В.** Об условиях возникновения опасных отказов в неограниченных рельсовых цепях с локомотивным приемником в шунтовом режиме работы..... 161

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

- Карпычев В.А., Страхова А.В., Егоренкова С.А.** Количественная оценка максимальных давлений в тормозном цилиндре в зависимости от осевой нагрузки грузового вагона по условию безюзового торможения..... 168
- Ольховатов Д.В., Шевкунова А.В., Коновалов П.Ю., Притыкин Д.Е., Склифус Я.К.** Моделирование системы стабилизации напряжения вторичного источника питания цепей управления электровоза..... 179

Поляков П.А., Яицков И.А., Кузькин А.А., Мизюкаев А.В., Галимова Г.И. Изменение характеристик тормозного устройства дисково-колодочного типа путем совершенствования механизма прижатия тормозной колодки.....	188
Розенберг Е.Н., Кузьмин В.С., Озеров А.В. К определению пространственных координат тягового подвижного состава с использованием сигналов неограниченных рельсовых цепей с локомотивным приемником	199

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Мартынюк И.В., Носков В.Н., Финоченко В.А., Флегонтов Н.С. К вопросу научного сопровождения энергетической стратегии железнодорожного транспорта	207
Осипов В.А. Расчет рабочих токов волоконно-оптического кабеля для тяговой сети с комбинированным экранирующим проводником.....	214

CONTENTS

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

- Nakonechnaya M.O., Penkov A.S., Kostoglotov A.A., Leonov E.S., Tavunov V.P.** Synthesis of an adaptive algorithm for estimating the angular orientation of moving objects based on quasi-optimal motion models taking into account autopilot commands..... 8

MECHANICAL ENGINEERING

- Bolshikh I.V., Kokhanovskiy V.A., Ananko A.M., Shishiyanu D.N., Tkalenko E.S.** Technology of coating with a matrix binder based on rubber..... 19
- Ignatov M.S., Elagina O.Yu.** Tribodiagnostics of TP-22c turbine oil..... 26
- Kolesnikov I.V., Anikina E.D., Polityko K.N., Chetverik M.M.** Influence of Al_2O_3 concentration in a polymer composite material on its tribological properties..... 35
- Krotov S.V.** Stress state of a wheelset press joint..... 44
- Malyshev V.N., Matyushenko D.D.** Effect of electrolyte modification with carbon nanotubes on the me-mechanical and tribological characteristics of MAO-coatings..... 53
- Nabokov A.E., Chukarin A.N., Yaitskov I.A.** Study of the frequency characteristics of sound source vibrations during processing with cantilever-mounted disk and comb milling cutters on thread-processing machines..... 65

RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

- Shapovalov V.L., Morozov A.V., Okost M.V., Gorbacheva T.P.** Porous geocomposite material for challenging construction conditions..... 71

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

- Dmitrenko A.V., Nauruzbaev S.M.** Assessing the impact of the average weight of freight trains on their traffic volume along main railway lines..... 81
- Kovalev K.E., Novichikhin A.V.** Developing operational scenarios for a low-intensity railway lines based on a set of parameters..... 90
- Nutovich V. E., Tulina T.V.** Methods of maintaining specialized information support for solving the problems of a logistics navigator..... 100

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION AND TELECOMMUNICATIONS

- Kovalev S.M., Kotenko I.V., Rodzin S.I., Guda A.N., Sukhanov A.V., Butakova M.A., Grishaev S.Yu.** Analytical review of proceedings of IITP'25 conference 108
- Novikov V.G., Safronov A.I., Beschastny M.A.** Increasing the capacity of motor transport sections by adapting the closing time of a regulated railway crossing..... 151
- Rosenberg E.N., Kuzmin V.S., Ozerov A.V.** On the conditions for the occurrence of hazardous failures in unlimited track circuits with a locomotive receiver in shunt mode operation..... 161

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY

- Karpichev V.A., Strakhova A.V., Egorenkova S.A.** Quantitative assessment of maximum pressures in the brake cylinder depending on the axial load of a freight carriage under the condition of non-slip braking 168
- Olkhovatov D.V., Shevkunova A.V., Konovalov P.Yu., Pritykin D.E., Sklifus Ya.K.** Modeling of the voltage stabilization system for the secondary power supply of electric locomotive control circuits..... 179
- Polyakov P.A., Yaitskov I.A., Kuzkin A.A., Mizyukaev A.V., Galimova G.I.** Changing the characteristics of a disc-type brake device by improving the mechanism of pressing the brake pad... 188
- Rosenberg E.N., Kuzmin V.S., Ozerov A.V.** Determining the spatial coordinates of traction rolling stock using signals from unlimited track circuits with a locomotive receiver..... 199

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

Martynyuk I.V., Noskov V.N., Finochenko V.A., Flegontov N.S. On the issue of scientific support for the energy strategy of railway transport	207
Osipov V.A. Calculation of operating currents in fiber-optic cables for a traction networks with a combined shielding conductor	214

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 629.735-519 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_8

*М. О. Наконечная, А. С. Пеньков, А. А. Костоготов, Е. С. Леонов, В. П. Тавунов***СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ С УЧЕТОМ КОМАНД АВТОПИЛОТА ***

Аннотация. Работа посвящена актуальной теме повышения точности определения угловой ориентации автономных летательных аппаратов с применением динамической модели движения за счет использования априорной информации о сигналах управления, формируемых бортовым автопилотом в режиме парирования внешних воздействий. Разработанный алгоритм основан на квазиоптимальной модели движения второго порядка, полученной с учетом динамических ограничений и рациональных допущений. Для анализа его эффективности проведено численное моделирование процесса оценки угловой ориентации мультироторного беспилотного летательного аппарата. Полученные результаты демонстрируют повышение точности оценки угловой ориентации беспилотного летательного аппарата в среднем на 7–15 % в сравнении с аналогичным алгоритмом без учета команд автопилота.

Ключевые слова: адаптация, угловая ориентация, оценка, фильтрация, модель движения, фильтр Калмана.

Для цитирования: Синтез адаптивного алгоритма оценки угловой ориентации подвижных объектов на базе квазиоптимальных моделей движения с учетом команд автопилота / М. О. Наконечная, А. С. Пеньков, А. А. Костоготов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 8–18. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_8.

Введение

Системы оценки параметров движения, функционирующие в условиях внешних воздействий, обладают сложной, многосвязной, стохастической и плохо организованной структурой [1], что в большинстве случаев при их разработке требует изучения физических свойств объекта наблюдения и получения его математической модели. Определение структуры и параметров модели связано с решением сложных задач, поскольку реальные объекты в свою очередь также представляют собой стохастические многосвязные динамические системы более высокого уровня.

Ярким примером таких систем являются автономные летательные аппараты (ЛА), обладающие шестью взаимосвязанными степенями свободы, что обуславливает существенные трудности определения их угловой ориентации по данным бортовых датчиков. Наиболее остро эта проблема проявляется при разработке малых беспилотных ЛА (БПЛА), массогабаритные характеристики требуют реализации инерциальной измерительной системы на основе микромеханических акселерометров, гироскопов и магнитометров.

Стабилизация БПЛА производится бортовой системой управления (БСУ), объединяющей в себе подсистему оценки угловой ориентации и подсистему управления, формирующую управляющие воздействия на исполнительные механизмы (двигатели, рули, элероны и т.д.). Как известно, вычислительные мощности БСУ существенно ограничены массогабаритными характеристиками, что наиболее критично в малых БПЛА с несущими винтами, энергетическая эффективность которых крайне низкая, а повышение веса БСУ резко снижает дальность полета.

Кроме того, описанные ограничения в совокупности с финансовой оптимизацией массового производства приводят к низкой точности бортовых измерителей угловой скорости и ускорения. Используемые в массовых малых БПЛА гироскопы и акселерометры в абсолютном большинстве случаев выполнены в виде микроэлектромеханических систем (МЭМС). Следствием этого является воз-

* Работа выполнена в рамках гранта банка ВТБ (ПАО) на выполнение молодыми учеными научных работ по теме «Синтез алгоритмов оценки угловой ориентации подвижных объектов на базе квазиоптимальных моделей движения».

никновение существенных ошибок измерения, вызванных вибрацией корпуса, внешними воздействиями и характеристиками самих датчиков, что не позволяет напрямую использовать измерения в БСУ и требует их предварительной обработки подсистемой оценки ориентации.

В основе подсистемы оценки ориентации многих современных БСУ малых БПЛА лежат алгоритмы, основанные на кинематической модели вращения. Их недостатком является невозможность учета момента вращения, образуемого совокупностью сил, воздействующих на объект управления.

Современные беспилотные ЛА функционируют в широком диапазоне режимов движения, каждый из которых предъявляет особые требования к системе управления ориентацией. В переходных режимах, таких как выход на заданную траекторию, выполнение сложных маневров или парирование внешних воздействий высокой интенсивности, инерционные свойства аппарата становятся определяющим фактором его поведения.

Анализ характерных режимов движения показывает, что при угловых скоростях, превышающих $20^\circ/\text{с}$, гироскопические эффекты начинают оказывать существенное влияние на поведение системы. Типичный пример – возникновение значительных моментов прецессии при попытке быстрого изменения плоскости вращения аппарата, что особенно критично для автономных ЛА с асимметричным распределением масс (например, при транспортировке груза), где перекрестные инерционные связи могут вызывать неожиданные колебательные режимы. Кроме того, технические характеристики современных БПЛА позволяют совершать маневры, при которых инерционные силы достигают значений, сопоставимых с управляющими моментами, что принципиально меняет динамику движения в сравнении с прогнозами на основе традиционно используемой в алгоритмическом обеспечении БСУ кинематической модели вращения. Например, при углах атаки более $15\text{--}20^\circ$ и отсутствии коррекции от внешних датчиков аэродинамические моменты перестают быть линейными функциями углового положения, а их взаимодействие с силами инерции может сопровождаться сложными нелинейными эффектами. Кинематическая модель, не учитывающая данные эффекты, в отсутствие коррекции от внешних датчиков (ГЛОНАСС, оптических и прочих) может приводить к погрешностям в прогнозировании углового положения.

Таким образом, учет динамических эффектов приобретает критическую важность при проектировании алгоритмов оценки ориентации в составе БСУ в сверхманевренных режимах движения, где традиционные методы, основанные на линеаризованных кинематических моделях, оказываются недостаточно эффективными.

Практика эксплуатации современных автономных ЛА показывает, что обеспечение высокой точности оценки ориентации возможно только при использовании интегрированного подхода, основанного на моделях, учитывающих как кинематические, так и динамические аспекты движения, что наиболее ярко проявляется в следующем:

- в режимах движения с переменной инерционной конфигурацией (выпуск закрылков, сброс груза);
- условиях сложных пространственных маневров с одновременным изменением нескольких угловых координат;
- условиях турбулентности и других атмосферных возмущений;
- системах с ограниченной мощностью исполнительных органов управления.

Таким образом, динамическая модель движения является не просто дополнением к кинематическому описанию, а необходимым инструментом для раскрытия потенциала современных автономных ЛА. Резервом повышения точности алгоритмов на основе динамических моделей является использование априорной информации о воздействиях, испытываемых подвижным объектом. Бортовая система управления как пилотируемых, так и беспилотных транспортных средств (ТС) обладает данными о заданном режиме движения и величине управляющих воздействий, формируемых автопилотом. Эту информацию целесообразно использовать в алгоритмах оценки угловой ориентации для повышения точности как в режиме управления движением по заданной траектории с глубоким маневрированием, так и в режиме парирования кратковременных интенсивных внешних воздействий.

Кроме того, учет управляющих воздействий целесообразен в условиях ограниченной наблюдаемости, когда система вынуждена работать с зашумленными измерениями. Динамическая модель в этом случае служит мощным фильтрующим инструментом, отсекающим физически нереализуемые оценки, а априорная информация об управляющих воздействиях повышает точность и устойчивость алгоритма.

Как показывают исследования [2–4], перспективным направлением развития БСУ является интеграция алгоритмов оценки ориентации с адаптивными динамическими моделями движения, позво-

ляющими корректировать параметры, учитывающие инерционные характеристики объекта управления и величину внешних воздействий, характерную для текущего режима движения. Такого рода алгоритмы могут быть основаны на квазиоптимальных моделях движения второго порядка, полученных с учетом динамических ограничений и рациональных допущений, обеспечивающие выделение допустимого класса решений и построения разумного приближения при поиске оптимального [5].

В связи с этим **целью исследования** является повышение точности оценки угловой ориентации подвижных объектов в условиях интенсивного маневрирования и кратковременных внешних воздействий.

Научной задачей исследования является синтез алгоритма оценки угловой ориентации подвижных объектов с адаптацией к внешним возмущениям и учетом управляющих воздействий.

1 Синтез модели движения с учетом управляющих воздействий

Описание ориентации твердого тела традиционно производится с использованием углов Эйлера в связанной системе координат

$$\begin{cases} \dot{\psi} = \frac{1}{\cos \theta} (\omega_1 \cos \gamma - \omega_3 \sin \gamma), \\ \dot{\theta} = \omega_2 \sin \gamma + \omega_3 \cos \gamma, \\ \dot{\gamma} = \omega_1 - \tan \theta (\omega_2 \cos \gamma) - \omega_3 \sin \gamma, \end{cases} \quad (1)$$

где γ, θ, ψ – углы Эйлера;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – угловые скорости в связанной системе координат (СК).

Маневры и внешние воздействия на транспортное средство приводят к невозможности использования модели (1) для удовлетворительного описания динамики в условиях существенных изменений угловых скоростей.

Связь между компонентами угловой скорости (при выборе осей координат, сонаправленных с главными осями инерции) позволяет записать модель вращения недеформируемого твердого тела со стационарными моментами инерции в форме динамических уравнений Эйлера

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 - \frac{I_2 - I_3}{I_1} \omega_2 \omega_3 = u_1, \\ \dot{\omega}_2 - \frac{I_3 - I_1}{I_2} \omega_3 \omega_1 = u_2, \\ \dot{\omega}_3 - \frac{I_1 - I_2}{I_3} \omega_1 \omega_2 = u_3, \end{cases} \quad (2)$$

где I_1, I_2, I_3 – моменты инерции;

u_1, u_2, u_3 – воздействия на летательный аппарат.

Полномасштабная динамическая модель, описывающая все возможные воздействия на ЛА, оказывается слишком сложна для реализации в БСУ, кроме того, природа воздействий может быть не до конца ясна или изучена. В связи с этим существует несколько подходов для учета изменяющихся возмущений [6]. Одним из них является выделение в структуре u_1, u_2, u_3 известных управляющих воздействий $\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3$ и неизвестных внешних возмущений $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ с возможностью адаптации к текущим условиям движения для минимизации среднеквадратической ошибки. В таком случае воздействия, испытываемые ЛА в процессе полета, как показано в [7, 8], при наличии внешних возмущений могут быть представлены в виде

$$u_s = \tilde{u}_s + \alpha_s, s = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Выбор математического описания α_s должен основываться на принципе минимальной сложности при сохранении адекватности описания ключевых физических свойств и доминирующих динамических эффектов без введения избыточных нелинейностей [9, 10]. Поэтому в качестве их структуры в соответствии с [11, 12] принята модель, подтвердившая свою эффективность в задачах сопровождения ЛА в условиях внешних воздействий

$$\alpha_s = -\sqrt{\eta_s} \omega_s + \eta_s w, s = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где η_s – параметры адаптации, учитывающие динамические характеристики и режим движения ЛА;
 w – белый гауссовский шум с известными локальными характеристиками.

Введем следующие обозначения:

$$\vartheta_1 = \frac{I_2 - I_3}{I_1}, \quad \vartheta_2 = -\frac{I_3 - I_1}{I_2}, \quad \vartheta_3 = -\frac{I_1 - I_2}{I_3}, \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi \\ \theta \\ \gamma \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \tilde{u}_1 \\ \tilde{u}_2 \\ \tilde{u}_3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где \mathbf{x} – вектор состояния; \mathbf{w} – вектор возмущения; \mathbf{u} – вектор управления.

В рассматриваемом случае с учетом (3) и (4) динамическая модель вращения ЛА в связанной СК может быть записана в векторно-матричном виде [13]

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t)] + \mathbf{G}\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (7)$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos \theta} (x_4 \cos \gamma - x_6 \sin \gamma) \\ x_5 \sin \gamma + x_6 \cos \gamma \\ x_4 - \tan \theta (x_5 \cos \gamma) - x_6 \sin \gamma \\ \vartheta_1 x_5 x_6 - \sqrt{\eta_1} x_4 \\ \vartheta_2 x_4 x_6 - \sqrt{\eta_2} x_5 \\ \vartheta_3 x_4 x_5 - \sqrt{\eta_3} x_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Гироскопы, входящие в состав БСУ, формируют сигналы, пропорциональные угловым скоростям вращения ЛА в связанной СК, которые входят в $\mathbf{x}(t)$ без нелинейных преобразований. В таком случае для выбранной модели состояния (7) модель наблюдения формируется естественным образом:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t), \quad (9)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Статистические характеристики

$$\begin{aligned} M\{\mathbf{w}(t)\} &= M\{\mathbf{v}(t)\} = 0, \\ \text{cov}\{\mathbf{w}(t), \mathbf{w}(\tau)\} &= \Psi_w \delta(t - \tau), \\ \text{cov}\{\mathbf{v}(t), \mathbf{v}(\tau)\} &= \Psi_v \delta(t - \tau). \end{aligned} \quad (11)$$

Алгоритм фильтрации

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{f}[\hat{\mathbf{x}}(t)] + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T \Psi_v^{-1} \{\mathbf{z}(t) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}(t)\}. \quad (12)$$

Уравнение для дисперсии ошибки

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{P}}(t) &= \mathbf{G}\Psi_w \mathbf{G}^T + \mathbf{P}(t)\mathbf{F}^T + \mathbf{F}\mathbf{P}(t) - \\ &\quad - \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T \Psi_v^{-1} \mathbf{P}(t). \end{aligned} \quad (13)$$

Матрица Якоби $\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{f}[\hat{\mathbf{x}}(t)]}{\partial \hat{\mathbf{x}}(t)}$ для заданного вектора состояния имеет блочную структуру:

$$\frac{\partial \mathbf{f}[\hat{\mathbf{x}}(t)]}{\partial \hat{\mathbf{x}}(t)} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где

$$f_{11} = \begin{bmatrix} (x_5 \cos x_1 - x_6 \sin x_1) \cdot \tan x_2 & (x_5 \sin x_1 + x_6 \cos x_1) / \cos^2 x_2 & 0 \\ -x_5 \sin x_1 - x_6 \cos x_1 & 0 & 0 \\ (x_5 \cos x_1 - x_6 \sin x_1) / \cos x_2 & (x_5 \sin x_1 + x_6 \cos x_1) \cdot \sin x_2 / \cos^2 x_2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$f_{12} = \begin{bmatrix} 1 & \sin x_1 \cdot \tan x_2 & \cos x_1 \cdot \tan x_2 \\ 0 & \cos x_1 & -\sin x_1 \\ 0 & \sin x_1 / \cos x_2 & \cos x_1 / \cos x_2 \end{bmatrix}, \quad f_{22} = \begin{bmatrix} -\sqrt{\eta_1} & \vartheta_1 x_6 & \vartheta_1 x_5 \\ \vartheta_2 x_6 & -\sqrt{\eta_2} & \vartheta_2 x_4 \\ \vartheta_3 x_5 & \vartheta_3 x_4 & -\sqrt{\eta_3} \end{bmatrix}, \quad f_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Начальные условия

$$\hat{\mathbf{x}}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{P}(t_0) = \mathbf{\Psi}_{x_0}. \quad (15)$$

2 Анализ эффективности предложенного алгоритма

В качестве примера рассмотрим прикладную задачу оценки ориентации беспилотного летательного аппарата с четырьмя несущими винтами (квадрокоптер).

Исходные данные получены с использованием программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего получение потока данных от бортовых измерителей летательного аппарата в режиме реального времени, а также настройку параметров алгоритмов ориентации [14]. Комплекс включает в себя универсальный испытательный стенд для беспилотных летательных аппаратов, макет беспилотного летательного аппарата с четырьмя несущими винтами (рис. 1) и полетный контроллер с открытым исходным кодом, реализующим систему управления угловой ориентацией БПЛА, обобщенная структурная схема которой представлена на рис. 2.



Рис. 1. Испытательный стенд с макетом БПЛА

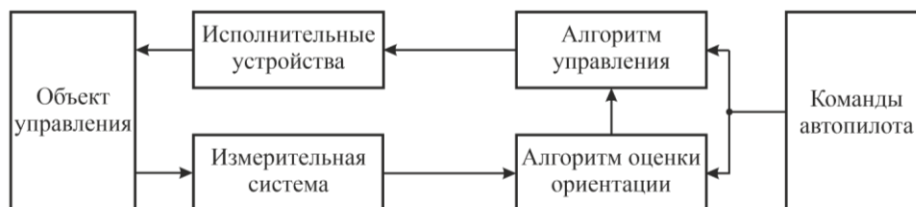


Рис. 2. Обобщенная структурная схема системы стабилизации пространственной ориентации БПЛА

Макет зафиксирован в стенде таким образом, что имеет одну степень свободы (угол крена в связанной системе координат), тогда уравнения (2) с учетом (3) и (4) имеют вид

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = 0, \\ \dot{\omega}_2 = -\sqrt{\eta_2}\omega_2 + \eta_2 w_2 + \tilde{u}_2, \\ \dot{\omega}_3 = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Модель (16) может быть представлена в векторно-матричной форме для оси крена [15]

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (17)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\sqrt{\eta_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \eta_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T = [\varphi, \omega_2]^T$ – вектор состояния;
 $\mathbf{u} = [0, \tilde{u}_2]^T$ – вектор управляющих воздействий, формируемых бортовым алгоритмом управления;
 \mathbf{F} – переходная матрица состояния;
 \mathbf{G} – матрица возмущения;
 \mathbf{B} – матрица управления;
 $\mathbf{w}(t)$ – вектор белого гауссовского шума [16],

$$M[\mathbf{w}(t) \cdot (\mathbf{w}(t'))^T] = \mathbf{Q}\delta(t'-t), \quad (19)$$

где δ – дельта-функция;
 \mathbf{Q} – неотрицательно определенная матрица размера 2×2 .

В рассматриваемой системе алгоритмы оценки функционируют в дискретном времени. Система стабилизации БПЛА на каждом цикле обработки формирует следующий набор входных данных:
– измеренное значение угловой скорости, полученное на текущем цикле обработки [17] в соответствии с моделью наблюдения

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{H}\mathbf{x}_i + \mathbf{v}_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (20)$$

где n – количество отсчетов в интервале наблюдения;

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ – матрица наблюдения,}$$

$$M[\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i^T] = \mathbf{R}\delta_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (21)$$

\mathbf{R} – неотрицательно определенная матрица размера 2×2 ;

– оценки угла крена в связанной СК и соответствующей угловой скорости, полученные на предыдущих циклах обработки.

В связи с этим модель (17) необходимо привести к дискретному виду [13, 17]

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}_{i-1} + \mathbf{\Gamma}\mathbf{w}_{i-1} + \mathbf{K}\mathbf{u}_{i-1}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (22)$$

$$\text{где } \mathbf{\Phi} \approx \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 - \sqrt{\eta_2}\Delta t \end{bmatrix} \text{ – дискретная переходная матрица состояния;} \quad (23)$$

$$\mathbf{\Gamma} \approx \begin{bmatrix} 0 & \frac{\eta_2 \Delta t^2}{2} \\ 0 & \eta_2 \Delta t - \frac{\eta_2 \sqrt{\eta_2} \Delta t^2}{2} \end{bmatrix} \text{ – дискретная матрица возмущения;} \quad (24)$$

$$\mathbf{K} \approx \begin{bmatrix} 0 & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & \Delta t - \frac{\sqrt{\eta_2} \Delta t^2}{2} \end{bmatrix} \text{ – дискретная матрица управления.} \quad (25)$$

Ковариационная матрица шума состояния

$$\mathbf{Q}_s = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{\Gamma} \mathbf{\Gamma}^T \approx \eta_2^2 \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^3}{4} & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \frac{\Delta t^2}{2} & \Delta t \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Ковариационная матрица шума наблюдения

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 \end{bmatrix}, \quad (27)$$

где σ_2^2 – дисперсия шума наблюдения.

Выражения (23)–(27) позволяют получить алгоритм оценки калмановского типа с адаптацией к режиму движения с учетом управляющего воздействия, выражения которого имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{ij-1} &= \mathbf{\Phi} \hat{\mathbf{x}}_{i-1} + \mathbf{K} \mathbf{u}_i, \\ \hat{\mathbf{x}}_i &= \hat{\mathbf{x}}_{ij-1} + \mathbf{P}_{ij-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \{ \mathbf{z}_i - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{ij-1} \}, \\ \mathbf{P}_{ij-1} &= \mathbf{Q} + \mathbf{\Phi} \mathbf{P}_{i-1} \mathbf{\Phi}^T, \\ \mathbf{P}_i &= \mathbf{P}_{ij-1} - \mathbf{P}_{ij-1} \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_{ij-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}_{ij-1}, \\ & i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (28)$$

где \mathbf{x}_{ij-1} – экстраполированное значение вектора состояния;

\mathbf{x}_i – оценка вектора состояния;

\mathbf{P}_{ij-1} – корреляционная матрица ошибок экстраполяции;

\mathbf{P}_i – корреляционная матрица ошибок оценивания.

В качестве эксперимента рассмотрим процесс отработки системой управления БПЛА команд автопилота по изменению угла крена на 10, 20 и 30° с периодом поступления измерительных данных $\Delta t = 0,01$ с (пример исходных данных для целевого значения угла крена 20°, полученных в ходе проведения серии экспериментов с последующим усреднением результатов, представлен на рис. 3). Среднеквадратическое отклонение (СКО) шума наблюдения, обеспечиваемое бортовой измерительной системой, составляет $\sigma_z = 0,5^\circ/\text{с}$.

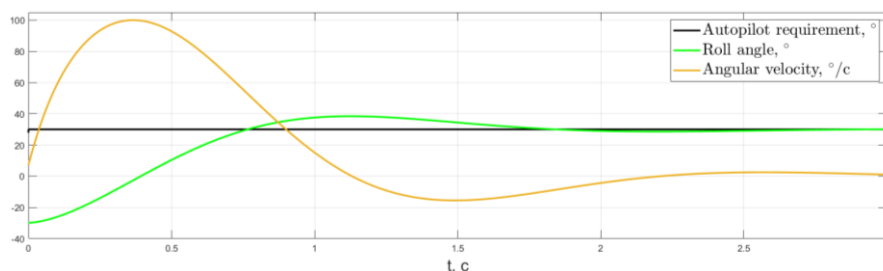
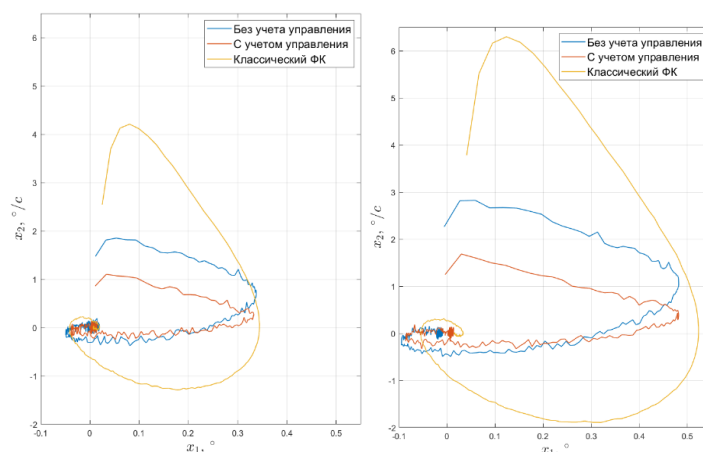


Рис. 3. Пример исходных данных

Оценка эффективности предлагаемого алгоритма проведена путем статистического моделирования процесса обработки измерительных данных бортового микромеханического гироскопа на множестве реализаций шума наблюдения по критериям среднеквадратического (σ) и максимального (Δ_{\max}) отклонения оценок углов ориентации макета БПЛА от истинного (эталонного) значения.

Для сравнения оценка производится предлагаемым алгоритмом, его аналогом без учета управляющих воздействий [13] и классическим фильтром Калмана. В ходе проведения адаптации получено значение параметра $\eta_2 = 6,5$. Фазовые портреты ошибок оценки угла крена и угловой скорости в связанной СК, полученные в результате численного моделирования, представлены на рис. 4. Количественные показатели эффективности предлагаемого алгоритма сведены в табл.



а б в

Рис. 4. Ошибки оценки на фазовой плоскости:

а – целевое значение 10° ; б – целевое значение 20° ; в – целевое значение 30°

Усредненные количественные показатели эффективности

Целевое значение угла крена	10°				20°				30°			
	Угол, $^\circ$		Скорость, $^\circ/\text{с}$		Угол, $^\circ$		Скорость, $^\circ/\text{с}$		Угол, $^\circ$		Скорость, $^\circ/\text{с}$	
Критерий	σ	Δ_{\max}	σ	Δ_{\max}	σ	Δ_{\max}	σ	Δ_{\max}	σ	Δ_{\max}	σ	Δ_{\max}
Классический фильтр Калмана	0,034	0,167	0,21	2,11	0,066	0,333	0,42	4,21	0,1	0,5	0,63	6,32
Алгоритм без учета управления	0,032	0,163	0,098	0,95	0,066	0,328	0,19	1,9	0,096	0,49	0,29	2,85
Алгоритм с учетом управления	0,031	0,161	0,046	0,54	0,065	0,325	0,1	1,07	0,095	0,48	0,14	1,61

Анализ результатов моделирования позволяют говорить о повышении точности оценки угловой ориентации БПЛА при учете управляющего воздействия в среднем на 7–15 % (в отдельных случаях до 80 %) за счет использования дополнительной информации о характере движения.

Заключение

В результате проведенного исследования получен адаптивный алгоритм оценки угловой ориентации автономных летательных аппаратов, отличающийся от известных использованием априорной информации о величине управляющих воздействий в структуре квазиоптимальной модели движения.

Приведенный пример использования предложенного алгоритма в задаче определения угла крена беспилотного летательного аппарата по данным бортовой инерциальной измерительной системы демонстрирует повышение точности оценки угловой ориентации БПЛА в среднем на 7–15 % в сравнении с алгоритмом без учета управляющих воздействий, что подтверждает достижение поставленной цели исследования.

Список литературы

- 1 **Асланов, М. А.** Системный анализ и принятие решений в деятельности учреждений реального сектора экономики, связи и транспорта / М. А. Асланов, В. В. Кузнецов, Ю. Н. Макаров. – Москва : Экономика, 2010. – 406 с. – ISBN 978-5-282-03021-1.
- 2 Синтез интеллектуальных алгоритмов обработки информации инерциальных датчиков в условиях деградации измерительного канала / Д. С. Андрашитов, А. А. Костоглотов, А. С. Пеньков, С. В. Лазаренко // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 8. – С. 146–155. – DOI 10.18127/j00338486-202408-14.
- 3 Синтез измерительной процедуры оценки ориентации малого беспилотного летательного аппарата в условиях изменения статуса результатов измерений / А. А. Костоглотов, В. О. Зехцер, А. С. Пеньков, С. В. Лазаренко // Измерительная техника. –

References

- 1 **Aslanov, M. A.** Systems analysis and decision-making in the activities of institutions of the real sector of the economy, communications and transport / M. A. Aslanov, V. V. Kuznetsov, Yu. N. Makarov. – Moscow : Economy, 2010. – 406 p. – ISBN 978-5-282-03021-1.
- 2 Synthesis of intelligent algorithms for processing information from inertial sensors under conditions of degradation of the measuring channel / D. S. Andrashitov, A. A. Kostoglotov, A. S. Penkov, S. V. Lazarenko // Radio Engineering. – 2024. – Vol. 88, No. 8. – P. 146–155. – DOI 10.18127/j00338486-202408-14.
- 3 Synthesis of a measurement procedure for assessing the orientation of a small unmanned aerial vehicle under conditions of changing the status of measurement results / A. A. Kostoglotov, V. O. Zekhtser, A. S. Penkov, S. V. Lazarenko //

2023. – № 12. – С. 4–11. – DOI 10.32446/0368-1025it.2023-12-4-11.

4 Синтез интеллектуального алгоритма оценки ориентации подвижных объектов транспортной инфраструктуры на базе многопараметрического идентификатора / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко, А. С. Пеньков [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 144–151. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_144.

5 Справочник по теории автоматического управления / А. Г. Александров, В. М. Артемьев, В. Н. Афанасьев [и др.] ; под редакцией А. А. Красовского. – Москва : Наука, 1987. – 711 с.

6 Исследование алгоритмов определения ориентации для микроспутников серии «ТаблетСат» / Д. С. Иванов, Н. А. Ивлев, С. О. Карпенко, М. Ю. Овчиников // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2014. – № 64. – 24 с.

7 **Костоглотов, А. А.** Метод синтеза адаптивных алгоритмов оценки параметров динамических систем на основе принципа декомпозиции и методологии объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов, А. С. Пеньков, С. В. Лазаренко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия : Естественные науки. – 2020. – № 4 (208). – С. 22–28. – DOI 10.18522/1026-2237-2020-4-22-28.

8 **Лященко, З. В.** Методы синтеза многорежимных алгоритмов управления и обработки информации на основе условия максимума обобщенной мощности : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / З. В. Лященко. – Ростов-на-Дону, 2022. – 204 с.

9 **Kalman, R.** A new approach to linear filtering and prediction problems / R. Kalman // Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering. – 1960. – P. 35–45.

10 **Markley, F. L.** Fundamentals of spacecraft attitude determination and control / F. L. Markley, J. L. Crassidis. – New York, USA : Springer, 2014. – 486 p.

11 **Костоглотов, А. А.** Структурно-параметрический синтез фильтра сопровождения на базе декомпозиции по целевому функционалу с адаптацией к возмущениям траектории / А. А. Костоглотов, А. С. Пеньков, С. В. Лазаренко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2021. – Т. 19, № 2. – С. 14–25. – DOI 10.18127/j20700814-202102-02.

12 **Kostoglotov, A.** Quasi-optimal synthesis of an adaptive filter in the problem of estimating the state of dynamic systems / A. Kostoglotov, A. Penkov, S. Lazarenko // E3S Web of Conferences. – 2020. – P. 210:01002. – DOI 10.1051/e3sconf/202021001002.

Measuring equipment. – 2023. – No. 12. – P. 4–11. – DOI 10.32446/0368-1025it.2023-12-4-11.

4 Synthesis of an intelligent algorithm for assessing the orientation of moving objects of transport infrastructure based on a multiparameter identifier / A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko, A. S. Penkov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 144–151. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_144.

5 Handbook on the theory of automatic control / A. G. Aleksandrov, V. M. Artemyev, V. N. Afanasyev [et al.] ; edited by A. A. Krasovsky. – Moscow : Nauka, 1987. – 711 p.

6 Study of attitude determination algorithms for “TabletSat” series microsattellites / D. S. Ivanov, N. A. Ivlev, S. O. Karpenko, M. Yu. Ovchinnikov // Keldysh Institute of Applied Mathematics Preprints. – 2014. – No. 64. – 24 p.

7 **Kostoglotov, A. A.** Method for synthesis of adaptive algorithms for estimating the parameters of dynamic systems based on the decomposition principle and the methodology of the combined maximum principle / A. A. Kostoglotov, A. S. Penkov, S. V. Lazarenko // Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Natural Science. – 2020. – No. 4 (208). – P. 22–28. – DOI 10.18522/1026-2237-2020-4-22-28.

8 **Lyashchenko, Z. V.** Methods for synthesizing multi-mode control and information processing algorithms based on the condition of maximum generalized power : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Z. V. Lyashchenko. – Rostov-on-Don, 2022. – 204 p.

9 **Kalman, R.** A new approach to linear filtering and prediction problems / R. Kalman // Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering. – 1960. – P. 35–45.

10 **Markley, F. L.** Fundamentals of spacecraft attitude determination and control / F. L. Markley, J. L. Crassidis. – New York, USA : Springer. – 2014. – 486 p.

11 **Kostoglotov, A. A.** Structural and parametric synthesis of a tracking filter based on decomposition by the objective functional with adaptation to trajectory disturbances / A. A. Kostoglotov, A. S. Penkov, S. V. Lazarenko // Information, measuring and control systems. – 2021. – Vol. 19, No. 2. – P. 14–25. – DOI 10.18127/j20700814-202102-02.

12 **Kostoglotov, A.** Quasi-optimal synthesis of an adaptive filter in the problem of estimating the state of dynamic systems / A. Kostoglotov, A. Penkov, S. Lazarenko // E3S Web of Conferences. – 2020. – P. 210:01002. – DOI 10.1051/e3sconf/202021001002.

13 Synthesis of an extrapolator of state parameters of dynamic processes in intelligent transport systems based on the scientific and methodological apparatus of reducing the Lagrange problem to an isoperimetric one / A. A. Kostoglotov, V. O. Zekhtser, A. S. Penkov, M. O. Nakonechnaya // Proceedings of the Eighth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ИТИ'24). – 2024. – Vol. 1. – P. 12–20. – DOI 10.1007/978-3-031-77688-5_2.

14 Разработка элементов беспилотных технологий на базе методов объединенного принципа максимума: отчет о НИР / ФГБОУ ВО РГУПС; А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко, А. С. Пеньков [и др.]. – Ростов-на-Дону, 2019. – № 328. – 43 с.

15 **Kostoglotov, A. A.** Synthesis method of algorithms for dynamic state estimation of maneuvering objects based on quasi-optimal motion models using reduction of the Lagrange problem / A. A. Kostoglotov, A. S. Penkov // International Journal of Mechanics and Control. – 2024. – Vol. 25, No. 2. – P. 77–85. – DOI <https://doi.org/10.69076/jomac.2024.0030>.

16 **Bar-Shalom, Y.** Multitarget-multisensor tracking: principles and techniques / Y. Bar-Shalom, X. R. Li. – Storrs: YBS Publishing, 1995. – Vol. II. – 615 p.

17 **Матвеев, В. В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – Санкт-Петербург: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с. – ISBN 978-5-900-78073-3.

13 Synthesis of an extrapolator of state parameters of dynamic processes in intelligent transport systems based on the scientific and methodological apparatus of reducing the Lagrange problem to an isoperimetric one / A. A. Kostoglotov, V. O. Zekhtser, A. S. Penkov, M. O. Nakonechnaya // Proceedings of the Eighth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ИТИ'24). – 2024. – Vol. 1. – P. 12–20. – DOI 10.1007/978-3-031-77688-5_2.

14 Development of elements of unmanned technologies based on the methods of the combined maximum principle: research report / RSTU; A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko, A. S. Penkov [et al.]. – Rostov-on-Don, 2019. – No. 328. – 43 p.

15 **Kostoglotov, A. A.** Synthesis method of algorithms for dynamic state estimation of maneuvering objects based on quasi-optimal motion models using reduction of the Lagrange problem / A. A. Kostoglotov, A. S. Penkov // International Journal of Mechanics and Control. – 2024. – Vol. 25, No. 2. – P. 77–85. – DOI <https://doi.org/10.69076/jomac.2024.0030>.

16 **Bar-Shalom, Y.** Multitarget-multisensor tracking: principles and techniques / Y. Bar-Shalom, X. R. Li. – Storrs: YBS Publishing, 1995. – Vol. II. – 615 p.

17 **Matveev, V. V.** Fundamentals of constructing platform-free inertial navigation systems / V. V. Matveev, V. Ya. Raspopov. – Saint Petersburg: JSC “Concern CSRI Elektropribor”, 2009. – 280 p. – ISBN 978-5-900-78073-3.

M. O. Nakonechnaya, A. S. Penkov, A. A. Kostoglotov, E. S. Leonov, V. P. Tavunov

SYNTHESIS OF AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR ESTIMATING THE ANGULAR ORIENTATION OF MOVING OBJECTS BASED ON QUASI-OPTIMAL MOTION MODELS TAKING INTO ACCOUNT AUTOPILOT COMMANDS

Abstract. The work is devoted to the topical issue of improving the accuracy of determining the angular orientation of autonomous aerial vehicles using a dynamic motion model by utilizing a priori information about control signals generated by the onboard autopilot in external stimuli mode.

The developed algorithm is based on a second-order quasi-optimal motion model obtained taking into account dynamic constraints and rational assumptions.

To analyze the effectiveness of the obtained algorithm, numerical simulation of the attitude estimation process for a multirotor unmanned aerial vehicle was carried out. The obtained results demonstrate an increase in the accuracy of estimating the angular orientation of an unmanned aerial vehicle by an average of 7–15 % compared to a similar algorithm without taking into account the autopilot commands.

Keywords: adaptation, angular orientation, estimation, filtering, motion model, Kalman filter.

For citation: Synthesis of an adaptive algorithm for estimating the angular orientation of moving objects based on quasi-optimal motion models taking into account autopilot commands / M. O. Nakonechnaya, A. S. Penkov, A. A. Kostoglotov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 8–18. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_8.

Сведения об авторах**Наконечная Марина Олеговна**

Ростовский государственный
университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном
транспорте»,
аспирант,
e-mail: nakonechnayamo@rgups.ru

Пеньков Антон Сергеевич

Ростовский государственный
университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном
транспорте»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: pencha_@mail.ru

Костоглотов Андрей Александрович

Ростовский государственный
университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном
транспорте»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: kostoglotov@me.com

Леонов Егор Сергеевич

Ростовский государственный
университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном
транспорте»,
студент,
e-mail: egorle03@mail.ru

Тавунов Владимир Петрович

Ростовский-на-Дону
научно-исследовательский институт
радиосвязи (РНИИРС),
начальник отдела,
e-mail: tavunov@mail.ru

Information about the authors**Nakonechnaya Marina Olegovna**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Communications in Railway
Transport”,
Postgraduate Student,
e-mail: nakonechnayamo@rgups.ru

Penkov Anton Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Communications in Railway
Transport”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: pencha_@mail.ru

Kostoglotov Andrey Aleksandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Communications in Railway
Transport”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: kostoglotov@me.com

Leonov Egor Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Communications in Railway
Transport”,
Student,
e-mail: egorle03@mail.ru

Tavunov Vladimir Petrovich

Rostov-on-Don Research Institute of Radio
Communications (RSIRC),
Head of the Department,
e-mail: tavunov@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.891 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_19

*И. В. Больших, В. А. Кохановский, А. М. Ананко, Д. Н. Шишияну, Е. С. Ткаленко***ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ С МАТРИЧНЫМ СВЯЗУЮЩИМ НА ОСНОВЕ КАУЧУКА ***

Аннотация. На этапе разработки нового антифрикционного покрытия необходимо принимать во внимание физические и механические свойства тех материалов, из которых оно будет изготовлено. Модификация полимерных материалов для создания композитов с улучшенными свойствами – это активно развивающаяся область исследований. В статье представлена разработанная технология нанесения композиционного антифрикционного покрытия на основе каучука, модифицированного дисульфидом молибдена и порошком меди. Установлена оптимальная концентрация каучука и растворителя, которая позволяет достичь необходимой вязкости матричного связующего, а также выбраны интервалы варьирования компонентов. Для поиска оптимального процентного соотношения состава связующего и достижения наилучших триботехнических характеристик антифрикционного полимерного покрытия в целом применены симплекс-решетчатые планы.

Ключевые слова: модификация, матричное связующее, технологический процесс, приспособление для фиксации, планирование эксперимента, матрица, интервалы варьирования, оптимальная концентрация.

Для цитирования: Технология нанесения покрытия с матричным связующим на основе каучука / И. В. Больших, В. А. Кохановский, А. М. Ананко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 19–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_19.

Модификация полимерных материалов для создания композитов с улучшенными свойствами – это активно развивающаяся область исследований. Дело в том, что исходные полимеры зачастую не обладают необходимым комплексом характеристик, требуемых для конкретного практического применения. Для достижения нужных параметров используется модификация, и одним из наиболее перспективных подходов является введение в полимерную матрицу микро- и наноразмерных модификаторов.

Сегодня спектр применяемых добавок и наполнителей впечатляет своим разнообразием. Это и природные минералы, такие как монтмориллонит, и синтетические углеродные наноматериалы, включая углеродные нанотрубки, фуллерены (сферообразные молекулы углерода), фуллеренолы (гидроксилированные фуллерены), более сложные фуллероидные структуры, а также графен – одноатомный слой углерода, и даже такие материалы, как шунгит (природная углеродсодержащая горная порода). В список также входят слоистые соединения переходных металлов, представляющие собой материалы с уникальной атомной структурой. Важно отметить, что многие из этих наполнителей используются не в чистом виде, а в форме, подвергнутой поверхностной модификации – аппретированию. Эта процедура позволяет улучшить совместимость наполнителя с полимерной матрицей, что положительно сказывается на свойствах конечного композита.

Особое внимание уделяется применению наномодифицированных наполнителей. Введение наночастиц в полимерную матрицу приводит к значительным изменениям свойств композита. Наноразмерные частицы создают на границе раздела фаз (полимер – наполнитель) уникальные структуры, значительно влияющие на механические характеристики материала. В результате образуется поверхностный слой с уникальными свойствами, в частности, с повышенной износостойкостью. Это особенно важно для условий экстремальных нагрузок, где традиционные материалы быстро выходят из строя.

Традиционные методы смазки часто оказываются недостаточно эффективными в экстремальных условиях работы, при высоких температурах, вакууме или воздействии агрессивных сред. Решение этой проблемы видится в применении инновационных антифрикционных покрытий. В рассматриваемом случае оно представляет собой модифицированный каучук, растворенный в нефрасе и дополнительно модифицированный порошком меди и дисульфидом молибдена.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (соглашение от 13.01.2025 № 109-03-2025-007).

Ключевым преимуществом разрабатываемого покрытия является его композитная структура. Она состоит из армирующей ткани, пропитанной специальным матричным связующим, которое одновременно выполняет функции адгезива, обеспечивая надежное сцепление с поверхностью детали. Армирующая ткань представляет собой уникальный композит из высокопрочных фторопластовых нитей «Полифен» и полиимидных нитей «Аримид-Т». Выбор этих материалов обусловлен их высокой устойчивостью к износу, химической и термической стабильностью.

Матричное связующее играет ключевую роль в обеспечении высоких эксплуатационных характеристик покрытия. Добавление дисульфида молибдена – это ключевой фактор, определяющий антифрикционные свойства покрытия. Дисульфид молибдена (MoS_2) обладает феноменальными характеристиками:

- широкий температурный диапазон работы: MoS_2 сохраняет свои свойства в диапазоне от $-185\text{ }^\circ\text{C}$ до $+450\text{ }^\circ\text{C}$ на воздухе и до $+1180\text{ }^\circ\text{C}$ в вакууме;
- низкий коэффициент трения: коэффициент трения MoS_2 по стали в вакууме составляет всего 0,02–0,04, что значительно снижает износ трущихся поверхностей;
- высокая несущая способность: значение несущей способности составляет 2800 МПа, что говорит о высокой прочности покрытия;
- устойчивость к радиации: MoS_2 демонстрирует высокую устойчивость к воздействию радиационного излучения.

Благодаря этим уникальным свойствам дисульфид молибдена является одним из наиболее востребованных материалов для создания антифрикционных покрытий в различных отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, машиностроение и энергетику.

Разработанная технология нанесения композиционного антифрикционного покрытия на основе каучука, модифицированного дисульфидом молибдена и порошком меди, открывает новые перспективы для повышения надежности и долговечности узлов трения в самых разных условиях эксплуатации. Использование армирующей ткани из высокопрочных волокон в сочетании с модифицированным матричным связующим, содержащим дисульфид молибдена, обеспечивает высокую износостойкость, низкий коэффициент трения и широкий диапазон рабочих температур, что делает данное покрытие одним из наиболее перспективных решений в области трибологии.

Медь в порошкообразной форме обладает рядом преимуществ при использовании в антифрикционных покрытиях. Ключевое свойство – низкий коэффициент трения. Например, наноструктурная медная пудра демонстрирует коэффициент трения всего 0,42, значительно меньший, чем у меди с крупнозернистой структурой (0,92). Это означает существенное снижение силы сопротивления движению при контакте поверхностей. Кроме того, такие покрытия отличаются высокой износостойкостью. Порошковые материалы на основе меди проявляют значительно большую стойкость к износу, чем традиционные бронзы или баббиты. Это обеспечивает долгий срок службы покрытий. Важным фактором является и способность к легкому прирабатыванию. Пористость структуры порошковой меди (до 35 %) позволяет предварительно заполнять поры смазочными материалами. Это создает резервуар смазки, который постоянно подпитывает контактные поверхности, дополнительно снижая трение и износ. В итоге использование порошковой меди в антифрикционных покрытиях обеспечивает комбинацию низкого коэффициента трения, высокой износостойкости в режиме самосмазывания, что делает такие покрытия весьма эффективными.

Матричное связующее формировалось на основе каучука в заранее определенных пропорциях с добавлением модификаторов. Предварительно клеевая основа растворялась нефрасом. В полученный раствор сначала добавлялся порошок меди и тщательно перемешивался, затем в матричное связующее вводился дисульфид молибдена и также перемешивался до достижения однородной массы. Сформированное матричное связующее приобретало темно-серый оттенок.

Технология нанесения покрытия включает в себя несколько этапов. На начальном этапе, как было описано выше, формировалось матричное связующее. После приготовления связующего из тканого каркаса вырезали образцы необходимой формы и размера и на эти образцы равномерно наносили заранее приготовленное матричное связующее. Клеевая основа сначала наносилась на сторону, где преобладают волокна фторопласта, а затем на сторону с волокнами «Аримида-Т». В процессе пропитки ткань укладывалась рабочей фторопластовой поверхностью книзу, для того чтобы раствор дополнительно проникал в ткань под действием тяжести. Эти операции позволили обеспечить равномерное распределение связующего по всей площади ткани и улучшить качество адгезии. После чего пропитанный матричным связующим каркас выдерживался от 3 до 5 минут и фиксировался на поверхности образцов. На завершающем этапе осуществлялось отверждение препрега при заданном давлении, что обеспечило прочное соединение покрытия с субстратом.

Надежность и долговечность клеевых соединений напрямую зависят от соблюдения технологического процесса склеивания. Любое отклонение от разработанной технологии может привести к значительному снижению прочности соединения. Таким образом, технологический процесс нанесения антифрикционного покрытия включает в себя несколько последовательных этапов:

1) на первом этапе осуществляется тщательная подготовка деталей. Для металлических элементов это, как правило, механическая обработка – зачистка абразивными материалами (зашкуривание) для удаления окислов, ржавчины и других неровностей, обеспечивающих наилучший контакт с клеем. Если покрытие имеет армирующий каркас (ткань), то на этом этапе происходит его выкройка и подготовка к нанесению;

2) следующий этап – обезжиривание. Для этого используются специальные растворители, обеспечивающие удаление жиров, масел и других органических загрязнений с поверхности деталей и каркаса покрытия;

3) после обезжиривания происходит пропитка каркаса покрытия заранее подготовленным матричным связующим. Это необходимо для обеспечения равномерного распределения связующего по всей площади каркаса и создания прочного соединения между волокнами. Одновременно наносится тонкий, равномерный слой связующего на поверхность субстрата (основной детали);

4) последующий этап – сборка технологического пакета. На субстрат аккуратно укладываются уже нанесенное покрытие и пленка антиадгезива (для предотвращения прилипания к оборудованию). Затем пакет подвергается силовому замыканию (1,5 МПа), обеспечивающему плотный контакт всех слоев и равномерное распределение давления;

5) завершающий этап – выдержка под нагрузкой до полного отверждения связующего. Важно отметить, что разработка конкретной технологии нанесения покрытия, особенно с использованием связующих холодного отверждения, требует тщательного подхода, включающего экспериментальную отработку и подбор оптимальных параметров для каждой конкретной детали трибосистемы с учетом ее геометрии, материала и рабочих условий. Только такой комплексный подход гарантирует достижение требуемых характеристик прочности и долговечности антифрикционного покрытия.

Фиксирование покрытия на образцах напряжениями отверждения осуществлялось в специальном приспособлении, представленном на рис. 1.

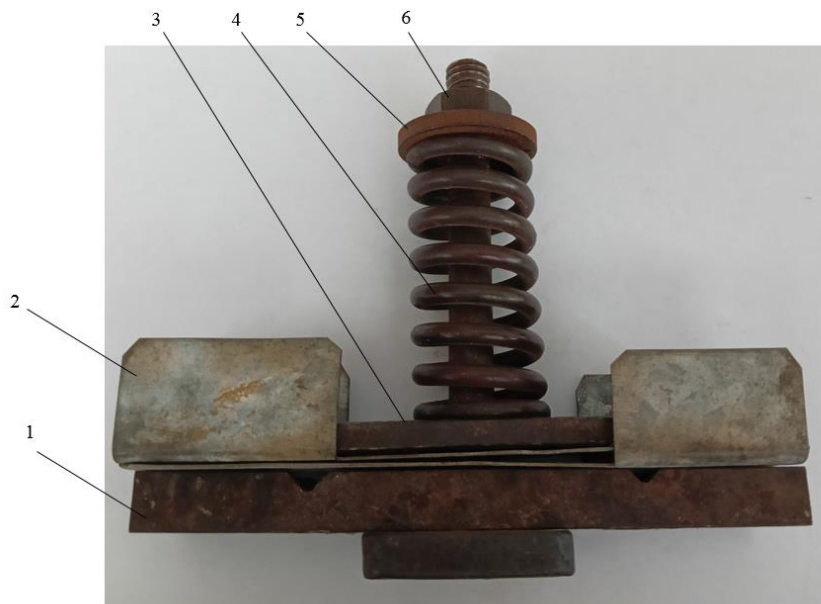


Рис. 1. Приспособление для фиксации покрытия на субстрате:

1 – основание; 2 – ограничители; 3 – верхняя планка; 4 – нагружающая пружина;
5 – шайба; 6 – регулировочная гайка

Пружина приспособления для фиксации покрытия при давлении отверждения тарировалась заранее. Образцы с нанесенным покрытием укладывались на основание и сверху прижимались верхней планкой под нагрузкой 1,5 МПа. Для предотвращения поперечного перемещения образцов относительно друг друга использовались ограничители. Необходимая нагрузка достигалась за счет регулировочной

гайки и шайбы, которая равномерно передавала усилие на пружину. При сборке технологического пакета между образцами и в зоне между сухим покрытием и субстратом в качестве антиадгезива укладывалась фторопластовая пленка (ТУ6-11-5751-766-1).

Добавление нефраса объясняется необходимостью разжижения матричного связующего для возможности более тщательного перемешивания его компонентов, достижения однородной массы и равномерного распределения модификаторов. Стоит отметить, что в процессе формирования матричного связующего пришлось столкнуться с проблемой выбора необходимого количества растворителя (нефраса).

Выбор концентрации каучука и нефраса определялся вязкостью связующего, которая позволяет добиться полной пропитки каркаса и тщательного перемешивания модификаторов. Исследование реологических свойств растворов полимеров проведено на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1 в системе коаксиальных цилиндров при скорости сдвига от 10 до 100 с⁻¹, при постоянной температуре 25 °С (см. рис. 2).

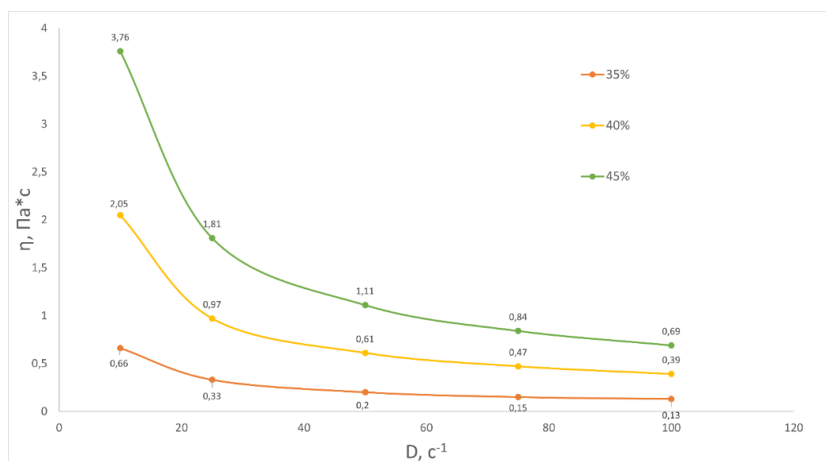


Рис. 2. Графическая зависимость эффективной вязкости η клеевой основы от скорости сдвига D

На начальном этапе для установления оптимальной концентрации каучука и растворителя в связующем, а также достижения необходимой вязкости были выбраны различные соотношения:

- 1) 35 % каучука и 65 % растворителя;
- 2) 40 % каучука и 60 % растворителя;
- 3) 45 % каучука и 55 % растворителя;

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы:

- состав с концентрацией 35 % фенолона и 65 % растворителя обладает повышенной текучестью, что приводит к увеличению расхода связующего и, как следствие, низкой адгезии;
- состав с концентрацией 40 % каучука и 60 % растворителя близок к необходимой концентрации, но также обладает высокой текучестью.

Наиболее подходящей концентрацией обладает состав из 45 % каучука и 55 % растворителя. Это соотношение позволяет тщательно перемешивать связующее после введения модификаторов, благодаря меньшему количеству растворителя он быстрее испаряется, что благоприятно влияет на формирование покрытия, а также позволяет равномерно распределять матричное связующее на образцах и добиваться полной пропитки тканого каркаса.

Разрабатываемое авторами антифрикционное покрытие – это сложный композиционный материал, представляющий собой уникальное сочетание различных элементов, работающих в синергии для достижения максимальной эффективности. Его структура – это тщательно продуманная конструкция, где ключевую роль играет тканый каркас.

Матричное связующее – это композитный материал, в состав которого входят каучук, порошковая медь и дисульфид молибдена. Следует учитывать, что пропорции компонентов взаимосвязаны, и при изменении количества одного компонента, меняется процентное соотношение всех компонентов, входящих в матричное связующее, поэтому для поиска оптимального состава и достижения наилучших триботехнических характеристик материала применялись специальные методы планирования эксперимента, а именно – симплекс-решетчатые планы. Предлагаемый математический метод планирования эксперимента позволяет эффективно исследовать зависимость свойств матрицы от соотношения ее компонентов и создавать расчетные модели, прогнозирующие поведение покрытия в целом на различных

режимах эксплуатации, минимизируя необходимое количество экспериментальных испытаний, что, в свою очередь, позволяет не только создавать высокоэффективные антифрикционные композиционные покрытия, но и оптимизировать процесс их разработки, одновременно снижая затраты времени и ресурсов. На рис. 3 показана матрица полного третьего порядка.

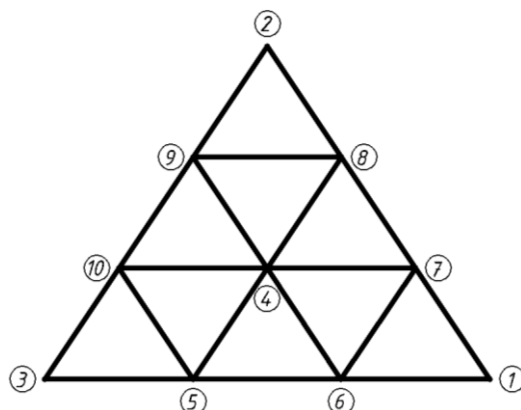


Рис. 3. Матрица полного 3-го порядка

Вершинам матрицы соответствует максимальное значение каждого из компонентов матричного связующего. В табл. 1 представлены интервалы варьирования количественного содержания компонентов смеси в точках.

Таблица 1

Интервалы варьирования компонентов

№ п/п	Наименование	Диапазон варьирования в переменных			
		натуральных, %		кодовых	
		min	max	min	max
1	Каучук	90	98	0	1
2	Дисульфид молибдена	1	5	0	1
3	Медь	1	5	0	1

Состав связующего, соответствующий каждой точке симплекс-решетчатого плана, приведен в матрице (табл. 2).

Таблица 2

Матрица симплекс-решетчатого плана

№ п/п	X1	X2	X3	Каучук	Дисульфид молибдена	Порошок меди	Выход
1	1	0	0	98	1	1	Y ₁
2	0	1	0	92	7	1	Y ₂
3	0	0	1	92	1	7	Y ₃
4	1/3	1/3	1/3	94	3	3	Y ₁₂₃
5	1/3	0	2/3	94	1	5	Y ₁₃₃
6	2/3	0	1/3	96	1	3	Y ₁₁₃
7	2/3	1/3	0	96	3	1	Y ₁₁₂
8	1/3	2/3	0	94	5	1	Y ₁₂₂
9	0	2/3	1/3	92	5	3	Y ₂₂₃
10	0	1/3	2/3	92	3	5	Y ₂₃₃

Выводы

1 Определена оптимальная концентрация каучука и растворителя (нефраса), которая позволяет достичь необходимой вязкости связующего, достаточной для равномерной пропитки матричного каркаса.

2 В качестве модификаторов связующего выбраны медный порошок и дисульфид молибдена, а также определена их концентрация в каждой точке симплекс-решетчатого плана.

3 Отработана технология приготовления и нанесения матричного связующего на основе каучука, модифицированного наполнителями.

4 Необходимо проведение полного комплекса исследований для определения оптимального состава матричного связующего на основе каучука по критериям адгезионной прочности, вязкоупругих свойств покрытия, а также триботехнических параметров разработанного антифрикционного полимерного покрытия в целом.

Список литературы

1 Инновационные технологии повышения износостойкости тяжело нагруженных трибосистем путем формирования структуры и свойств их поверхностного слоя / В. И. Колесников, И. В. Колесников, Д. С. Мантуров, А. И. Воропаев // Научные технологии в машиностроении. – 2024. – № 8 (158). – С. 3–11. – DOI 10.30987/2223-4608-2024-3-11.

2 Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives / O. A. Belyak, T. V. Suvorova, D. S. Manturov, A. M. Ananko // Mechanics of Composite Materials. – 2025. – Vol. 61, No. 2. – P. 257–268. – DOI 10.1007/s11029-025-10274-x.

3 **Колесников, И. В.** Пути повышения трибологических характеристик композиционных полимерных материалов и смазок в узлах трения / И. В. Колесников, К. С. Лебединский // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 6. – С. 52–57. – ISSN 0235-7119.

4 **Кохановский, В. А.** Фторопластсодержащие антифрикционные композиты при низкоскоростной эксплуатации / В. А. Кохановский, Д. В. Глазунов, А. А. Феденко // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 4 (90). – С. 3–9. – ISSN 1992-6502.

5 **Сидашов, А. В.** Исследование фторопластсодержащего наноструктурированного покрытия на поверхности стали / А. В. Сидашов, М. В. Бойко, А. Т. Козаков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (53). – С. 96–101. – ISSN 1818-5509.

6 Исследование адгезионной прочности антифрикционных покрытий на основе фенилона / И. В. Больших, А. М. Ананко, Я. К. Склифус, Е. Д. Аникина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_20.

References

1 Innovative technologies for increasing wear resistance of heavily loaded tribosystems by forming the structure and properties of their surface layer / V. I. Kolesnikov, I. V. Kolesnikov, D. S. Manturov, A. I. Voropaev // Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2024. – No. 8 (158). – P. 3–11. – DOI 10.30987/2223-4608-2024-3-11.

2 Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives / O. A. Belyak, T. V. Suvorova, D. S. Manturov, A. M. Ananko // Mechanics of Composite Materials. – 2025. – Vol. 61, No. 2. – P. 257–268. – DOI 10.1007/s11029-025-10274-x.

3 **Kolesnikov, I. V.** Ways to improve the tribological characteristics of composite polymer materials and lubricants in friction units / I. V. Kolesnikov, K. S. Lebedinsky // Problems of mechanical engineering and machine reliability. – 2017. – No. 6. – P. 52–57. – ISSN 0235-7119.

4 **Kokhanovskiy, V. A.** Fluoroplastic-containing antifriction composites under low-speed operation / V. A. Kokhanovskiy, D. V. Glazunov, A. A. Fedenko // Vestnik UGATU. – 2020. – Vol. 24, No. 4 (90). – P. 3–9. – ISSN 1992-6502.

5 **Sidashov, A. V.** Study of fluoroplastic-containing nanostructured coating on the steel surface / A. V. Sidashov, M. V. Boyko, A. T. Kozakov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (53). – P. 96–101. – ISSN 1818-5509.

6 Study of the adhesion strength of antifriction coatings based on phenylone / I. V. Bolshikh, A. M. Ananko, Ya. K. Sklifus, E. D. Anikina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 4 (96). – P. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_20.

I. V. Bolshikh, V. A. Kokhanovskiy, A. M. Ananko, D. N. Shishiyanu, E. S. Tkalenko

TECHNOLOGY OF COATING WITH A MATRIX BINDER BASED ON RUBBER

Abstract. At the stage of developing a new antifriction coating, it is necessary to take into account the physical and mechanical properties of the materials from which it will be made. The modification of polymer materials to create composites with improved properties is an actively developing field of research. The article presents a developed technology for applying a composite antifriction coating based on rubber modified with molybdenum disulfide and copper powder. The optimal concentration of rubber and solvent has been determined to achieve the required viscosity of the matrix binder, and the intervals for varying the components have been selected. Simplex-lattice plans were used to find the optimal percentage of the binder composition and achieve the best tribotechnical characteristics of the anti-friction polymer coating as a whole.

Keywords: modification, matrix binder, technological process, fixture, experiment planning, matrix, variation intervals, optimal concentration.

For citation: Technology of coating with a matrix binder based on rubber / I. V. Bolshikh, V. A. Kokhanovskiy, A. M. Ananko [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 19–25. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_4_19.

Сведения об авторах

Больших Иван Валерьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Кохановский Вадим Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Технология металлов»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: vcohan@yandex.ru

Ананко Анатолий Михайлович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Научно-образовательный центр
Научно-исследовательской
части «Ресурсосберегающие технологии»,
руководитель группы,
e-mail: nypotilitailla@mail.ru

Шишияну Дарья Николаевна

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

Ткаленко Елизавета Сергеевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог»,
студент,
e-mail: tkalenkoliza2@gmail.com

Information about the authors

Bolshikh Ivan Valerievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Kokhanovskiy Vadim Alekseevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Metals Technology”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: vcohan@yandex.ru

Ananko Anatoly Mikhailovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Scientific and Educational Center
of the Research Part
“Resource-Saving Technologies”,
Team Leader,
e-mail: nypotilitailla@mail.ru

Shishiyanu Daria Nikolaevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Chemistry”,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: dariashishi@gmail.com

Tkalenko Elizaveta Sergeevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Railway Survey, Design and
Construction”,
Student,
e-mail: tkalenkoliza2@gmail.com

М. С. Игнатов, О. Ю. Елагина

Трибодиагностика турбинного масла ТП-22С

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния различных загрязнений и термоокислительного старения на диэлектрическую проницаемость и трибологические свойства турбинного масла ТП-22с. Экспериментально установлено, что введение в масло таких загрязнений, как порошок стали 40Х, кварцевый песок и вода, а также процесс его старения приводят к статистически значимому росту диэлектрической проницаемости и ухудшению антифрикционных характеристик – увеличению коэффициента трения и диаметра пятна износа. Выявлена сильная положительная корреляция между ростом диэлектрической проницаемости и увеличением коэффициента трения, что подтверждает возможность использования измерения диэлектрической проницаемости в качестве косвенного метода для оперативной диагностики состояния масла и прогнозирования износа узлов трения без проведения сложных трибологических испытаний.

Ключевые слова: трибодиагностика, турбинное масло, диэлектрическая проницаемость, коэффициент трения, пятно износа, загрязнения, старение масла, мониторинг состояния.

Для цитирования: Игнатов, М. С. Трибодиагностика турбинного масла ТП-22С / М. С. Игнатов, О. Ю. Елагина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 26–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_26.

Введение

Оценка текущего состояния подшипниковых узлов в процессе эксплуатации является одной из составных частей обеспечения надежной и безопасной работы любых машин и механизмов. Как правило мониторинг состояния тяжело нагруженных подшипников проводится с применением методов вибродиагностики. Вибродиагностика позволяет выявить нарушения в работе подшипников, но не дает информации о причинах их возникновения. Такую информацию, позволяющую выявлять нарушения на ранних стадиях их развития, обеспечивают методы трибодиагностики, базирующиеся на анализе текущего состояния смазочных сред [14]. Они позволяют оценить изменение физико-химических свойств смазочной среды в процессе эксплуатации. Внедрению методов трибодиагностики в общепромышленную практику препятствует отсутствие данных по взаимосвязи параметров физико-химических свойств смазочной среды и изменения триботехнических параметров, отвечающих за работу узлов трения. Как отмечено в работах [14, 15], контроль состояния масла позволяет не только диагностировать текущее состояние узлов трения, но и прогнозировать их остаточный ресурс. В данном исследовании рассмотрено применение методов трибодиагностики для прогнозирования изменения антифрикционных свойств турбинного масла ТП-22С. Турбинное масло ТП-22С широко применяется в нефтегазовой отрасли для смазки подшипников газоперекачивающих агрегатов. При надлежащем использовании и обслуживании, ТП-22С обеспечивает снижение трения, защиту оборудования от износа и коррозии, а также помогает поддерживать высокую эффективность работы подшипников ГПА. Однако в процессе эксплуатации под воздействием температуры, механических нагрузок и загрязнений (таких как продукты износа, пыль, влага и продукты окисления) происходит постепенная деградация масла, что приводит к ухудшению его эксплуатационных характеристик и сказывается на работоспособности узлов трения. Целью работы являлось исследование влияния загрязнений разной природы на диэлектрическую проницаемость и трибологические свойства турбинного масла ТП-22с.

Основная часть

Для проведения исследования взято свежее масло ТП-22С производства ООО «Газпромнефть-СМ», площадка производства – Омский завод смазочных материалов, номер партии – 79044, дата изготовления – 13.02.2025 г. Технические характеристики турбинного масла ТП-22С приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Физико-химические и технические свойства турбинного масла ТП-22С
из ПК №25001701-ОЗСМ**

Наименование показателя	Метод испытаний	Фактическое значение
Вязкость кинематическая мм ² /с, при температуре 40 °С, в пределах	ГОСТ 33	32,6
Кинематическая вязкость при 50 °С, мм ² /с	ГОСТ 33	19,85
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с		5,35
Индекс вязкости, не менее	ГОСТ 25371	95
Кислотное число, мг КОН/г, в пределах	ГОСТ 11362	0,05
Антикоррозионные свойства	ГОСТ 19199	Отсутствие коррозии
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже	ГОСТ 4333	224
Температура застывания, °С, не выше	ГОСТ 20287	-17
Массовая доля серы, %, не более	ASTM D 6481	0,28
Массовая доля механических примесей, %, не более	ГОСТ 6370	0,005
Массовая доля воды, %, не более	ГОСТ 2477	Отсутствие
Плотность при 15 °С, кг/м ³ , не более	ГОСТ Р 51069	873,2

Для проведения лабораторных исследований в пробу свежего масла ТП-22С вводились загрязняющие примеси в фиксированном количестве и проводилось старение смазочной среды.

В качестве загрязняющих примесей в смазочной среде использовались материалы, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Используемые загрязнительные материалы и их свойства

Параметры	Состав	Размер	Форма
Порошок из стали 40Х	С – 0,36–0,44 %, Cr – 0,80–1,10 %, Mn – 0,17–0,30 %, Si – 0,17–0,37 %, Ni ≤ 0,30 %, Cu ≤ 0,30 %	< 100 мкм	Сферическая
Кварцевый песок	SiO ₂ ≥ 98 %, Al ₂ O ₃ < 0,5 %, Fe ₂ O ₃ < 0,1 %, TiO ₂ < 0,1 %, CaO, MgO < 0,1–0,2 %, Na ₂ O, K ₂ O < 0,1–0,2 %	0,1–0,3 мм Допустимое отклонение ≤ 3–5 %	Твердость: ~7 по Моосу Остроугольная, неправильная, изометричная
Вода по ГОСТ 6709-72	–	–	–

На основе указанных загрязнителей для проведения лабораторных исследований проводилась подготовка модельных составов. Требуемое количество загрязнителей, добавленное в фиксированный объем смазочной среды, рассчитывалось по формуле:

$$m_{\text{загр}} = \frac{(C \cdot \rho_{\text{масла}} \cdot V_{\text{масла}})}{1000000}, \quad (1)$$

где $m_{\text{загр}}$ – масса загрязнителя, г;

C – требуемая концентрация загрязнителя, ppm;

$\rho_{\text{масла}}$ – плотность масла, г/мл;

$V_{\text{масла}}$ – объем пробы масла, мл.

Приготовление модельных составов осуществлялось путем взвешивания навески загрязнителя с точностью $\pm 0,1$ мг на электронных аналитических весах Sartorius Secura 225-1S и введения в пробу смазочной среды небольшими порциями, равными необходимому для проведения замера, и тщательно диспергировалось по объёму проб с помощью лабораторной высокоскоростной мешалки «LAB-5-250» в течение 30 минут. Для предотвращения расслоения и осаждения загрязнителей интервал времени между приготовлением модельного состава и его использованием для проведения испытаний ограничивался периодом не более 15 минут.

Для оценки влияния степени старения смазочной основы на изменение триботехнических свойств смазочной среды было выполнено окисление проб масла до разной степени окисления. Подготовка проб осуществлялась путем нагрева пробы смазочной среды в присутствии металлического катализатора (медные пластины) при температуре 120 °С в термошкафу BINDER FP 400 со свободной циркуляцией воздуха. Посуда с пробами выдерживалась при постоянной температуре в течение различных промежутков времени, после чего путём титрования определялось общее кислотное число (TAN, ГОСТ 5985-79 / ASTM D974/D664). Контроль степени старения определялся на основе замеров кислотного числа по ГОСТ 11362 и ASTM D664.

В качестве контрольных характеристик проб ТП-22с использовались следующие показатели:

– диэлектрическая проницаемость (ϵ), определяемая с применением опытного масляного пластинчатого конденсатора с емкостью в вакууме 0,12 нФ и мультиметра DT 9208A;

– коэффициент трения (f) и диаметр пятна износа (D), определяемые при испытаниях на четырехшариковой машине трения Plint в условиях контактного взаимодействия по схеме три шара – один шар по ГОСТ 9490. В качестве эталонного значения критической нагрузки ($R_{кр}$) для масла Тп-22С в исходном состоянии (без наработки) было принято значение 56 кгс (≈ 549 Н), обеспечивающее формирование пятна износа диаметром 0,5 мм, что соответствует нормативным требованиям для данного типа смазочного материала.

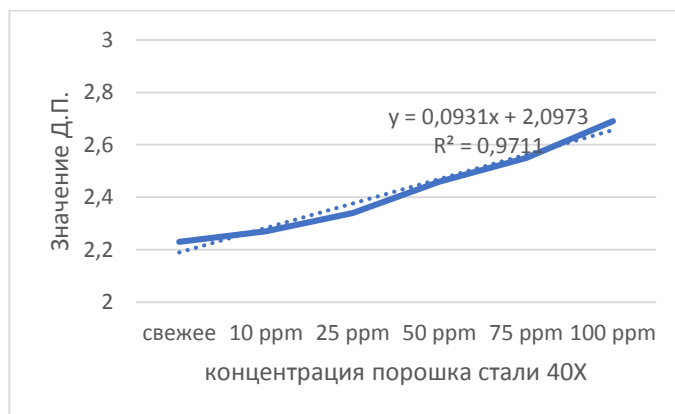
Все представленные в работе данные являются средними значениями не менее чем из трёх параллельных измерений. Погрешность измерений не превышала 5 % для диэлектрической проницаемости и трибологических параметров.

Сводные данные средних значений диэлектрической проницаемости (ϵ (Y1)) модельных проб смазочной среды, содержащих загрязнители при различных концентрациях, с построением линий тренда, представлены на рис. 1.

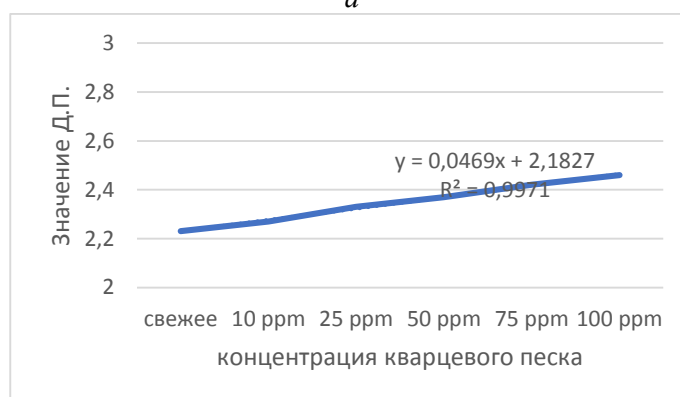
Анализ влияния загрязнителей на величину диэлектрической проницаемости показывает рост этого показателя при увеличении содержания загрязнителей. Наличие воды оказывает наиболее существенное влияние на величину диэлектрической проницаемости. При одинаковом содержании твердых частиц и аналогичном содержании вода в количестве 50 ppm прирост диэлектрической проницаемости составил 4–5 % и 8 % соответственно. При увеличении содержания загрязнителей до 100 ppm увеличение этого показателя составило 9 % для минеральных загрязнителей, 14 % для железного порошка и 19 % для воды.

Вклад старения масла ТП-22с в прирост диэлектрической проницаемости является существенным и прогрессирующим. Он заключается в накоплении полярных продуктов окисления, которые, являясь диполями, усиливают поляризацию масляной среды в электрическом поле, что и фиксируется прибором как рост диэлектрической проницаемости. Этот рост имеет четкую зависимость от степени окисления масла, характеризуемой кислотным числом. Увеличение кислотного числа с 0,05 до 0,2 мг КОН/г привело к росту диэлектрической проницаемости на 15–18 %, что сопоставимо с влиянием твердых загрязнителей при концентрации 75–100 ppm.

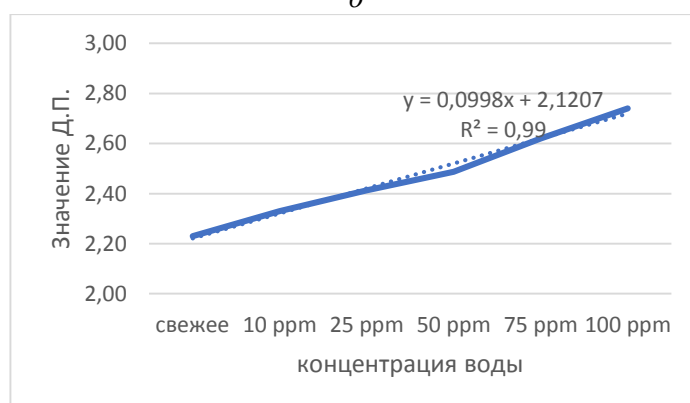
Изменение трибологических показателей смазочной среды в зависимости от наличия загрязнителей представлено в табл. 3.



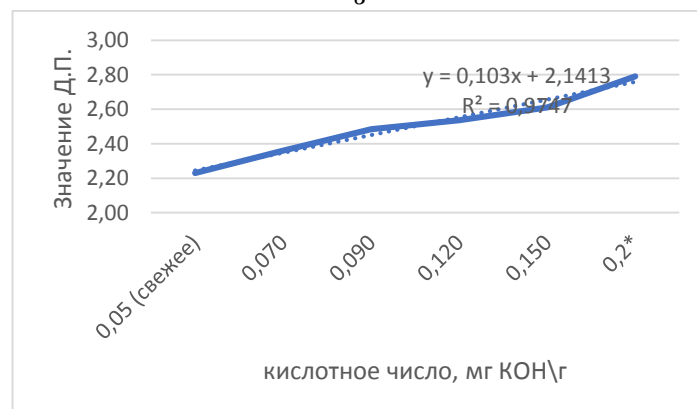
а



б



в



г

Рис. 1. Графические зависимости изменения диэлектрической проницаемости модельных составов смазки ТП-22с в зависимости от содержания загрязнителей:
а – порошок стали 40X, б – кварцевый песок, в – вода по ГОСТ 6709-72, г – старение

Таблица 3

Зависимость трибологических показателей от загрязнений

Загрязнитель	Параметр	Замер	0 ppm	25 ppm	50 ppm	75 ppm	100 ppm
Порошок стали 40X CFe	f	Среднее	0,079	0,080	0,090	0,102	0,113
	D	Среднее	636	650	701	715	771
Минеральные загрязнители CSiO ₂	f	Среднее	0,079	0,086	0,090	0,098	0,109
	D	Среднее	636	707	732	754	795
Содержание воды CH ₂ O	f	Среднее	0,079	0,079	0,089	0,101	0,111
	D	Среднее	636	643	650	688	711
Старение			0,05 КОН/г	0,09 КОН/г	0,12 КОН/г	0,15 КОН/г	0,2 КОН/г
	f	Среднее	0,079	0,091	0,104	0,115	0,120
	D	Среднее	636	663	702	725	756

Сравнение представленных данных показывает, что влияние загрязнителей (Fe, SiO₂, H₂O) примерно одинаково увеличивает коэффициент трения при содержании 50 ppm на 13–14 % и при 100 ppm – на 38–43 %. Разница в приросте коэффициента трения у разных загрязнителей начинает проявляться более существенно при максимальной концентрации в 100 ppm. Минимальное значение коэффициента трения 0,109 при этой концентрации получено при загрязнении SiO₂, а максимальное – 0,113 при загрязнении порошком стали 40X. Влияние старения смазочной среды привело к наиболее интенсивному росту коэффициента трения в 1,52 раза по сравнению с исходным уровнем.

Изменение диаметра пятна износа оказалось наиболее чувствительно к составу загрязнителей. Наличие воды дало минимальный прирост данного показателя, составившего при 100 ppm 12 %. Твердые частицы SiO₂ и порошок стали 40X существенно увеличили диаметр пятна износа при максимальной концентрации в 100 ppm на 25 и 21 % соответственно. Старение смазочной среды в меньшей степени отразилось на росте диаметра пятна износа. Прирост этого показателя при достижении максимальной степени старения составил 18 %.

Для оценки возможности контроля трибологических параметров смазочной среды при наличии загрязнителей по показаниям диэлектрической проницаемости было выполнено обобщение полученных данных по коэффициенту трения и диаметру пятна износа с результатами замеров диэлектрической проницаемости. На рис. 2а приведен сводный график изменения коэффициента трения по значениям диэлектрической проницаемости при наличии в составе смазочной среды твердых частиц (Fe, SiO₂) и воды, а на рис. 2, б приведена зависимость коэффициента трения от диэлектрической проницаемости для проб масла, подвергшихся термоокислительному старению. Как в случае с загрязнителями, так и при росте степени окисления наблюдается четкая положительная линейная корреляция увеличения коэффициента с ростом диэлектрической проницаемости. Полученные результаты демонстрируют потенциальную возможность применения метода измерения диэлектрической проницаемости для косвенной оценки ухудшения трибологических свойств смазочной среды как из-за наличия загрязнений разной природы, так и из-за химической деградации масла.

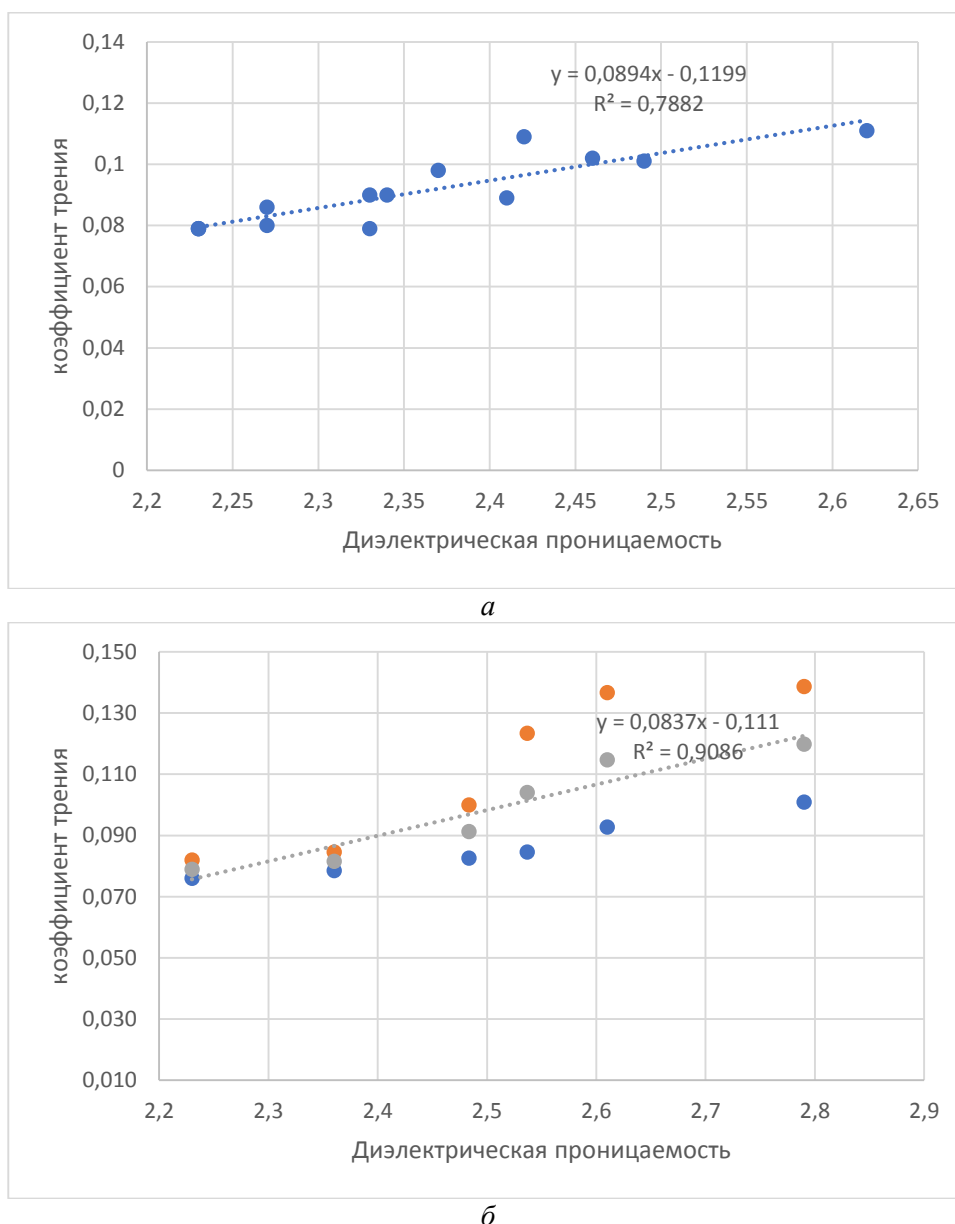


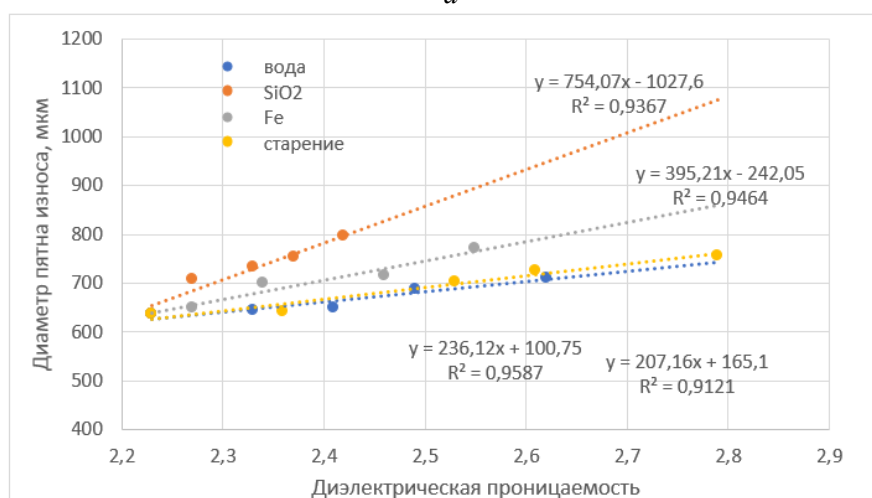
Рис. 2. Графические зависимости изменения коэффициента трения модельных составов турбинного масла ТП-22с в зависимости от величины диэлектрической проницаемости: а – с загрязнителями, б – после старения

Анализ полученной графической зависимости показывает, что рост коэффициента трения связан с увеличением диэлектрической проницаемости и может быть косвенно определен на основе замеров данного показателя без проведения трибологических испытаний. При использовании линейной зависимости коэффициент трения может быть определен по значению диэлектрической проницаемости с коэффициентом регрессии не хуже 0,79, что указывает на наличие функциональной зависимости между исследованными факторами.

Анализ графика на рис. 3, а показывает, что обобщение разных видов загрязнений не обеспечивает наличие четкой корреляционной связи между диаметром пятна износа и диэлектрической проницаемостью смазочной среды. Влияние загрязнений на величину износа зависит не только от трибологических свойств смазки, но и от механических свойств частиц загрязнителей. Так наибольший вклад в величину износа при одинаковом значении диэлектрической проницаемости дает SiO₂, менее значительно на диаметр пятна износа влияет рост значений диэлектрической проницаемости порошка стали 40Х. Влияние воды и старения смазки на изменение пятна износа при росте диэлектрической проницаемости наименее выражено и отличается несущественно (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Графические зависимости изменения среднего диаметра пятна износа (D) модельных составов турбинного масла ТП-22с в зависимости от величины диэлектрической проницаемости (ϵ):

а – сводный по всем загрязнителям и старению, б – по каждому загрязнителю и старению отдельно

В действующей нормативно-технической документации, регламентирующей ограничения по сроку эксплуатации смазочных материалов, отсутствуют требования к максимально допустимому коэффициенту трения. Данный параметр не включён в перечень обязательных критериев оценки работоспособности смазочных сред. Вместе с тем при лабораторных испытаниях смазочных материалов в качестве одного из ключевых показателей их триботехнических свойств используется критическое значение диаметра пятна износа (ПИ). Используя графики на рис. 3, б, можно определить предельное значение диэлектрической проницаемости, при которой величина пятна износа выходит за критическое значение. Использование данного подхода позволит контролировать изменение триботехнических характеристик узла трения и тенденцию к росту величины износа по результатам определения диэлектрической проницаемости и загрязненности смазочной среды.

Выводы

1 Установлено, что диэлектрическая проницаемость (ϵ) турбинного масла ТП-22С является чувствительным параметром, демонстрирующим линейную зависимость роста при увеличении концентрации всех исследуемых загрязнителей (порошок стали 40Х, кварцевый песок, вода), а также при термоокислительном старении. Наибольшее влияние на рост ϵ оказывает наличие воды.

2 Все виды загрязнений и старение масла приводят к значительному ухудшению его триботехнических характеристик: росту коэффициента трения (f) и диаметра пятна износа (D). Влияние старения на рост коэффициента трения оказалось наиболее существенным (в 1,52 раза), тогда на диаметр пятна износа сильнее всего повлияли твердые загрязнители.

3 Показано, что влияние загрязнений на величину диаметра пятна износа зависит не только от трибологических свойств смазки, но и от механических свойств частиц загрязнителей. Максимальный рост пятна износа при одинаковом значении диэлектрической проницаемости показывает SiO₂, а минимальный – наличие воды и старение смазочной среды.

4 С использованием построенных регрессионных моделей получена возможность определения предельного значения диэлектрической проницаемости, при которой величина пятна износа выходит за критическое значение, что подтверждает перспективность использования диэлектрической проницаемости в качестве косвенного диагностического параметра для оперативной оценки состояния узла трения.

Список литературы

- 1 **ГОСТ 33-2016.** Нефтепродукты и другие жидкости. Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 24 с.
- 2 **ГОСТ 25371-2019 (ISO 2909:2015).** Нефтепродукты. Расчет индекса вязкости по кинематической вязкости. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 16 с.
- 3 **ГОСТ 11362-96.** Нефтепродукты. Метод определения кислотного числа. – Москва : Стандартинформ, 1996. – 8 с.
- 4 **ГОСТ 19199-73.** Масла турбинные. Метод определения антикоррозионных свойств. – Москва : Стандартинформ, 1973. – 6 с.
- 5 **ГОСТ 4333-2014.** Нефтепродукты. Методы определения температуры вспышки в открытом тигле. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 12 с.
- 6 **ГОСТ 20287-91.** Нефтепродукты. Метод определения температуры застывания. – Москва : Стандартинформ, 1991. – 8 с.
- 7 **ASTM D6481-24.** Standard Test Method for Determination of Phosphorus, Sulfur, Calcium, and Zinc in Lubrication Oils by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectroscopy. – West Conshohocken : ASTM International, 2024. – 10 p.
- 8 **ГОСТ 6370-83.** Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. – Москва : Стандартинформ, 1983. – 10 с.
- 9 **ГОСТ 2477-2014.** Нефть и нефтепродукты. Метод определения воды. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 14 с.
- 10 **ГОСТ Р 51069-97 (ИСО 3675-93).** Нефть сырая и нефтепродукты. Лабораторный метод определения плотности. – Москва : Стандартинформ, 1997. – 12 с.
- 11 **ГОСТ 6709-72.** Вода дистиллированная. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 1972. – 6 с.
- 12 **ГОСТ 5985-79.** Нефтепродукты. Методы определения кислотного и основного чисел. – Москва : Стандартинформ, 1979. – 8 с. / **ASTM D664-18e2.** Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. – West Conshohocken : ASTM International, 2018. – 12 с. / **ASTM D974-22.** Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. – West Conshohocken : ASTM International, 2022. – 14 p.

References

- 1 **GOST 33-2016.** Petroleum products and other liquids. Method for determining kinematic viscosity and calculating dynamic viscosity. – Moscow : Standartinform, 2016. – 24 p.
- 2 **GOST 25371-2019 (ISO 2909:2015).** Petroleum products. Calculation of viscosity index by kinematic viscosity. – Moscow : Standartinform, 2019. – 16 p.
- 3 **GOST 11362-96.** Petroleum products. Method for determining acid number. – Moscow : Standartinform, 1996. – 8 p.
- 4 **GOST 19199-73.** Turbine oils. Method for determining anticorrosive properties. – Moscow : Standartinform, 1973. – 6 p.
- 5 **GOST 4333-2014.** Petroleum products. Methods for determining flash point in an open crucible. – Moscow : Standartinform, 2014. – 12 p.
- 6 **GOST 20287-91.** Petroleum products. Pour point method. – Moscow : Standartinform, 1991. – 8 p.
- 7 **ASTM D6481-24.** Standard Test Method for Determination of Phosphorus, Sulfur, Calcium, and Zinc in Lubrication Oils by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectroscopy. – West Conshohocken : ASTM International, 2024. – 10 p.
- 8 **GOST 6370-83.** Oil, petroleum products and additives. Method for determining mechanical impurities. – Moscow : Standartinform, 1983. – 10 p.
- 9 **GOST 2477-2014.** Oil and petroleum products. Method for determining water. – Moscow : Standartinform, 2014. – 14 p.
- 10 **GOST R 51069-97 (ISO 3675-93).** Crude oil and petroleum products. Laboratory method for determining density. – Moscow : Standartinform, 1997. – 12 p.
- 11 **GOST 6709-72.** Distilled water. Technical specifications. – Moscow : Standartinform, 1972. – 6 p.
- 12 **GOST 5985-79.** Petroleum products. Methods for determining acid and base numbers. – Moscow : Standartinform, 1979. – 8 p. / **ASTM D664-18e2.** Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. – West Conshohocken : ASTM International, 2018. – 12 p. / **ASTM D974-22.** Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. – West Conshohocken : ASTM International, 2022. – 14 p.

13 ГОСТ 9490-75. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод испытания на четырехшариковой машине трения. – Москва : Стандартинформ, 1975. – 14 с.

14 **Фролов, К. В.** Трение, износ и смазка (трибология) в машиностроении / К. В. Фролов, В. А. Белый. – Москва : Машиностроение, 2008. – 358 с.

15 **Вайсман, А. А.** Модификация поверхностей трения в условиях граничной смазки / А. А. Вайсман, Ю. Н. Дроздов // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, № 4. – С. 720–728.

16 **Паспорт качества № 25001701-ОЗСМ** на турбинное масло ТП-22С / ООО «Газпромнефть-СМ», Омский завод смазочных материалов. – Омск, 2025. – 2 с.

13 **GOST 9490-75.** Liquid and plastic lubricating materials. Test method on a four-ball friction machine. – Moscow : Standartinform, 1975. – 14 p.

14 **Frolov, K. V.** Friction, wear and lubrication (tribology) in mechanical engineering / K. V. Frolov, V. A. Bely. – Moscow : Mashinostroenie, 2008. – 358 p.

15 **Vaisman, A. A.** Modification of friction surfaces under conditions of boundary lubrication / A. A. Vaisman, Yu. N. Drozdov // Friction and wear. – 1985. – Vol. 6, No. 4. – P. 720–728.

16 **Quality certificate No. 25001701-OZSM** for TP-22C turbine oil / Gazpromneft-SM LLC, Omsk Lubricants Plant. – 2025. – 2 p.

M. S. Ignatov, O. Yu. Elagina

TRIBODIAGNOSTICS OF TP-22C TURBINE OIL

Abstract. The article presents the results of a study of the effect of various pollutants and thermo-oxidative aging on the dielectric constant and tribological properties of TP-22c turbine oil. It has been experimentally established that the introduction of contaminants such as 40X steel powder, quartz sand and water into the oil, as well as its aging process, lead to a statistically significant increase in dielectric constant and deterioration of antifriction characteristics – an increase in the friction coefficient and the diameter of the wear spot. A strong positive correlation was found between an increase in permittivity and an increase in the friction coefficient, which confirms the possibility of using permittivity measurement as an indirect method for rapid diagnosis of oil condition and predicting wear of friction units without complex tribological tests.

Keywords: tribodiagnostics, turbine oil, dielectric constant, coefficient of friction, wear spot, pollution, oil aging, condition monitoring.

For citation: Ignatov, M. S. Tribodiagnostics of TP-22c turbine oil / M. S. Ignatov, O. Yu. Elagina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 26–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_26.

Сведения об авторах

Игнатов Максим Сергеевич

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина ((РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина), кафедра «Трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования», аспирант, e-mail: maksig28@bk.ru

Елагина Оксана Юрьевна

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина ((РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина), кафедра «Трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования», доктор технических наук, профессор, e-mail: elaguina@mail.ru

Information about the authors

Ignatov Maxim Sergeevich

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Research University), Chair “Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment”, Postgraduate Student, e-mail: maksig28@bk.ru

Elagina Oksana Yurievna

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Research University), Chair “Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment”, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: elaguina@mail.ru

И. В. Колесников, Е. Д. Аникина, К. Н. Политыко, М. М. Четверик

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ Al_2O_3 В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ НА ЕГО ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА *

Аннотация. Рассмотрено влияние добавки Al_2O_3 в разном процентном отношении в базовую матрицу эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 на ее трибологические свойства. Анализ гранулометрического состава и химической структуры исследуемого порошка оксида алюминия выявил оптимальное соотношение для выбора добавки к базовой матрице ЭД-20. Трибологические испытания проводились на машине трения по схеме «ролик – колодка», что позволило точно зафиксировать влияние нагрузки и скорости скольжения на износ образцов. Проведенные трибологические исследования показали, что введение оксида алюминия в различных массовых долях (1, 3, 5 %) позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики эпоксидного композита, снижая коэффициент трения. Эти эффекты обусловлены формированием на поверхности трения трибопленок, обеспечивающих стабильность контактного воздействия нагрузки. Проведенным спектральным анализом выявлено образование вторичных структур в результате взаимодействия алюминия с эпоксидно-диановой смолой. Полученные данные подтверждают перспективность использования эпоксидных композитов в узлах трения машиностроительных конструкций.

Новизна работы состоит в установлении влияния процентного содержания добавки оксида алюминия в матрицу композиционного полимерного материала на величину коэффициента трения по результатам проведенных экспериментальных исследований. При процентном содержании наполнителя 1 и 3 % было выявлено снижение коэффициента трения на ~9 %. Также в работе проведена оценка влияния нагрузочно-скоростного режима на трибологические характеристики полимерного композиционного материала.

Ключевые слова: композиционный материал, эпоксидная смола, оксид алюминия, трибологические испытания, износостойкость.

Для цитирования: Влияние концентрации Al_2O_3 в полимерном композиционном материале на его трибологические свойства / И. В. Колесников, Е. Д. Аникина, К. Н. Политыко, М. М. Четверик // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 35–43. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_35.

Введение

В настоящее время полимерные композиты находят широкое применение в узлах трения различных отраслей промышленности. Современные исследования направлены на улучшение свойств эпоксидных композитов за счет наполнения их различными дисперсными и наноструктурными добавками, включая оксид алюминия, углеродные нанотрубки, базальтовое и стеклянное волокно [1–3]. Добавление наполнителей в матрицу полимера позволяет снизить коэффициент трения и повысить износостойкость разрабатываемого материала, что существенно увеличит его эксплуатационный ресурс и расширит диапазон условий его применения. Развитие технологии эпоксидных композитов связано не только с совершенствованием добавок, но и с внедрением современных методов переработки (вакуумная инфузия, автоклавное формование, RTM-процессы), а также с переходом к экологически безопасным и биоразлагаемым системам связующего.

В работе [4] рассмотрена возможность трибологического применения эпоксидных композитов, наполненных микрокапсулами со смазочным материалом И-40. В процессе трения происходит высвобождение инкапсулированного смазочного материала в области контакта, а образовавшиеся после разрушения капсул полости способствуют улавливанию частиц износа, что обеспечивает заметное снижение коэффициента трения и удельной скорости изнашивания. В работе [5] представлены два наполнителя с разной массовой долей: первичный наполнитель – карбид кремния 55 %, вторичный – дисульфид молибдена с содержанием 4 % по массе. Такая комбинация наполнителей обеспечивает оптимальный баланс антифрикционных и противоизносных свойств за счет синергетического эффекта между SiC и MoS_2 , что подтверждает снижение коэффициента трения. Следует отметить, что выбор оптимальной

* Исследование выполнено в рамках государственного задания ЮНЦ РАН, номер государственной регистрации проекта 125011200153-3.

доли модификатора базовой матрицы является ключевой проблемой. При решении задачи по улучшению трибологических свойств следует обращать внимание на армирующие наполнители для повышения износостойкости материалов [6].

В исследовании [7] были проведены испытания для оценки износостойкости нанокompозитов с Al_2O_3 и SiC на основе эпоксидной смолы по схеме «палец – кольцо». Результаты исследования показали, что введение наночастиц Al_2O_3 в эпоксидную матрицу приводит к более высокой износостойкости материала по сравнению с композитами, содержащими наночастицы SiC или их гибридное сочетание. Таким образом, проявления синергетического эффекта в повышении износостойкости эпоксидных композитов, модифицированных наночастицами, не наблюдалось.

Широкое применение эпоксидной смолы обусловлено сочетанием высокой прочностью, химической стойкости, хороших адгезионных свойств и универсальности применения эпоксидных связующих. Однако, несмотря на значительное внимание к данной группе материалов, вопросы оптимизации их состава для достижения повышенной износостойкости, термостабильности и механической прочности сохраняют актуальность. В этой связи важно получить экспериментальные зависимости ключевых параметров композиционного материала в зависимости от дисперсных модификаторов, обобщить их на основе математической модели с дальнейшим решением многомерных задач оптимизации. Целью настоящей работы является изучение влияния на трибологические свойства эпоксидной смолы модификации ее оксидом алюминия в разном соотношении (1, 3, 5 % м.д.) и выявление оптимального процентного содержания добавки Al_2O_3 .

Методика исследований

Матричным материалом была выбрана эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20. В качестве наполнителя был применен оксид алюминия Al_2O_3 , вводимый в различной массовой доле – 1, 3 и 5 %. Данное связующее выступает каркасом для повышения стойкости к износу. Для получения однородной структуры наполнитель добавлялся постепенно, в процессе непрерывного перемешивания композиции, что обеспечивало равномерное распределение частиц в объеме смолы.

Анализ размера и химический состав частиц проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) ZEISS EVO MA 18, оснащенного энергодисперсионным анализатором OXFORD X-Max 50. Программное обеспечение Aztec микроскопа позволило получить количественное представление о характерном виде вторичных структур на образце и их химическом составе.

Трибологические испытания проводились на модернизированной машине трения СМТ-1. Модернизация оборудования позволила повысить точность, информативность и воспроизводимость получаемых данных, а также проводить испытания различных материалов и покрытий при контролируемых нагрузках и скоростях скольжения (рис. 1). Испытания проводились по схеме «ролик – колодка», где контртелом выступает ролик $\varnothing 40$ мм из стали 38Х2МЮА. В ходе испытаний осуществлялся непрерывный контроль и регистрация момента трения. Параметры трибологического испытания образцов с разной ЭД-20 представлены в табл. 1.

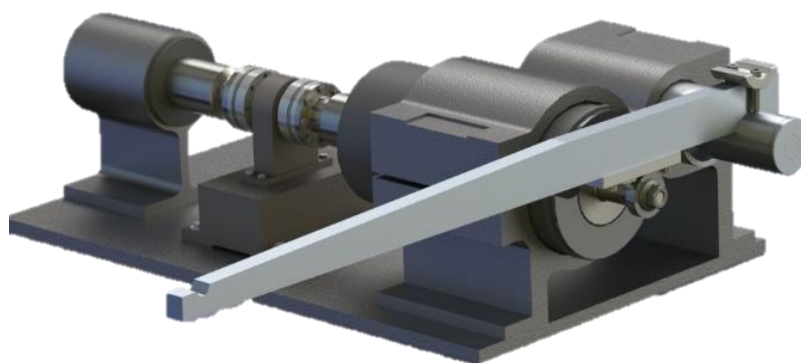


Рис. 1. Общий вид машины трения СМТ-1

Таблица 1

Параметры трибологического испытания

Наименование параметра	Значение параметра		
Нагрузка N , Н	50	125	200
Скорость скольжения V , м/с	0,05		
	0,125		
	0,2		
Пройденный путь, м	720		

Установление нагрузочно-скоростных характеристик осуществлялось в соответствии с матрицей ортогонального центрального композиционного плана второго порядка [8], варьируемыми факторами были определены: X_1 = нагрузка P (уровень варьирования: $50 \text{ Н} < X_1 < 200 \text{ Н}$), X_2 = линейная скорость V (уровень варьирования: $0,05 \text{ м/с} < X_2 < 0,2 \text{ м/с}$), и параметром оптимизации (откликом) Y = коэффициент трения. В качестве математической модели был принят полином второго порядка:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2. \quad (1)$$

Результаты исследований

Проведенный анализ гранулометрического состава и химической структуры исследуемого порошка показал, что частицы представляют собой соединение, основными элементами которого являются алюминий (около 49,8 %), кислород (приблизительно 39,1 %) и углерод (около 11,2 %). Указанное соотношение элементов согласуется с составом оксида алюминия Al_2O_3 , образующего прочную и термостойкую кристаллическую решетку. Размер частиц находится в диапазоне от 15 до 59 мкм, что соответствует типовым показателям для микродисперсных порошков технического оксида алюминия, широко применяемых в композиционных и трибологических материалах. Микроструктурный анализ показал, что поверхность частиц не имеет выраженной разветвленной структуры, преобладает гладкая морфология с тенденцией к образованию сферических или близких к изометрическим форм (рис. 2).

Такая форма способствует равномерному распределению наполнителя в полимерной матрице. Сферические частицы имеют меньшую удельную поверхность по сравнению с остроугольными, что снижает вероятность агломерации при смешивании и способствует формированию однородной структуры материала. Кроме того, повышенная плотность и твердость частиц Al_2O_3 , а также их химическая инертность обеспечивают повышение износостойкости и термостойкости получаемых композиционных систем.

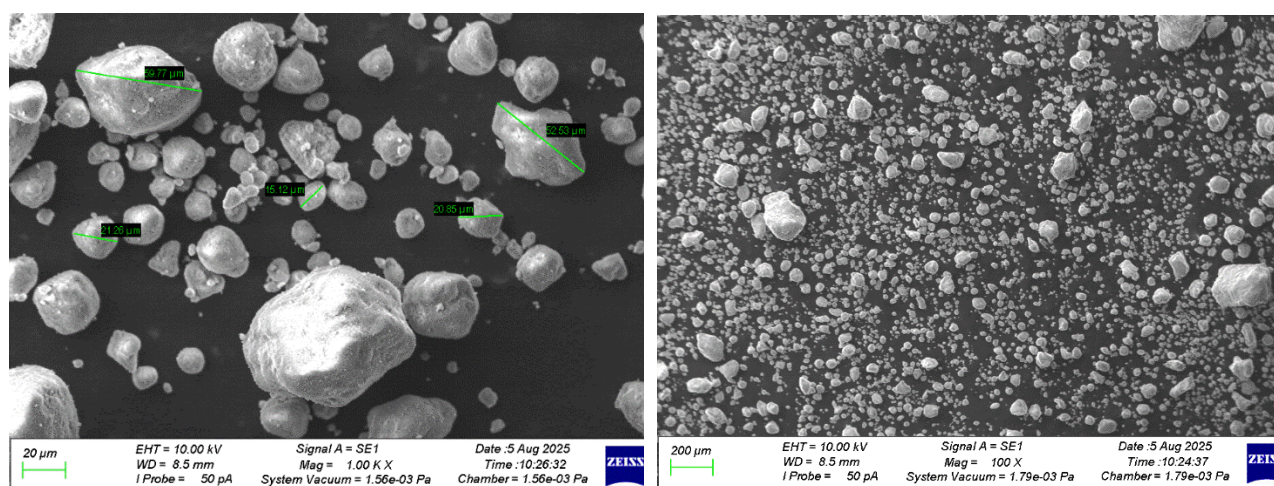


Рис. 2. Исследование дисперсности частиц Al_2O_3 с помощью СЭМ

Для определения нагрузочно-скоростных характеристик была построена матрица плана эксперимента, представленная в табл. 2, где содержатся средние значения дисперсии параллельных опытов и значения, рассчитанные на основании полученных математических моделей. Согласно плану были проведены девять режимных подходов. Проверка полученных значений дисперсии параллельных опытов осуществлялась на однородность по критерию Кохрена (G) (2):

$$G_p = \frac{s_{u\max}^2}{\sum_{u=1}^N s_u^2}, \quad (2)$$

где $s_{u\max}^2$ – наибольшее значение дисперсии параллельных опытов;

$\sum_{u=1}^N s_u^2$ – сумма дисперсий параллельных опытов.

Таблица 2

Матрица плана и результаты эксперимента для ЭД-20

№ опыта	Матрица планирования эксперимента			Выходные параметры оптимизации		
	X_0	X_1	X_2	\bar{Y}_u	$s_{Y_u}^2$	\hat{Y}_u
1	+1	-1	-1	0,695	1,40E-03	0,637
2	+1	+1	-1	0,729	3,67E-03	0,85
3	+1	-1	+1	0,647	2,36E-04	0,675
4	+1	+1	+1	0,664	1,36E-04	0,645
5	+1	-1	0	0,63	1,63E-03	0,68
6	+1	+1	0	0,769	5,00E-04	0,85
7	+1	0	-1	0,885	1,95E-03	0,93
8	+1	0	+1	0,757	5,88E-04	0,8
9	+1	0	0	0,85	3,90E-03	0,9

Полученное значение G_p сравнивали по табличным данным, соответствующим числу степеней свободы $f_1 = 2$ и $f_2 = 9$ при уровне значимости $A = 0,05$. Расчетное значение G_p меньше табличного $G_{\text{табл}}$: $0,2782 < 0,4775$. Данное неравенство позволяет сделать вывод, что дисперсии параллельных опытов однородные.

Далее были определены дисперсия воспроизводимости $s^2(M) = 1,56E-2$ и среднеквадратическая ошибка эксперимента $s(M) = 3,95E-2$.

По результатам трибологических испытаний было получено уравнение регрессии в кодовых значениях (3) и в натуральных значениях факторов (4):

$$Y = 0,813 + 0,0421 \cdot X_1 - 0,0404 \cdot X_2 - 0,0328 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,122 \cdot X_1^2; \quad (3)$$

$$\mu = 0,381 + 0,0067 \cdot X_1 + 0,189 \cdot X_2 - 0,00582 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,2 \cdot 10^{-5} \cdot X_1^2. \quad (4)$$

Полученное уравнение регрессии (3) было проверено на адекватность по критерию Фишера (F), при уровне значимости 0,95 уравнение адекватное.

Анализ полученного уравнения (3) позволяет сделать выводы о влиянии факторов X_1 (нагрузка P) и X_2 (скорость V) на Y (коэффициент трения μ). При оценке линейных коэффициентов видно, что при увеличении X_1 и X_2 происходит увеличение Y , так как коэффициент $b_1 > b_2$, что и указывает на рост Y . Квадратичный член X_1 снижает рост, но не отменяет его. Наибольший Y будет достигаться, если фактор X_1 принимает максимальное значение +1, а X_2 – минимальное: -1. Фактор X_2 является неоднозначным: при -1 слабо повышает Y , а при +1 резко снижает Y . В целом можно заключить, что увеличение X_2 не обеспечивает устойчивый рост Y . Резюмируя, можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на коэффициент трения оказывает влияние нагрузка.

По результатам полученной математической модели (4) выполнена геометрическая интерпретация влияния нагрузочно-скоростных условий эксплуатации на коэффициент трения образцов, представленная на рис. 3.

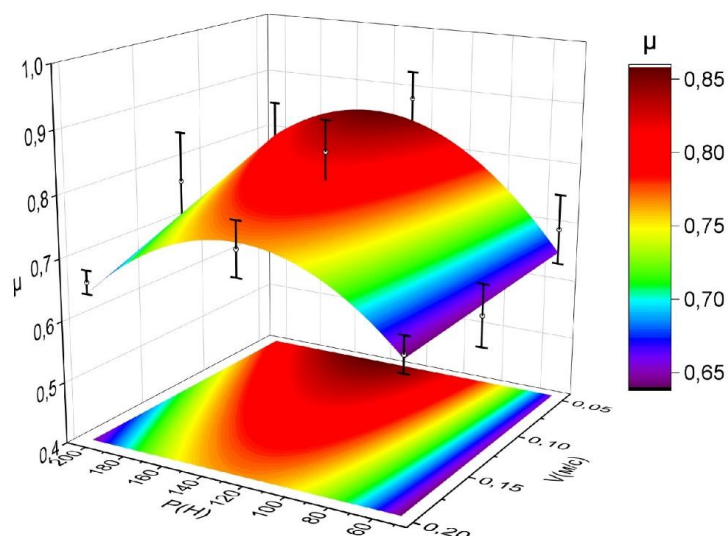


Рис. 3. Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию нагрузки P и скорости V на коэффициент трения μ

Для дальнейших исследований влияния добавок в полимерную матрицу на трибологические характеристики на основании уравнения регрессии были определены нагрузка 200 Н и скорость скольжения 0,2 м/с, данный режим соответствует нагруженному режиму и малому коэффициенту трения для матрицы.

На основании полученных экспериментальных данных построены гистограммы (рис. 4), характеризующие зависимость коэффициента трения от массовой доли (1, 3, 5 % м.д.) оксида алюминия в композиционном материале ЭД-20.

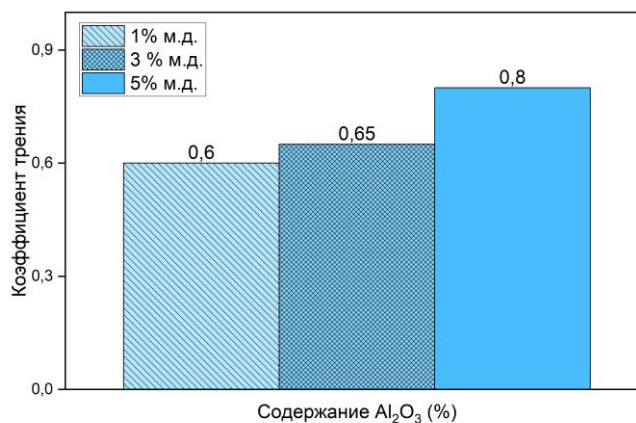


Рис. 4. Гистограмма изменения коэффициента трения в зависимости от массовой доли оксида алюминия (ЭД-20 + 1, 3, 5 % Al_2O_3)

Трибологические испытания на машине трения проводились под нагрузкой 200 Н при скорости скольжения 0,2 м/с. Стоит отметить, что у образцов с содержанием оксида алюминия 1 и 3 % наблюдаются идентичные коэффициенты трения 0,6 и 0,65, что не характерно для образца с массовой долей Al_2O_3 5 %, у которого коэффициент трения достигает 0,8. Данный факт указывает на то, что увеличение содержания оксида алюминия не оказывает существенного влияния на коэффициент трения.

Проведенный комплексный анализ морфологии и элементного состава поверхности дорожки трения показал, что базовая полимерная матрица на основе эпоксидно-диановой смолы в ходе трибологических испытаний подвергается образованию вторичных структур на поверхности контакта.

Выполненное исследование позволило показать, что взаимодействие эпоксидной смолы ЭД-20 и оксида алюминия ведет к образованию вторичных структур. На рис. 5 представлен элементный состав вторичных структур в зоне дорожки трения, а также электронный спектр, характеризующий распреде-

ление химических элементов в зоне контакта. Энергодисперсионный анализ показал наличие характерных пиков, соответствующих элементам – углероду (C), кислороду (O) и алюминию (Al), что указывает на протекание химического взаимодействия между смолой, наполнителем и контртелом в процессе фрикционного воздействия.

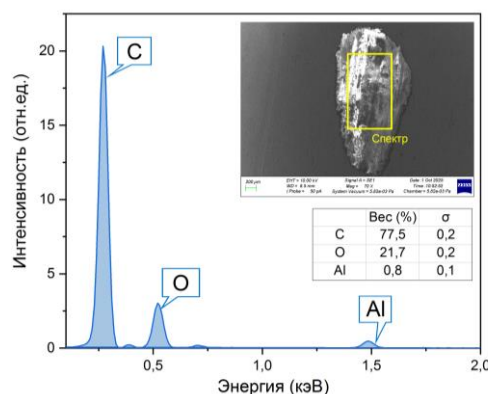


Рис. 5. Элементный состав вторичных структур в зоне дорожки трения

Спектральный пик алюминия в области ≈ 1486 эВ подтверждает перенос композиционного материала на подложку. Содержание алюминия демонстрирует усиление фрикционного воздействия, которое ведет к формированию вторичных трибопленок [9], способствующих повышению износостойкости материала при оптимальном содержании добавки.

Результаты испытаний показывают, что приработанные поверхности обладают уникальными свойствами, которые существенно усиливают эффективность работы трибосистем. Учет влияния этих процессов необходим для разработки более надежных технологий и материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Выводы

Добавление оксида алюминия Al_2O_3 в различной массовой доле оказывает выраженное влияние на трибологические характеристики эпоксидной матрицы ЭД-20. Проведенные исследования показали, что введение частиц Al_2O_3 способствует формированию более прочного трибослоя на поверхности трения и, как следствие, повышению сопротивления износу.

При содержании добавки на уровне 1 и 3 % м.д. наблюдается наибольшее улучшение эксплуатационных свойств материала – снижение коэффициента трения примерно на 9 %. Эти концентрации обеспечивают оптимальное соотношение между равномерностью распределения частиц в объеме матрицы. Однако при повышении массовой доли Al_2O_3 до 5 % отмечается тенденция повышения коэффициента трения до 0,8, что приводит к снижению трибологических характеристик. Это связано с соединением частиц наполнителя и образованием дефектных зон, приводящих к концентрации напряжений и локальному разрушению матрицы при трении. Следовательно, превышение выбранного оптимального количества наполнителя не усиливает, а, напротив, ослабляет антифрикционные и противоизносные свойства эпоксидного композита. Таким образом, эффект модифицирования системы ЭД-20 частицами Al_2O_3 носит нелинейный характер, и существует оптимальный диапазон концентрации добавки (1 и 3 %), при котором достигается улучшение трибологических свойств за счет снижения коэффициента трения.

Список литературы

- 1 Nano- Al_2O_3 obtained the best tribological properties than similar hardness nanoparticles filled into epoxy resin / J. Cui, Y. Tian, R. Li [et. al.] // Colloid and Polymer Science. – 2025. – Vol. 303. – P. 735–745. – DOI 10.1007/s00396-025-05383-x.
- 2 Investigation of the mechanical and tribological behavior of epoxy-based hybrid composite / T. Albahkali, A. Fouly, I. A. Alnaser [et. al.] // Polymer Analysis and Characterization, Special Issue : Mechanical Behavior of Polymeric Materials : Recent

References

- 1 Nano- Al_2O_3 obtained the best tribological properties than similar hardness nanoparticles filled into epoxy resin / J. Cui, Y. Tian, R. Li [et. al.] // Colloid and Polymer Science. – 2025. – Vol. 303. –P. 735–745. – DOI 10.1007/s00396-025-05383-x.
- 2 Investigation of the mechanical and tribological behavior of epoxy-based hybrid composite / T. Albahkali, A. Fouly, I. A. Alnaser [et. al.] // Polymer Analysis and Characterization, Special Issue : Mechanical Behavior of Polymeric Materials : Recent

Trends and Advancements –2023. – Vol. 15 (19). – Article no. 3880. – DOI 10.3390/polym15193880.

3 Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives / O. A. Belyak, T. V. Suvorova, D. S. Manturov, A. M. Ananko // Mechanics of Composite Materials. – 2025. – Vol. 61. – P. 257–268. – DOI 10.1007/s11029-025-10274-x.

4 Применение маслonaполненных микрокапсул для улучшения трибологических характеристик эпоксидных композитов / П. Г. Иваночкин, О. А. Беляк, А. А. Бичеров, А. М. Ананко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (92). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_8.

5 Preparation and Tribological Properties of Modified MoS₂/SiC/Epoxy Composites / C. Liu, M. Li, Q. Shen, H. Chen // Materials (Basel). – 2021, Apr 1. – Vol. 14 (7). – Article no. 1731. – DOI 10.3390/ma14071731.

6 Tribological Characterization of an Epoxy Composite Coating for Enhanced Wear Resistance in Oil Well Casing Applications / A. Bawagnih, N. Merah, F. Al-Badour [et al.] // Polymers (Basel). – 2025, Aug 11. – Vol. 17 (16). – Article no. 2192. – DOI 10.3390/polym17162192.

7 Tribological and mechanical properties of epoxy reinforced by hybrid nanoparticles / W. H. Alhazmi, Y. Jazaa, S. Mousa [et al.] // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2021. – Vol. 18 (03). – DOI 10.1590/1679-78256384.

8 **Евдокимов, Ю. А.** Программное сопровождение научно-исследовательских работ по триботехнике. Ч. 1 : Обработка экспериментальных данных методом планирования эксперимента / Ю. А. Евдокимов, В. В. Шаповалов, А. Л. Озябкин. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2003. – 122 с.

9 Исследование кинетики и механизма формирования вторичных структур модифицированной эпоксидной смолы / Д. С. Мантуров, П. Г. Иваночкин, А. И. Азоян, П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (88). – С. 41–51. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_41.

Trends and Advancements –2023. – Vol. 15 (19). – Article no. 3880. – DOI 10.3390/polym15193880.

3 Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives / O. A. Belyak, T. V. Suvorova, D. S. Manturov, A. M. Ananko // Mechanics of Composite Materials. – 2025. – Vol. 61. – P. 257–268. – DOI 10.1007/s11029-025-10274-x.

4 Application of oil-filled microcapsules to improve the tribological characteristics of epoxy composites / P. G. Ivanochkin, O. A. Belyak, A. A. Bicherov, A. M. Ananko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 4 (92). – P. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_8.

5 Preparation and Tribological Properties of Modified MoS₂/SiC/Epoxy Composites / C. Liu, M. Li, Q. Shen, H. Chen // Materials (Basel). – 2021, Apr 1. – Vol. 14 (7). – Article no. 1731. – DOI 10.3390/ma14071731.

6 Tribological Characterization of an Epoxy Composite Coating for Enhanced Wear Resistance in Oil Well Casing Applications / A. Bawagnih, N. Merah, F. Al-Badour [et al.] // Polymers (Basel). – 2025, Aug 11. – Vol. 17 (16). – Article no. 2192. – DOI 10.3390/polym17162192.

7 Tribological and mechanical properties of epoxy reinforced by hybrid nanoparticles / W. H. Alhazmi, Y. Jazaa, S. Mousa [et al.] // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2021. – Vol. 18 (03). – DOI 10.1590/1679-78256384.

8 **Evdokimov, Yu. A.** Software support for research in tribology. Part 1 : Processing experimental data using the experimental design method / Yu. A. Evdokimov, V. V. Shapovalov, A. L. Ozyabkin. – Rostov-on-Don : RSTU, 2003. – 122 p.

9 Research of the kinetics and mechanism of formation of secondary structures of modified epoxy resin / D. S. Manturov, P. G. Ivanochkin, A. I. Azoyan, P. V. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2022. – No. 4 (88). – P. 41–51. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_41.

I. V. Kolesnikov, E. D. Anikina, K. N. Polityko, M. M. Chetverik

INFLUENCE OF Al₂O₃ CONCENTRATION IN A POLYMER COMPOSITE MATERIAL ON ITS TRIBOLOGICAL PROPERTIES

Abstract. The effect of the adding Al₂O₃ at various percentages to the base matrix of ED-20 epoxy-diane resin on its tribological properties is considered. An analysis of the granulometric composition and chemical structure of the aluminum oxide powder under study revealed the optimal ratio for choosing an additive to the ED-20 base matrix. Tribological tests were carried out on a friction machine according to the “roller-pad” scheme, which made it possible to accurately record the effect of load and sliding speed on the wear of the samples. Tribological studies have shown that the addition of aluminum oxide in various mass fractions (1, 3, 5 %)

can significantly improve the performance of the epoxy composite, reducing the coefficient of friction. These effects are caused by the formation of tribofilms on the friction surface, which ensure the stability of the contact effect of the load. The spectral analysis revealed the formation of secondary structures as a result of the interaction of aluminum with epoxy-diane resin. The data obtained confirm the prospects of using epoxy composites in friction units of machine-building structures.

The novelty of the work is to establish the effect of the percentage of aluminum oxide additives in the matrix of a composite polymer material on the value of the coefficient of friction based on the results of experimental studies. With a percentage of filler of 1 and 3 %, a decrease in the coefficient of friction by ~9% was detected. The work also evaluates the effect of the load-speed regime on the tribological characteristics of the polymer composite material.

Keywords: composite material, epoxy resin, aluminum oxide, tribological tests, wear resistance.

For citation: Influence of Al_2O_3 concentration in a polymer composite material on its tribological properties / I. V. Kolesnikov, E. D. Anikina, K. N. Polityko, M. M. Chetverik // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 35–43. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_35.

Сведения об авторах

Колесников Игорь Владимирович

Федеральный исследовательский центр
«Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН),
лаборатория транспорта, композиционных материалов и конструкций,
ведущий научный сотрудник.

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
доктор технических наук,
член-корреспондент РАН,
ведущий научный сотрудник НИЧ,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Аникина Елена Дмитриевна

Федеральный исследовательский центр
«Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН),
лаборатория транспорта, композиционных материалов и конструкций,
младший научный сотрудник.

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
аспирант,
e-mail: al.anikina2002@mail.ru

Политыко Кирилл Николаевич

Федеральный исследовательский центр
«Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН),
лаборатория транспорта, композиционных материалов и конструкций,
младший научный сотрудник.

Information about the authors

Kolesnikov Igor Vladimirovich

Federal Research Center “Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (SSC RAS),
Laboratory of Transport,
Composite Materials and Structures,
Lead Researcher.

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Doctor of Engineering Sciences,
Corresponding Member of RAS,
Leading Researcher of the Research Department,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Anikina Elena Dmitrievna

Federal Research Center “Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (SSC RAS),
Laboratory of Transport,
Composite Materials and Structures,
Junior Researcher.

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Postgraduate Student,
e-mail: al.anikina2002@mail.ru

Polityko Kirill Nikolaevich

Federal Research Center “Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (SSC RAS),
Laboratory of Transport,
Composite Materials and Structures,
Junior Researcher.

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
аспирант,
e-mail: politykokirill@yandex.ru

Четверик Максим Максимович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
аспирант,
e-mail: chetverikm@mail.ru

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Postgraduate Student,
e-mail: politykokirill@yandex.ru

Chetverik Maksim Maksimovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Postgraduate Student,
e-mail: chetverikm@mail.ru

С. В. Кротов

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРЕССОВОГО СОЕДИНЕНИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ

Аннотация. Важнейшим показателем безопасной эксплуатации колесной пары вагона является прочность прессового соединения колеса и оси. В процессе и после монтажа колеса на ось обе детали соединения находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии вследствие наличия натяга и значительных усилий прессовой посадки.

После запрессовки колеса на ось в зоне сопряжения имеют место зоны скольжения, которые в процессе эксплуатации будут увеличиваться естественным путем вследствие значительных динамических нагрузок. В результате действия знакопеременного изгиба снижается площадь сцепления колеса и оси, возрастает напряженное состояние остаточной части соединения как ответ на увеличенную нагрузку к площади сцепления. Тенденция к росту осевой нагрузки наряду с повышением скорости составов повышает вероятность сдвига колеса с оси. Прямое же измерение зон скольжения в эксплуатации не представляется возможным.

Выполнено компьютерное моделирование колесной пары, анализ и оценка напряженно-деформированного состояния прессового соединения. Представленные исследования будут полезны для принятия решений о недопущении опасного состояния при взаимодействии колеса и оси в прессовом соединении.

Ключевые слова: прессовое соединение, метод конечных элементов, напряжения и деформации, скольжение и сцепление, несущая способность.

Для цитирования: Кротов, С. В. Напряженное состояние прессового соединения колесной пары / С. В. Кротов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 44–52. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_44.

Введение

Несущая способность прессового соединения как в осевом, так и в окружном направлениях определяется величинами контактного давления и коэффициента трения. Для определения контактного давления в основе теории лежит формула Ляме. При этом очевидно, что из двух деталей соединяемой пары ступица колеса имеет различную жесткость по длине сопряжения.

Коэффициент трения меняется в значительных пределах в зависимости от материала колеса и оси, шероховатости и физико-механического состояния поверхности, давления, качества запрессовки. Единого метода расчета коэффициентов трения не существует, и это не позволяет сопоставить результаты исследования и выявить влияние конструктивных и технологических факторов на несущую способность прессового соединения колесной пары.

В этом случае целесообразно выполнять расчеты в известных расчетных комплексах, позволяющих всевозможными способами менять условия сопряжения колеса и оси, выполнять расчеты при различных сочетаниях факторов, участвующих в процессе запрессовки колеса на ось.

В данном исследовании при использовании конечно-элементной модели колесной пары, применяемой в Российской Федерации, где основное внимание уделено прессовому соединению колеса и оси, рассматривается напряженно-деформированное состояние колесной пары, анализируются результаты с точки зрения несущей способности соединения.

Основная часть

Для анализа параметров напряженно-деформированного состояния прессового соединения колесной пары выполнен расчет модели колесной пары с современным диском А4 методом конечных элементов (рис. 1) в расчетном комплексе Ansys [1].

В исследуемых зонах колесной пары сетка конечных элементов не разбивается на мельчайшие элементы, чтобы повысить точность, однако в зоне контакта автором выполнено полное совпадение узлов и конечных элементов оси и колеса в зоне их соединения [2].

Количество узлов в модели 215662, количество элементов 82285 (использованы элементы типа SOLID186-187). Система имеет 633499 степеней свободы.

Установлена симметричная деформируемая контактная пара, идентифицируемая с помощью контактного элемента CONTA174. Сопутствующая пара имеет 1368 контактных элементов, из которых CONTA174 принадлежат внутренней поверхности ступицы, и столько же контактных элементов TARGET170 принадлежат подступичной части оси [3–6].

Необходимо обеспечить идентичное поведение обеих контактных пар. При этом система Ansys автоматически деактивирует активную пару и сохраняет связанную с ней пару, что формирует асимметричный контакт. Настройки контактного алгоритма: расширенный метод Лагранжа, интегрирование по Гауссу с целью обнаружения контакта, режим малого скольжения.

Ключевые параметры контакта

Базовая контактная жёсткость: 1,0

Итоговая начальная жёсткость: $5,4628 \cdot 10^{14}$

Допуск на проникновение (базовый): 0,1

Фактический допуск проникновения: 0,00073222

Максимальный коэффициент трения: 0,2 (установлен автором)

Базовая касательная жёсткость: 1,0 ()

Коэффициент упругого скольжения: 0,01

Максимальное напряжение трения: $1 \cdot 10^{20}$

Характеристики контактной области

Средняя длина контакта: 0,0060539

Средняя глубина контакта: 0,0073222

Площадь контакта: 0,0073222

Коэффициент зоны контакта: 1,0

Время решения составило более 40 мин

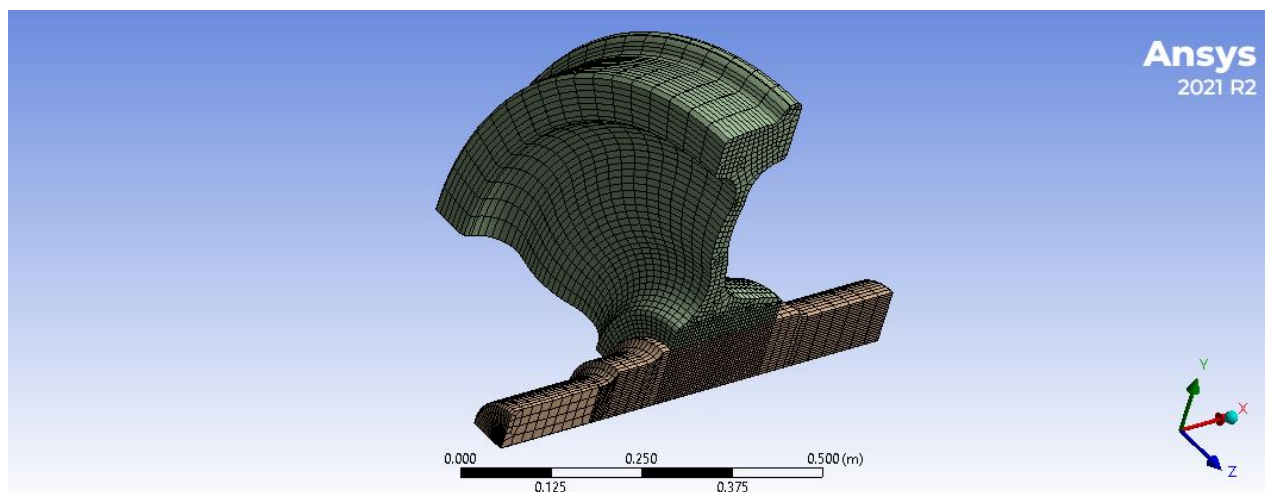


Рис. 1. Конечно-элементная сетка модели соединения колеса с осью

В этом нелинейном анализе по умолчанию используется полная процедура решения Ньютона – Рафсона [7].

В численном анализе метод Ньютона – Рафсона, также известный просто как метод Ньютона, представляет собой алгоритм поиска корней, который позволяет последовательно получать лучшие приближения к корням (или нулям) вещественнозначной функции. Самая простая версия начинается с вещественнозначной функции f , ее производной f' и начального значения x_0 для корня из f . Если f удовлетворяет определенным предположениям и первоначальное значение близко, то

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}.$$

Это лучшая аппроксимация корня x_0 . Графически $(x_1, 0)$ – это точка пересечения с осью x касательной к графику f в точке $(x_0, f(x_0))$, то есть улучшенное приближение x_1 является единственным корнем линейной аппроксимации f в исходной точке x_0 . Процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено точное значение:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}.$$

В данном случае в качестве такого значения принят результирующий допуск упругого скольжения, который составляет 0,60539E-04.

Цель метода – определение корня функции. Главная предпосылка состоит в том, чтобы иметь первоначальное значение корня, приблизить функцию по касательной к ней около этого значения, и далее это значение выступает в качестве последующего предположения о корне функции. Очевидно, новое значение ближе к корню функции, чем предыдущее, и метод повторяется.

На такие операции уходит значительное количество машинного времени, учитывая протяженный объемный контакт подступичной части оси и ступицы колеса, влияние оказывает густота конечно-элементной сетки в зоне контакта. При этом следует стремиться к разумной точности получаемых параметров, в противном случае время расчета задачи такого класса будет исчисляться часами. По нашему мнению, в этом случае густота сетки должна иметь размер конечного элемента в зоне контакта 0,1–0,05 линейного размера.

В данном исследовании модель области контакта колеса и оси была выполнена с помощью сетки, у которой размер элементов составляет 5 мм между точками контакта; в остальных зонах, где напряжения значительно меньше, а контактное давление отсутствует, густота сетки не имеет принципиального значения для данной проблемы. Для остальных элементов размер сетки был 10 мм и более, чтобы сократить время вычислений. Контактное взаимодействие между поверхностью ступицы колеса и поверхностью посадочного места колеса определялось с помощью алгоритма фрикционного контакта: поверхность ступицы колеса была целевым телом, а поверхность посадочного места колеса – контактирующим телом. При моделировании автором использована четверть модели геометрии с осевой симметрией для получения точного результата за счёт сокращения времени вычислений. Для правильного закрепления модели в пространстве использована опция Frictionless support, обеспечивающая закрепление фрагмента колесной пары со сторон сечений, торец части оси жестко закреплен (Fixed support).

Согласно теории расчета толстостенных цилиндров [8, 9], удельное давление на поверхности контакта связано с натягом зависимостью

$$p = \frac{n}{d \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right)};$$

$$C_1 = \frac{d^2 + d_1^2}{d^2 - d_1^2}, C_2 = \frac{d_2^2 + d^2}{d_2^2 - d^2}.$$

В формулах номинальный диаметр $d = 194$ мм; модули упругости материала оси и ступицы приняты одинаковыми $E_1 = E_2 = E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $d_1 = 0$ – если вал сплошной (ось), $d_2 = 290 (+3)$ мм, средний диаметр ступицы колеса с диском А4. Здесь $\mu_1 = \mu_2 = \mu = 0,3$ – это коэффициенты Пуассона материала оси и ступицы, которые приняты одинаковыми; $n = 0,2$ мм – величина натяга в соединении.

Вычислим коэффициенты:

$$C_1 = \frac{0,194^2 + 0}{0,194^2 - 0} = 1; \quad C_2 = \frac{0,293^2 + 0,194^2}{0,270^2 - 0,194^2} = \frac{0,123}{0,048} = 2,56.$$

Получим среднее контактное давление в прессовом соединении колеса с осью:

$$p = \frac{n}{d \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right)};$$

$$p = \frac{0,0002}{0,194 \left(\frac{1}{2 \cdot 10^{11}} + \frac{2,56}{2 \cdot 10^{11}} \right)} = 57 \cdot 10^6 \text{ МПа}.$$

Округлив значение, получим $P = 57$ МПа.

На рис. 2 показано среднее контактное давление по посадочной поверхности соединения колеса и оси. Разброс значений достаточно велик, и полученное значение несколько отличается от теоретического, полученного для идеальной пары «вал – втулка», без учета переменной жесткости ступицы колеса. Характерно падение контактного давления с уменьшением жесткости ступицы (синяя зона распределения) и резкий рост контактного давления снаружи ступицы.

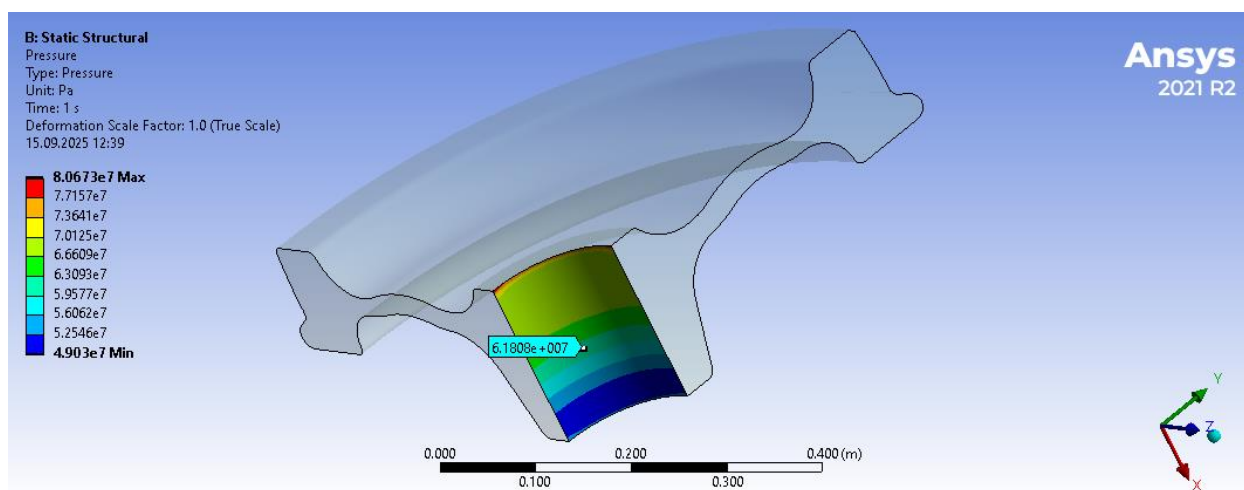


Рис. 2. Распределение контактного давления в прессовом соединении

Радиальные и окружные (тангенциальные) напряжения определяются зависимостями [9]:

$$\sigma_r = p \frac{1 - \left(\frac{d_2}{x}\right)^2}{\left(\frac{d_2}{x}\right)^2 - 1};$$

$$\sigma_t = p \frac{1 + \left(\frac{d_2}{x}\right)^2}{\left(\frac{d_2}{x}\right)^2 - 1}.$$

В этих формулах x – это диаметр, для которого определяется напряжение, в данном случае подставим номинальный диаметр $d = 194$ мм, то есть параметры определяются для посадочной поверхности колеса.

Тогда

$$\sigma_r = 57 \frac{1 - \left(\frac{0,293}{0,194}\right)^2}{\left(\frac{0,270}{0,194}\right)^2 - 1} = 57 \frac{-1,28}{1,28} = -57 \text{ МПа};$$

$$\sigma_t = 57 \frac{1 + \left(\frac{0,270}{0,194}\right)^2}{\left(\frac{0,270}{0,194}\right)^2 - 1} = 57 \frac{3,28}{1,28} = 146 \text{ МПа}.$$

Выполнена операция «Probe», то есть указано точечное значение радиальных напряжений – 59,7 МПа (рис. 3), тангенциальных напряжений 146,2 МПа (рис. 4), что весьма близко к теоретическим результатам. Средние аксиальные напряжения вдоль прессового соединения невелики и равны 12,5 Мпа (рис. 5).

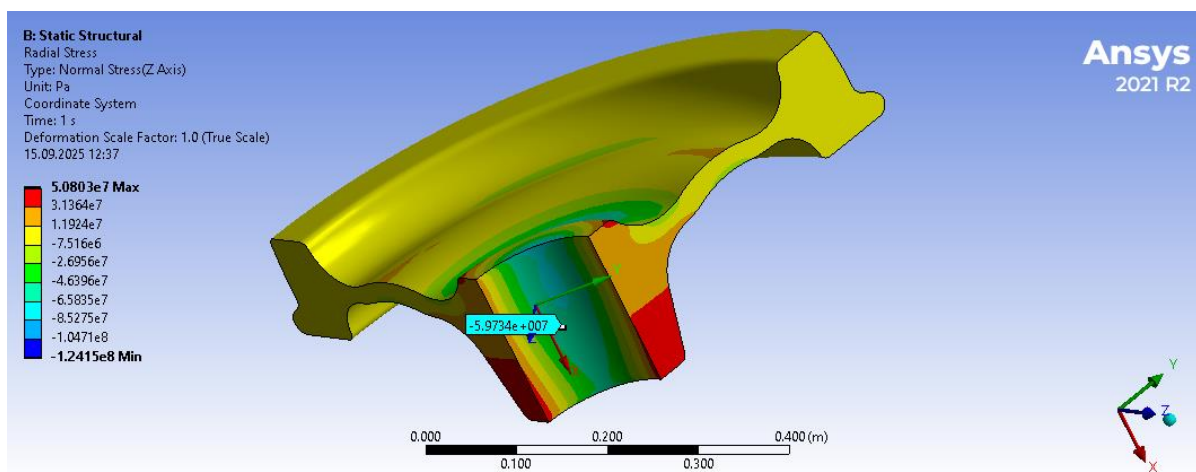


Рис. 3. Радиальные напряжения посадочной поверхности ступицы колеса

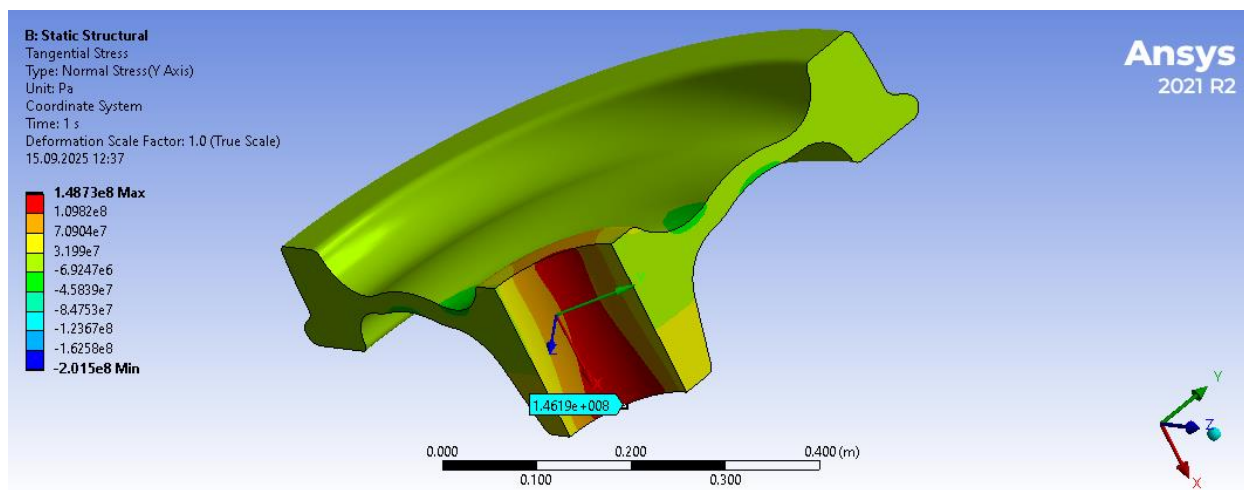


Рис. 4. Распределение тангенциальных (окружных) напряжений посадочной поверхности ступицы колеса

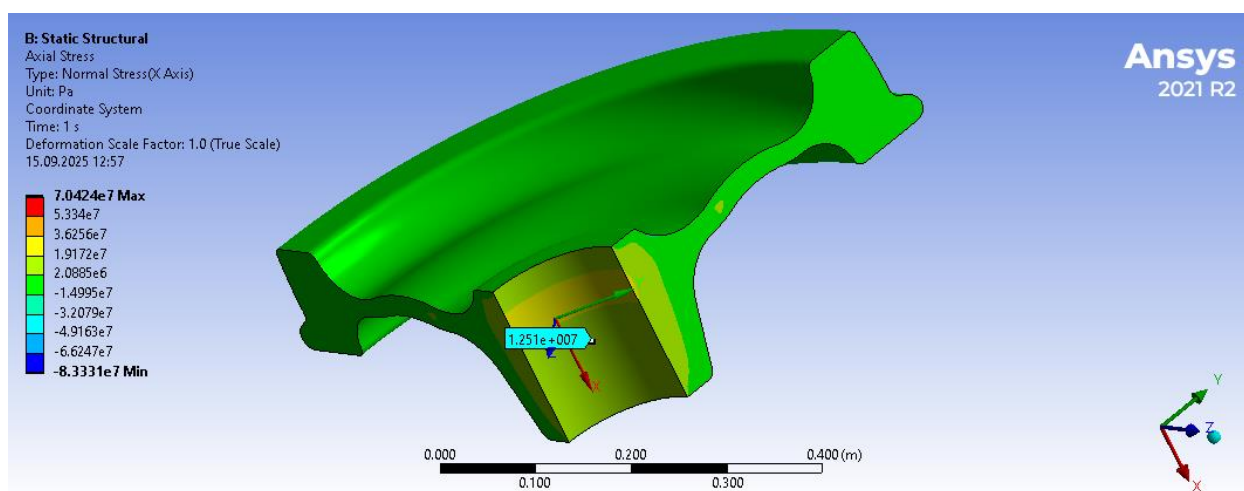


Рис. 5. Распределение аксиальных напряжений посадочной поверхности ступицы колеса

Эквивалентные напряжения по четвертой теории прочности [9]:

$$\sigma_{eqv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_t^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + \sigma_r^2}.$$

Тогда

$$\sigma_{eqv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{146^2 + (146 - (-57))^2 + 57^2} = 181 \text{ МПа}.$$

Эквивалентные напряжения показаны в крайних точках ступицы колеса (рис. 6), градиент напряжений по посадочной поверхности меняется незначительно; в среднем значения находятся в пределах 176–182 МПа, что близко к рассчитанным значениям по теории прочности.

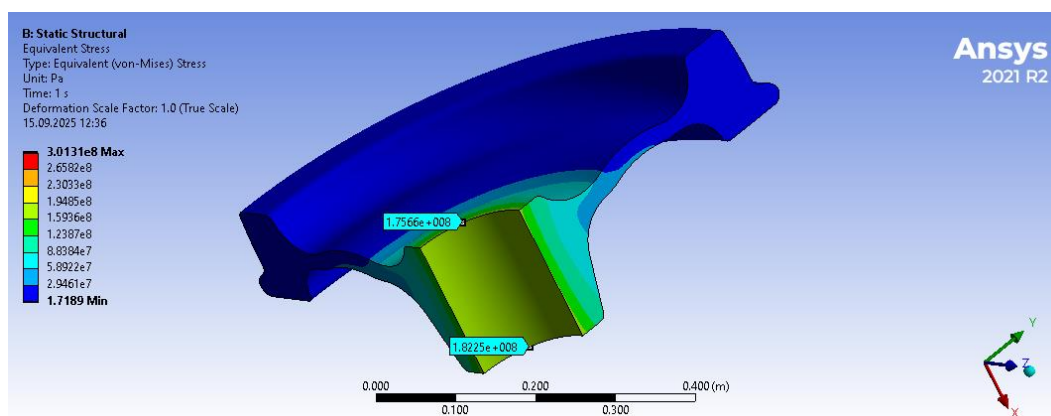


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений на посадочной поверхности ступицы колеса

Получены важные показатели несущей способности прессового соединения (рис. 7). Чем меньше площадь зон скольжения, тем соответственно больше зон сцепления и, следовательно, выше способность соединения передавать эксплуатационные нагрузки [10]. Однако, как показано на рис. 7, зоны скольжения присутствуют и без внешних нагрузок в соединении. Это распределение помогает понять сложность распределения скольжения в соединении. Она заключается в асимметрии и характерной концентрации скольжения на краях соединения.

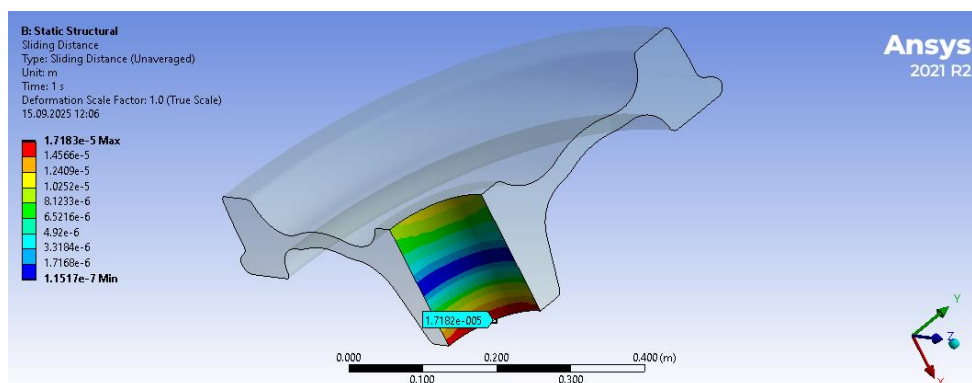


Рис. 7. Распределение скольжения на посадочной поверхности ступицы колеса

На рис. 8, 9 показаны параметры, не поддающиеся теоретическому расчету, тем более они не могут быть измерены (разве что при помощи рентгеновской установки, применение которой вряд ли возможно на транспорте для контроля соединения колесной пары). Между тем важность этих распределений подчеркивается тем, что напряжения трения (см. рис. 8) показывают величину и ареал распределения сцепления, за счет которого отсутствует скольжение в прессовом соединении [11, 12]. Распределение взаимного внедрения (см. рис. 9) частиц взаимодействующих тел несколько отличается от распределения контактного давления. Данное распределение имеет высокую ценность при учете шероховатости контактирующих поверхностей.

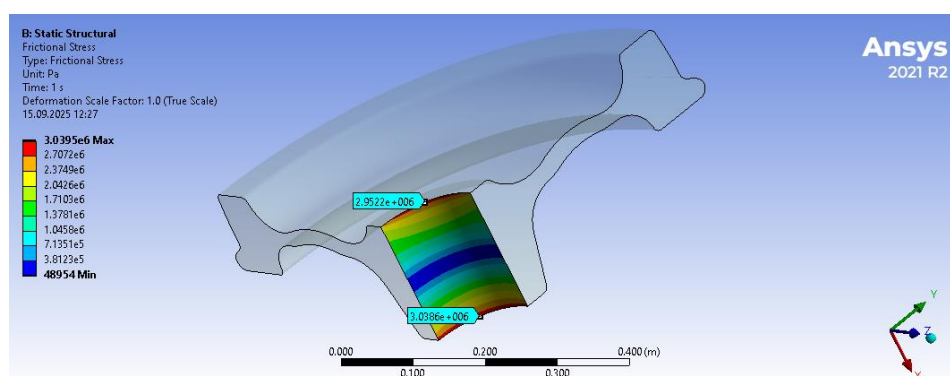


Рис. 8. Напряжения трения в соединении

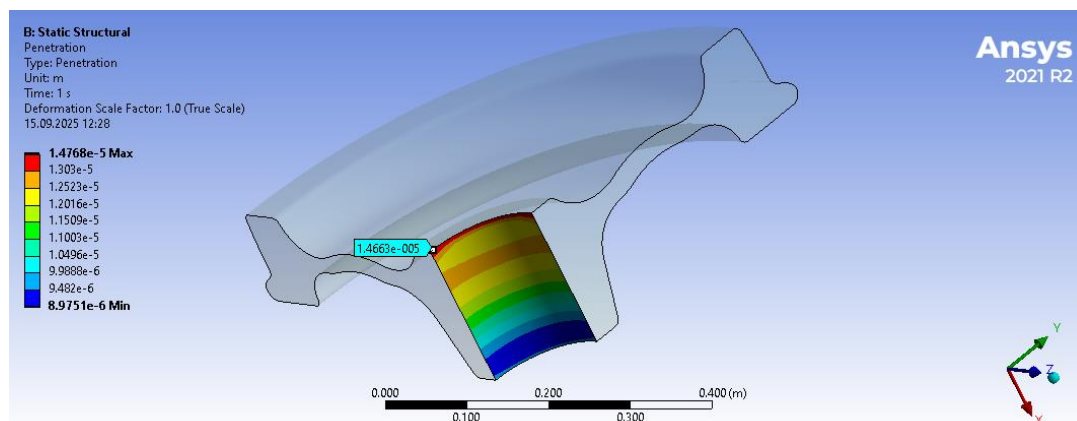


Рис. 9. Взаимное внедрение контактирующих элементов соединения

Выводы

В данном исследовании сравниваются результаты численного анализа с использованием инструмента МКЭ и аналитического расчета контактного давления на основе уравнения Ламе для двух цилиндров, а также напряжения по формулам теории упругости. Результаты хорошо согласуются с относительной погрешностью при наибольшем натяге (разнице диаметров), равном 0,2 мм. В целом это означает, что результаты расчетов взаимно дополняют друг друга, как теоретические, так и при помощи расчетного комплекса Ansys. Для анализа соединения колеса и оси эффективна теория Ламе для двух цилиндров. Вместе с тем весьма эффективен МКЭ в программе Ansys, позволяющий получить любые параметры напряженно-деформированного состояния ответственного элемента подвижного состава – колесной пары [13, 14].

При анализе результатов расчета по МКЭ видно, что контактное давление снижается с уменьшением величины жесткости ступицы. Это свидетельствует о том, что жесткость колеса и его симметричность будут оказывать непосредственное влияние при оценке срока службы запрессованных деталей. Численные результаты во всех случаях показывают более высокие значения, чем аналитические, это можно объяснить тем фактом, что колесо и ось рассматриваются как типичные цилиндрические поверхности, а также тем, что сборочные детали имеют сложную геометрию. Результаты показали, что тангенциальное напряжение, которое было самым высоким из трех основных напряжений, возникало на контактирующих поверхностях ступицы колеса.

Полученные распределения давления, скольжения, напряжений трения, взаимного внедрения несут новую информацию о состоянии прессового соединения. Распределение этих параметров неравномерно, концентрируется на краях прессового соединения, при этом скольжение достигает максимума в зоне снижения жесткости ступицы. Данное исследование выполнялось без нагрузки прессового соединения, которая в эксплуатации достигает высоких значений: это вертикальная и горизонтальная нагрузка, влияние температуры при торможении, удары, вибрации, попадание влаги и микрочастиц в соединение, рост напряжений в самом соединении при увеличении зон скольжения. Все эти факторы оказывают влияние на рост напряженного состояния в прессовом соединении.

Список литературы

- 1 **Кротов, С. В.** Исследование напряженно-деформированного состояния при контакте цилиндрических поверхностей деталей железнодорожного подвижного состава / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 1. – С. 33–47. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-33-47.
- 2 **Ekberg, A.** Fretting fatigue of railway axles – a review of prediction methods and a finite element model scheme / A. Ekberg // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,

References

- 1 **Krotov, S. V.** Study of stress-strain state during contact of cylindrical surfaces of railway rolling stock parts / S. V. Krotov, D. P. Kononov // Bulletin of scientific research results. – 2022. – No. 1. – P. 33–47. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-1-33-47.
- 2 **Ekberg, A.** Fretting fatigue of railway axles – a review of prediction methods and a finite element model scheme / A. Ekberg // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F :

Part F : Journal of Rail and Rapid Transit. – 2004, Vol. 218. – P. 299–316.

3 **Madej, J.** Analysis of Preloaded Joints / J. Madej, M. Slivka // Applied Science. – 2021. – No. 11. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/23/11428> (date of access: 23.08.2025).

4 **Paredes, M.** Study of the interference joint by finite element modeling, analysis and experiment / M. Paredes, N. Nefissi, M. Sartor // Interaction Guide. – No. 6. – 2012. – P. 171–177. – DOI 10.1007/s12008-012-0146-z.

5 **Liu, G.** Study on the Effect of Interference Fit on the Static and Dynamic Performance of Spindle System / G. Liu, J. Hong, W. Wu // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. – 2018. – No. 99. – P. 1953–1966. – DOI 10.1007/s00170-018-2567-8.

6 **Zhang, Y.** Design of Interference Fits via Finite Element Method : Iowa State University, September 1, 2000 / Y. Zhang, B. McClain, H. D. Fang // International Journal of Mechanics. – Vol. 42, Issue 9. – 1835 p. – URL: <https://scispace.com/papers/design-of-interference-fits-via-finite-element-method-2b8vg5hz69> (date of access: 23.08.2025).

7 **Kelly, K. T.** Solving Nonlinear Equations by Newton's Method / K. T. Kelly. – Philadelphia. – Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). – 2003. – 119 p. – (Fundamentals of Algorithms).

8 **Белавенцев, Н. В.** Формирование и ремонт колесных пар / Н. В. Белавенцев, В. И. Дергалев. – Москва : Трансжелдориздат, 1952. – 304 с.

9 **Гречищев, Е. С.** Соединения с натягом : расчеты, проектирование, изготовление / Е. С. Гречищев, А. А. Ильяшенко. – Москва : Машиностроение, 1981. – 247 с.

10 **Кротов, С. В.** Прогнозирование скольжения в прессовом соединении колесной пары вагона / С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. П. Буйносов // Транспорт Урала. – 2024. – № 2 (81). – С. 16–21. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-2-16-21.

11 **Кротов, С. В.** Влияние увеличения режимов нагружения на несущую способность прессового соединения колесной пары вагона / С. В. Кротов, В. П. Кротов // Вестник транспорта Поволжья. – 2010. – № 4 (24). – С. 32–36. – EDN NDYWWF.

12 **Krotov, S.** Application of the discriminant analysis in research of bearing ability of the wheel pair of the car / S. Krotov, V. Krotov // Transport Problems. – 2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 43–48. – EDN VATMRP.

Journal of Rail and Rapid Transit. – 2004, Vol. 218. – P. 299–316.

3 **Madej, J.** Analysis of Preloaded Joints / J. Madej, M. Slivka // Applied Science. – 2021. – No. 11. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/23/11428> (date of access: 23.08.2025).

4 **Paredes, M.** Study of the interference joint by finite element modeling, analysis and experiment / M. Paredes, N. Nefissi, M. Sartor // Interaction Guide. – No. 6. – 2012. – P. 171–177. – DOI 10.1007/s12008-012-0146-z.

5 **Liu, G.** Study on the Effect of Interference Fit on the Static and Dynamic Performance of Spindle System / G. Liu, J. Hong, W. Wu // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. – 2018. – No. 99. – P. 1953–1966. – DOI 10.1007/s00170-018-2567-8.

6 **Zhang, Y.** Design of Interference Fits via Finite Element Method : Iowa State University, September 1, 2000 / Y. Zhang, B. McClain, H. D. Fang // International Journal of Mechanics. – Vol. 42, Issue 9. – 1835 p. – URL: <https://scispace.com/papers/design-of-interference-fits-via-finite-element-method-2b8vg5hz69> (date of access: 23.08.2025).

7 **Kelly, K. T.** Solving Nonlinear Equations by Newton's Method / K. T. Kelly. – Philadelphia. – Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). – 2003. – 119 p. – (Fundamentals of Algorithms).

8 **Belaventsev, N. V.** Formation and repair of wheel pairs / N. V. Belaventsev, V. I. Dergalev. – Moscow : Transzheldorizdat, 1952. – 304 p.

9 **Grechishchev, E. S.** Tension joints : calculations, design, manufacturing / E. S. Grechishchev, A. A. Ilyashenko. – Moscow : Mashinostroenie, 1981. – 247 p.

10 **Krotov, S. V.** Prediction of slip in a pressed joint of a car wheel pair / S. V. Krotov, D. P. Kononov, A. P. Buynosov // Transport of the Urals. – 2024. – No. 2 (81). – P. 16–21. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-2-16-21.

11 **Krotov, S. V.** Effect of increasing loading modes on the bearing capacity of a pressed joint of a wagon wheelset / S. V. Krotov, V. P. Krotov // Vestnik transporta Povolzhya. – 2010. – No. 4 (24). – P. 32–36. – EDN NDYWWF.

12 **Krotov, S.** Application of the discriminant analysis in research of bearing ability of the wheel pair of the car / S. Krotov, V. Krotov // Transport Problems. – 2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 43–48. – EDN VATMRP.

13 **Кротов, С. В.** Классификация параметров несущей способности прессового соединения колесной пары железнодорожного транспортного средства / С. В. Кротов, В. П. Кротов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2007. – № 2 (26). – С. 22–28. – EDN NXQUGV.

14 **Кротов, В. П.** Напряженно-деформированное состояние колесной пары вагона при повышении режимов нагружения / В. П. Кротов, С. В. Кротов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2002. – № 2. – С. 36–39. – EDN JVXFVZ.

13 **Krotov, S. V.** Classification of parameters of the bearing capacity of a pressed joint of a wheelset of a railway vehicle / S. V. Krotov, V. P. Krotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2007. – No. 2 (26). – P. 22–28. – EDN NXQUGV.

14 **Krotov, V. P.** Stress-strain state of a wagon wheelset under increasing loading conditions / V. P. Krotov, S. V. Krotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2002. – No. 2. – P. 36–39. – EDN JVXFVZ.

S. V. Krotov

STRESS STATE OF A WHEELSET PRESS JOINT

Abstract. The most important indicator of the safe operation of a car wheelset is the strength of the press joint of the wheel and axle. During and after mounting the wheel on the axle, both parts of the joint are in a complex stress-strain state due to the presence of interference and significant forces of the press fit.

After pressing the wheel onto the axle, there are slip zones in the mating zone, which will naturally increase during operation due to significant dynamic loads. As a result, the adhesion area of the wheel and axle decreases and the stress state of the residual part of the joint increases as a response to the increased load on the adhesion area. Considering the tendency for the axle load to increase and the speed of the rolling stock to increase, this threatens to shift the wheel from the axle. Direct measurement of slip zones in operation is not possible.

This paper presents a computer simulation of the wheelset, analysis and assessment of the stress-strain state of the press joint. The presented research will be useful for making decisions on preventing a dangerous state during the interaction of a wheel and an axle in a press joint.

Keywords: press joint, finite element method, stresses and strains, slip and adhesion, load-bearing capacity.

For citation: Krotov, S. V. Stress state of a wheelset press joint / S. V. Krotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 44–52. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_44.

Сведения об авторах

Кротов Сергей Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Строительная механика», кандидат технических наук, доцент, e-mail: SVK-19587@yandex.ru

Information about the authors

Krotov Sergey Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Construction Mechanics”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: SVK-19587@yandex.ru

В. Н. Малышев, Д. Д. Матюшенко

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОЛИТА УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДО-ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Выполнено исследование влияния технологических параметров микродугового оксидирования (МДО), включающих модификацию базового электролита углеродными нанотрубками, на износостойкость и микротвердость формируемых покрытий. С использованием концепции многофакторного эксперимента изучались такие факторы, как плотность анодного тока, концентрация углеродных нанотрубок в электролите и марка алюминиевого сплава (Д16Т, В95). Испытания на износостойкость проводились по схеме трения «шар – плоскость» по стандарту ASTM G133-02, измерение микротвердости – по методу Виккерса. С помощью методов корреляционно-регрессионного анализа и в результате последующей проверки адекватности моделей по критерию Фишера было установлено, что введение в электролит небольшого количества углеродных нанотрубок и использование в качестве подложки сплава В95 при пониженной плотности тока позволяют повысить износостойкость и микротвердость МДО-покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, МДО-покрытие, углеродные нанотрубки, износостойкость, микротвердость, регрессионный анализ.

Для цитирования: Малышев, В. Н. Влияние модификации электролита углеродными нанотрубками на механические и триботехнические характеристики МДО-покрытий / В. Н. Малышев, Д. Д. Матюшенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 53–64. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_53.

Введение

Алюминиевые сплавы широко применяются в ответственных конструкциях авиационной, космической и автомобильной промышленности благодаря сочетанию высокой удельной прочности и низкой плотности [1]. Однако относительно низкие твердость и износостойкость алюминиевых сплавов ограничивают их использование в узлах трения, работающих в условиях значительных механических нагрузок. Для защиты от износа на поверхность алюминиевых сплавов наносят твердое диэлектрическое покрытие, например, методом микродугового оксидирования (МДО) [2, 3], позволяющее получать на поверхности алюминиевых сплавов твердые и износостойкие оксидные керамические покрытия [4], имеющие высокую устойчивость к термическому воздействию [5], а также хорошие тепло- и электроизоляционные свойства [6].

Свойства, состав и триботехнические характеристики МДО-покрытий определяются рядом условий, ключевыми среди которых являются: тип и плотность тока, химический состав и характеристики электролита, марка алюминиевого сплава, используемого в качестве подложки, температура электролита [7].

Наиболее гибким параметром является состав электролита. Помимо водорастворимых компонентов [8], в состав электролита могут вводиться нерастворимые дисперсные составляющие [9, 10]: карбиды, бориды, оксиды и другие соединения, их сочетание придает покрытию специальные свойства. В последние годы для модификации электролитов часто применяются наноразмерные нерастворимые добавки [11, 12]. В настоящее время научные исследования сконцентрированы на нескольких типах наномодификаторов. Среди них выделяются наночастицы оксидов, таких как диоксид циркония, оксид алюминия и диоксид титана, соединения в виде карбидов и нитридов, например, карбид кремния и нитрид бора, а также углеродные наноматериалы, включая наноалмазы, фуллерены, графен и углеродные нанотрубки (УНТ) [13–16]. Углеродные материалы представляют повышенный научный интерес ввиду их исключительных характеристик, куда входят высокие показатели механической прочности и твердости, а также способность образовывать новые фазовые составы на межфазных границах. Однако при повышении концентрации наночастиц в электролитной среде возможна их агломерация, что вызывает неоднородное включение частиц в структуру покрытия и, как следствие, уменьшение эффективности модифицирующего воздействия.

Целью данной работы является установление количественной взаимосвязи между основными технологическими факторами процесса МДО и такими функциональными свойствами покрытий, как износостойкость и микротвердость, с использованием методов математического планирования эксперимента.

Основная часть

Для всех экспериментов применялся базовый электролит, состоявший из следующих компонентов: щелочи (KOH) в концентрации 2 г/л, жидкого стекла ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ – 4 г/л) и гексаметафосфата натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ – 2 г/л), которые поэтапно растворялись в дистиллированной воде. В соответствии с планом эксперимента в электролит вводили УНТ в различных концентрациях. Нанотрубки были поставлены компанией «ОКСиАл.ру» (г. Новосибирск) в виде водной суспензии, содержащей 0,2 % УНТ TUBALL™.

Образцы для исследования износостойкости и микротвердости покрытий, сформированных методом микродугового оксидирования, были выполнены в виде дисков толщиной 8 мм и диаметром 24 мм из алюминиевых сплавов марок Д16Т (2024) и В95 (7075) ГОСТ 4784-97. Анализ химического состава проводился с использованием портативного рентгеновского анализатора DELTA Professional, элементный состав данных сплавов указан в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав алюминиевых сплавов, мас. %

Сплав	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Ti	Zn	Cr	Al
Д16Т	1,6	0,5	0,7	0,4	4,2	0,1	0,2	0,1	остальн
В95	2,2	0,5	0,4	0,3	1,7	0,05	6	0,15	остальн

Покрытия на образцах формировали с применением конденсаторного источника питания напряжением 380 В в анодно-катодном режиме микродугового оксидирования. Электролит готовили в ванне из нержавеющей стали с рубашкой охлаждения проточной водой объемом 8 л. После завершения процесса МДО производилось механическое удаление верхнего технологического слоя, поскольку он имеет высокую пористость и пониженные механические характеристики, путем притирки образцов на чугунной плите с использованием алмазной пасты и уайт-спирита [17].

Испытания на износостойкость по схеме трения «шар – плоскость» выполнялись на машине SRV HRFW160. В качестве контртела использовался шарик из стали марки ШХ15 диаметром 10 мм. Параметры испытаний составляли: частота 50 Гц, нагрузка 50 Н, продолжительность 120 с. После проведения испытаний величина износа определялась на профилографах-профилометрах – 3D-оптическом Sensofar S neox и профилографе MarSurf GD 120 фирмы Maht. Интенсивность изнашивания I_h рассчитывалась по формуле [18]:

$$I_h = \frac{U}{L}, \quad (1)$$

где U – линейный износ МДО-покрытия, мкм; L – путь трения при возвратно-поступательном движении, составивший за время испытания в совокупности 12 м.

Примеры полученных 3D-изображений изношенных поверхностей и профилограмм для определения износа представлены на рис. 1 и 2.

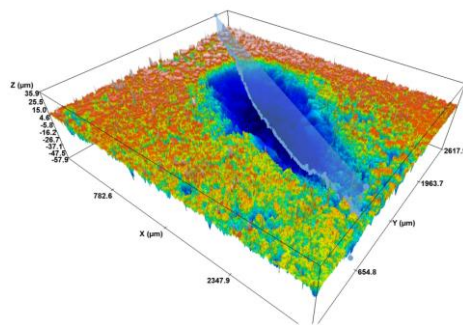
Для определения микротвердости предварительно были подготовлены шлифы торцов образцов. Анализ проводился на микротвердомере DuraScan 20. Вычисления микротвердости проводили по формуле

$$\text{HV}_{0,1} = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (2)$$

где P – приложенная нагрузка, кгс; d – среднее значение диагоналей отпечатка, измеренное с помощью микроскопа, мм.

Измерения микротвердости выполнялись в трёх различных участках: у кромки покрытия (внешний слой), в его центральной зоне (основной слой) и на участке прилегания к основному материалу (переходная зона).

а



б

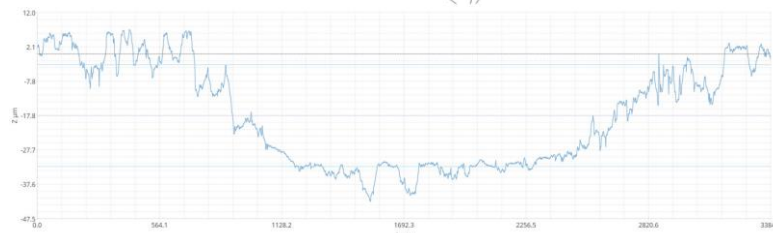


Рис. 1. Вид изношенной поверхности образца (а) и ее профилограмма (б) после испытания (получены на приборе Sensofar S neox)

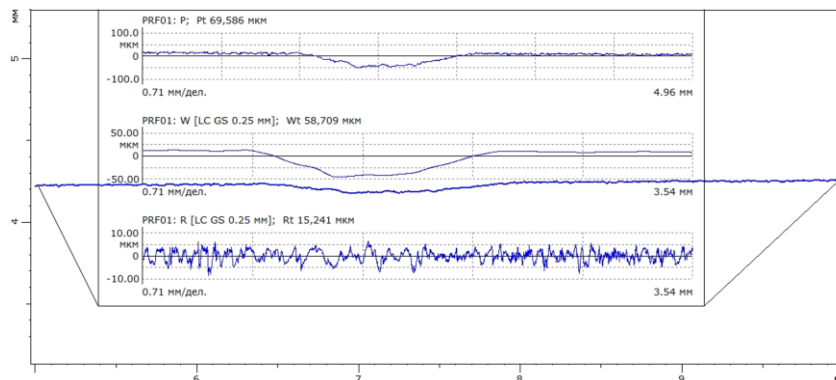


Рис. 2. Профилограммы дорожки трения образца после испытания для оценки износа (получены на приборе MarSurf GD 120 фирмы Mahr)

Полный факторный эксперимент. Как уже отмечалось, характеристики МДО-покрытий определяются множеством факторов, однако выбором специальных условий эксперимента большинство из них было исключено. Для дальнейшего исследования в качестве основных управляемых переменных рассматривались три фактора: X_1 – плотность анодного тока, А/дм²; X_2 – концентрация наночастиц в базовом электролите (УНТ), мл/л; X_3 – материал подложки (Д16Т или В95). Рандомизация процедуры экспериментов позволила нивелировать влияние неучтенных случайных факторов [19].

На основании априорных данных о процессе микродугового окислирования [8, 9, 17] для каждого фактора были установлены нулевой уровень и два уровня варьирования – верхний (+1) и нижний (–1), выбраны интервалы варьирования факторов, которые приведены в табл. 2. Для испытаний выбрали полный факторный эксперимент вида 2^3 при одновременном контролируемом изменении трех факторов в предположении, что в границах выбранных интервалов зависимость отклика носит преимущественно линейный характер.

Таблица 2

Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Уровни факторов (X_i)			Интервалы варьирования ΔX_i
	–1	0	+1	
X_1 – плотность анодного тока, А/дм ²	10	15	20	5
X_2 – концентрация наночастиц в базовом электролите, мл/л	5	10	15	5
X_3 – материал подложки образца	Д16Т	Д16Т, В95	В95	–

В данной работе функции отклика, выраженные величинами интенсивности изнашивания и микротвердости покрытия, описывались уравнением вида [20]:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{23}X_2X_3 + b_{13}X_1X_3 + b_{123}X_1X_2X_3, \quad (3)$$

где $b_0 \dots b_{123}$ – выборочные коэффициенты уравнения регрессии.

Кодированные значения верхнего и нижнего уровней факторов определяли по формуле

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}. \quad (4)$$

В соответствии с программой исследований была разработана матрица планирования (табл. 3), которая содержала восемь различных сочетаний основных факторов и учитывала воздействие их комбинаций на целевые функции. Образцы с номерами 9 и 10 представляли собой контрольные варианты, полученные при нулевых уровнях факторов на соответствующих материалах подложки.

Таблица 3

Полный факторный эксперимент 2^3 для испытания на интенсивность изнашивания и микротвердость

№ образца	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_2X_3	X_1X_3	$X_1X_2X_3$	Y_i	$Y_1 = I_h \cdot 10^{-6}$	$Y_2 = HV_{0,1}$
1	+	-	-	+	+	-	-	+	Y_1	1,722	1905
2	+	+	-	-	-	+	-	+	Y_2	3,944	1064
3	+	-	+	-	-	-	+	+	Y_3	3,056	1064
4	+	+	+	+	+	+	+	+	Y_4	4,167	898
5	+	-	-	-	+	+	+	-	Y_5	1,972	1767
6	+	+	-	+	-	-	+	-	Y_6	3,889	978
7	+	-	+	+	-	+	-	-	Y_7	2,306	1321
8	+	+	+	-	+	-	-	-	Y_8	3,750	596
9				Д16Т						2,444	1905
10				В95						2,500	1064

Расчет коэффициентов уравнения регрессии проводился по формулам [20, 21]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N Y_u X_{iu}}{N}, \quad (5)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, k$ – номер фактора; Y_u – средний отклик по r опытам в точке с номером u :

$$Y_u = \frac{\sum_{j=1}^r Y_{uj}}{r}. \quad (6)$$

Интенсивность изнашивания. На основании экспериментальных данных по износу испытанных образцов вычислялись значения интенсивности изнашивания I_h на пути трения 12,0 м. Расчет проводился по формуле (1) [18] на основании данных по износу как минимум по двум испытаниям в каждом из опытов. Полученные численные значения средней величины данной целевой функции $Y_1 = I_h \cdot 10^{-6}$ приведены в табл. 3, а графическое представление на рис. 3.

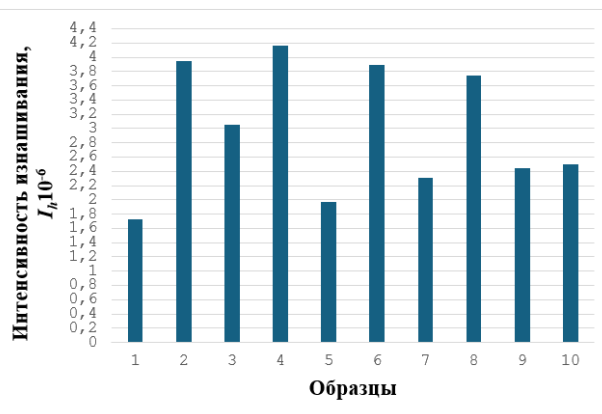


Рис. 3. Гистограмма интенсивности изнашивания образцов, сформированных в соответствии с планом эксперимента 2^3

Для установления количественной связи между основными факторами, их взаимодействием и величиной интенсивности изнашивания выполнялся корреляционно-регрессионный анализ с уровнем надежности 95 %. Оценку влияния факторов (и их взаимодействий) осуществляли на основе корреляции данных (табл. 4). Анализ показал отсутствие мультиколлинеарности между переменными. При решении данной задачи последствия пропуска статистически значимой зависимости (ошибки второго рода) были признаны более существенными, чем фиксация ложной корреляции (ошибки первого рода), поскольку последняя может быть исключена в процессе дальнейшей проверки. В связи с этим для повышения мощности статистического критерия уровень значимости был установлен на отметке $\pm 0,16$. Было установлено, что факторы X_3 , X_2X_3 и $X_1X_2X_3$ оказывают малое воздействие на целевую функцию Y ввиду незначительности их коэффициентов, в связи с чем они были исключены из последующих расчетов.

Таблица 4

Корреляция данных для интенсивности изнашивания

Факторы	Y	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_2X_3	X_1X_3	$X_1X_2X_3$
Y	1								
X_0	-	1							
X_1	0,914461	-	1						
X_2	0,23905	-	0	1					
X_3	-0,08727	-	0	0	1				
X_1X_2	-0,21628	-	0	0	0	1			
X_2X_3	-0,00379	-	0	0	0	0	1		
X_1X_3	0,185928	-	0	0	0	0	0	1	
$X_1X_2X_3$	0,132806	-	0	0	0	0	0	0	1

На основании вышесказанного из математической модели (3) были исключены следующие слабые: X_3 , X_2X_3 и $X_1X_2X_3$. В результате уравнение регрессии было преобразовано к виду

$$\bar{Y}_1 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3. \quad (7)$$

Расчет коэффициентов регрессионного уравнения, выполненный по формулам (5) и (6), показал следующие результаты: $b_0 = 3,1$; $b_1 = 0,837$; $b_2 = 0,219$; $b_{12} = -0,198$; $b_{13} = 0,17$.

Оценка статистической значимости коэффициентов регрессионного уравнения осуществлялась с применением t -критерия Стьюдента [19, 21] с оценкой доверительного интервала Δb_i при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по формуле

$$\Delta b_i = \pm \frac{t_{\alpha=0,05} \sqrt{S_{(i)}^2}}{\sqrt{N}}, \quad (8)$$

где t_α – табличное значение критерия Стьюдента, которое находят по числу степеней свободы $f = N(m-1)$ и уровню значимости α ; $S_{(i)}^2$ – дисперсия воспроизводимости (для 8 опытов $t_\alpha = 2,31$ [21]).

При выполнении условия

$$|b_i| > |\Delta b_i| \quad (9)$$

рассчитанный коэффициент (b_i) для каждого фактора является статистически значимым в данном регрессионном уравнении. Определенное по формуле (8) значение доверительного интервала $\Delta b_i = \pm 0,139$ свидетельствует о том, что все коэффициенты при переменных в уравнении (7) имеют статистическую значимость.

На основе уравнения (7) были получены расчетные величины интенсивности изнашивания ($Y_{\text{расч}} = \bar{Y}_1$) для каждого образца. Затем вычислены процентные отклонения расчетных значений от экспериментальных данных, которые приведены в табл. 5.

Сопоставление экспериментальных значений целевой функции Y_1 с расчетными данными \bar{Y}_1 показало, что средняя погрешность модели составляет 4,07 % при максимальном отклонении 8,89 %. Для оценки статистической значимости регрессионной модели был вычислен нормированный R^2 , значение которого равно 94 %.

Таблица 5

**Множественная линейная регрессия со значимыми факторами
для оценки интенсивности изнашивания**

№ образца	X_1	X_2	X_1X_2	X_1X_3	$Y_1, 10^{-6}$	$\bar{Y}_1, 10^{-6}$	Ошибка, %
1	-1	-1	1	-1	1,722	1,677	2,62
2	1	-1	-1	-1	3,944	3,747	5,02
3	-1	1	-1	1	3,055	2,851	6,70
4	1	1	1	1	4,166	4,128	0,92
5	-1	-1	1	1	1,972	2,017	2,29
6	1	-1	-1	1	3,888	4,087	5,09
7	-1	1	-1	-1	2,305	2,510	8,89
8	1	1	1	-1	3,75	3,788	1,02

Таким образом, окончательная форма регрессионного уравнения выразилась в виде

$$\bar{Y}_1 = 3,1 + 0,837X_1 + 0,219X_2 - 0,198X_1X_2 + 0,17X_1X_3. \quad (10)$$

Верификация адекватности регрессионного уравнения проводилась с использованием F -критерия Фишера. Уравнение (10) считается статистически адекватным экспериментальным данным при заданной доверительной вероятности 95 %, если выполняется условие $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$. Табличное значение критерия составило $F_{\text{табл}} = 9,12$ [22].

Расчетное значение $F_{\text{расч}}$ вычислялось по формуле

$$F_{\text{расч}} = \frac{\sum(Y_{i,\text{расч}} - \bar{Y}_{\text{расч}})^2}{m} \times \frac{n-m-1}{\sum(Y_i - Y_{i,\text{расч}})^2} \quad (11)$$

где m – количество факторных переменных X_i , оказывающих влияние на результирующий показатель Y ($m = 4$); n – число проведенных экспериментов ($n = 8$).

В результате вычислений по формуле (11) было получено значение $F_{\text{расч}} = 28,93$. Поскольку данное значение превышает табличный показатель $F_{\text{табл}}$, регрессионная модель с доверительной вероятностью 95 % признается адекватной экспериментальным данным.

Анализ регрессионного уравнения (10) позволяет сделать следующие выводы. Коэффициенты уравнения показывают, что факторы оказывают разнонаправленное воздействие на параметр Y_1 .

Наибольшее прямое влияние на увеличение интенсивности изнашивания оказывает плотность анодного тока (X_1), коэффициент перед которым составляет $b_1 = +0,837$. Это означает, что увеличение данного технологического параметра в исследованном диапазоне ведет к существенному возрастанию интенсивности износа. По всей видимости, это связано с кинетикой формирования оксидного слоя. Высокая плотность тока интенсифицирует процессы электрохимического и термического окисления, что вызывает формирование пористой микроструктуры с повышенной дефектностью. Быстрое тепловыделение способствует росту слоя с внутренними напряжениями и пониженной когезионной прочностью, что ухудшает его трибологические характеристики. Концентрация нанотрубок (X_2) в отдельности также увеличивает интенсивность изнашивания, но ее влияние слабее, о чем говорит коэффициент $b_2 = +0,219$. Незначительное прямое воздействие концентрации нанотрубок (X_2) на увеличение износа, вероятно, обусловлено их склонностью к агломерации в электролитной среде при повышенном содержании. Крупные частичные скопления могут внедряться в оксидный слой не в качестве упрочняющих компонентов, а как структурные неоднородности, нарушающие целостность покрытия и инициирующие образование трещин.

Существенное значение имеют эффекты взаимодействия факторов. Совместное влияние плотности тока и концентрации нанотрубок (X_1X_2) является отрицательным, коэффициент составляет $b_{12} = -0,198$. Данный синергетический эффект снижает интенсивность изнашивания, что указывает на возможность оптимизации процесса. При определенных комбинациях уровней этих двух факторов негативное влияние каждого из них в отдельности может быть компенсировано.

Взаимодействие плотности тока и материала подложки (X_1X_3) имеет незначительный, но положительный коэффициент $b_{13} = +0,17$, что свидетельствует об эффекте изменения плотности тока и типа используемого сплава. При переходе от сплава Д16Т к сплаву В95 совместное влияние с плотностью

тока приводит к дополнительному увеличению износа. Следовательно, сплав Д16Т в условиях взаимодействия с плотностью тока демонстрирует лучшую устойчивость к изнашиванию по сравнению со сплавом В95.

Свободный член уравнения $b_0 = +3,1$ представляет собой расчетный уровень интенсивности изнашивания при нулевых значениях всех факторов в центре плана эксперимента.

Микротвердость. Полученные данные по микротвердости в различных частях покрытия представлены в табл. 6, численные значения микротвердости, выбранные для анализа, представлены в последнем столбце табл. 3. На рис. 4 показано изменение микротвердости сформированных покрытий в зависимости от расстояния от границы раздела с материалом подложки. В соответствии с ранними исследованиями [23] распределение микротвердости по толщине МДО-покрытия происходит таким образом, что наибольшие значения микротвердости располагаются в диапазоне 10–40 мкм от границы раздела с подложкой (см. рис. 4), которые и были выбраны в качестве значений, использованных для анализа.

Таблица 6

Значения микротвердости образцов

№ образца	На границе с подложкой, HV _{0,1}	Середина покрытия, HV _{0,1}	Поверхность покрытия, HV _{0,1}	Анализируемые значения, HV _{0,1}
1	2086	1724	1448	1905
2	1064	1064	578	1064
3	1064	1064	1234	1064
4	927	868	1234	898
5	1448	2086	1724	1767
6	722	1234	1448	978
7	1064	1577	1234	1321
8	644	548	644	596
9	1448	1234	1448	1341
10	1448	1448	1448	1448

Согласно данным, представленным в табл. 6 и на рис. 4, наибольшие значения средней микротвердости соответствуют образцам с номерами 1 и 5.

Для определения статистической зависимости между ключевыми факторами, их взаимодействием и микротвердостью был проведен корреляционно-регрессионный анализ при 95 % уровне надежности.

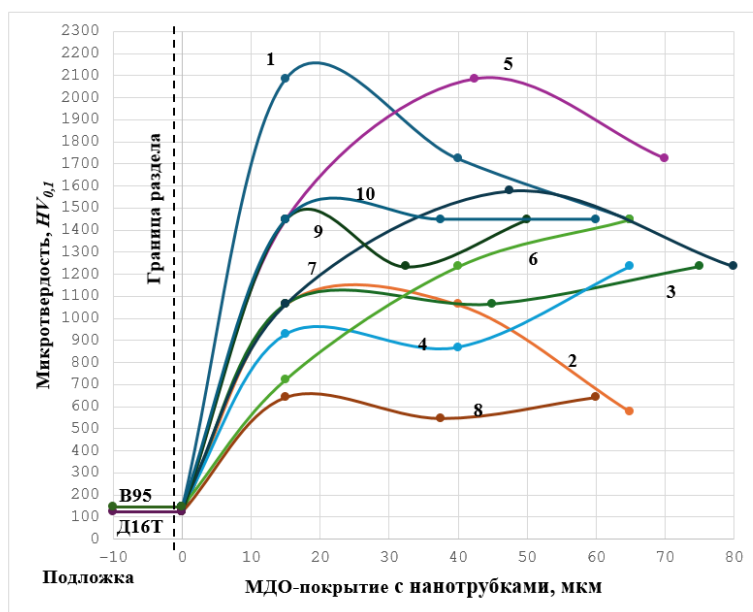


Рис. 4. Изменение микротвердости (HV_{0,1}) МДО-покрытий, сформированных по плану эксперимента, в зависимости от расстояния от границы с подложкой

Анализ корреляционной матрицы (табл. 7) выявил отсутствие мультиколлинеарности между переменными. Уровень значимости был установлен на уровне $\pm 0,16$. Установлено, что факторы взаимодействия X_2X_3 , X_1X_3 , $X_1X_2X_3$ оказывают статистически незначимое влияние на целевую функцию Y вследствие малой величины их коэффициентов, что послужило основанием для их исключения из дальнейшего рассмотрения.

С учетом проведенного анализа из регрессионной модели (3) были удалены статистически незначимые члены: X_2X_3 , X_1X_3 , $X_1X_2X_3$.

Таблица 7

Корреляция данных для микротвердости

Факторы	Y	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_2X_3	X_1X_3	$X_1X_2X_3$
Y	1								
X_0	-	1							
X_1	-0,75994	-	1						
X_2	-0,55345	-	0	1					
X_3	0,18388	-	0	0	1				
X_1X_2	0,22277	-	0	0	0	1			
X_2X_3	0,15253	-	0	0	0	0	1		
X_1X_3	-0,05396	-	0	0	0	0	0	1	
$X_1X_2X_3$	0,08109	-	0	0	0	0	0	0	1

После исключения указанных переменных уравнение регрессии приняло форму

$$\bar{Y}_2 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2. \quad (12)$$

В результате вычислений по формулам (5) и (6) были определены численные значения коэффициентов регрессионного уравнения: постоянная составляющая $b_0 = 1199,00$; линейные коэффициенты $b_1 = -315,13$, $b_2 = -229,50$ и $b_3 = 76,25$; коэффициент парного взаимодействия $b_{12} = 92,38$.

Проверка статистической значимости коэффициентов регрессионной модели проводилась с использованием t -критерия Стьюдента по формулам (8) и (9). Все коэффициенты (b_i) в регрессионном уравнении являются статистически значимыми. Это подтверждается расчетом по формуле (8), согласно которому значение $\Delta b_i = \pm 27,12$, что указывает на значимость всех коэффициентов при переменных в уравнении (12).

По уравнению (12) определены расчетные значения микротвердости ($HV_{0,1}$) для всех образцов ($Y_{\text{расч}} = \bar{Y}_2$), после чего проведен расчет процентных расхождений между теоретическими и экспериментальными величинами, результаты которого представлены в табл. 8.

Таблица 8

Множественная линейная регрессия со значимыми факторами для микротвердости

№ образца	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	$Y_2, HV_{0,1}$	$\bar{Y}_2, HV_{0,1}$	Ошибка, %
1	-1	-1	1	1	1905	1912	0,38
2	1	-1	-1	-1	1064	945	11,21
3	-1	1	1	-1	1064	1116	4,89
4	1	1	1	1	898	823	8,30
5	-1	-1	-1	1	1767	1760	0,41
6	1	-1	1	-1	1135	978	12,19
7	-1	1	1	-1	1292	1321	3,94
8	1	1	-1	1	612	596	12,50

Сравнение экспериментально полученных значений целевой функции Y_2 с расчетными величинами

нами \bar{Y}_2 выявило среднюю погрешность модели 6,73 % с максимальным отклонением 12,50 %. Для проверки адекватности модели был рассчитан нормированный R^2 , составивший 92 %.

Таким образом, итоговое регрессионное уравнение имело вид

$$\bar{Y}_2 = 1199,00 - 315,13X_1 - 229,50X_2 + 76,25X_3 + 92,38X_1X_2. \quad (13)$$

Проверка адекватности регрессионной модели выполнялась с помощью F -критерия Фишера при доверительной вероятности 95 %. Табличное значение критерия Фишера составило $F_{\text{табл}} = 9,12$ [22]. Величина $F_{\text{расч}}$ определялась расчетным путем по формуле (11) и составила значение $F_{\text{расч}} = 22,14$. Так как полученный показатель превышает табличное значение $F_{\text{табл}}$, регрессионная модель (13) с достоверностью 95 % является адекватной.

Анализ уравнения регрессии (13) позволяет сделать следующие выводы.

Свободный член $b_0 = 1199,00$ представляет расчетное значение микротвердости в центре плана эксперимента.

Фактор X_1 (плотность анодного тока) оказывает статистически значимое отрицательное влияние на микротвердость, что определяется коэффициентом $b_1 = -315,13$. Таким образом, увеличение плотности тока в исследованном диапазоне приводит к снижению микротвердости покрытия. Данная зависимость объясняется тем, что высокая плотность тока интенсифицирует тепловыделение в разрядных каналах, способствуя формированию более рыхлых и пористых оксидных структур с повышенной дефектностью.

Фактор X_2 (концентрация УНТ) также демонстрирует отрицательное влияние на отклик с коэффициентом $b_2 = -229,50$. Рост концентрации дисперсных частиц сверх оптимального уровня приводит к их возможной агломерации в электролите, что нарушает однородность оксидной матрицы и создает области с пониженной прочностью.

Фактор X_3 (материал подложки) имеет положительный коэффициент $b_3 = +76,25$. Поскольку кодировка факторов предполагает $X_3 = -1$ для сплава Д16Т и $X_3 = +1$ для сплава В95, положительный знак коэффициента указывает, что использование сплава В95 обеспечивает статистически значимое повышение микротвердости покрытия по сравнению со сплавом Д16Т. Это различие обусловлено лучшей структурной однородностью сплава В95, которая обеспечивает более стабильные условия роста оксидного слоя.

Эффект взаимодействия X_1X_2 характеризуется положительным коэффициентом $b_{12} = +92,38$, что указывает на наличие синергетического эффекта: совместное воздействие факторов плотности тока и концентрации нанотрубок приводит к увеличению микротвердости. Однако данный положительный эффект взаимодействия не компенсирует существенного отрицательного влияния каждого из этих факторов в отдельности.

Выводы

Результаты экспериментальных исследований показывают, что наименьшую интенсивность изнашивания и наибольшую микротвердость имеет МДО-покрытие на образце 1, которое было сформировано на сплаве В95 при плотности тока 10 А/дм² и содержании УНТ в электролите 5 мл/л. По сравнению с образцом 10, сформированным на том же сплаве В95 при базовых параметрах процесса: плотности анодного тока 15 А/дм² и концентрации нанотрубок 10 мл/л, I_h уменьшилась на 31 %, а микротвердость покрытия повысилась на 32 %. Проведенный корреляционно-регрессионный анализ подтверждает оптимальность выбора данных сочетаний факторов.

Следовательно, для повышения износостойкости МДО-покрытия требуется снижение плотности анодного тока, умеренное содержания нанотрубок в электролите и применение алюминиевого сплава В95 в качестве подложки.

Для углубленного изучения данной темы и оптимизации установленных зависимостей целесообразно проведение дополнительных исследований. Следует изучить воздействие других технологических параметров МДО, включая температурный режим электролита, продолжительность обработки и вариативность состава модифицирующих компонентов. Эффективным подходом может стать постановка оптимизационного эксперимента с применением методологии поверхности отклика, в частности, центрального композиционного ротатабельного плана (ЦКРП). Такой подход обеспечит построение более точных нелинейных моделей второго порядка и определение зон оптимальных значений параметров, гарантирующих баланс между износостойкостью и микротвердостью покрытий.

Комплексная оценка эксплуатационных свойств требует расширения перечня анализируемых выходных характеристик. Определение адгезионной прочности, уровня пористости, коррозионной стойкости и термической стабильности покрытий позволит установить более полные корреляции между технологическими режимами формирования и свойствами полученных композитных слоев.

Список литературы

- 1 **Shrestha, S.** Plasma electrolytic oxidation and anodising of aluminium alloys for spacecraft applications / S. Shrestha, B. D. Dunn // *Surface Engineering of Light Alloys*, 18. – Woodhead Publishing Limited, 2010. – P. 603–641.
- 2 Микродуговое оксидирование. Наука и человечество : альманах / под редакцией А. А. Логунова. – Москва : Знание, 1981. – С. 341.
- 3 **Марков, Г. А.** Микродуговое оксидирование / Г. А. Марков, В. И. Белеванцев, О. П. Терлеева // *Вестник МГТУ. Машиностроение*. – 1992. – № 1. – С. 34–56. – ISSN 0236-3941.
- 4 **Simchen, F.** Introduction to plasma electrolytic oxidation-an overview of the process and applications / F. Simchen, M. Sieber, A. Kopp, T. Lampke // *Coatings*. 10 (7) (2020). – P. 628. – DOI 10.3390/coatings10070628.
- 5 **Clyne, T. W.** A Review of Recent Work on Discharge Characteristics During Plasma Electrolytic Oxidation of Various Metals / T. W. Clyne, S. C. Troughton // Taylor and Francis Ltd. – 2018. 64 (1). – P. 1–36. – DOI 10.1080/09506608.2018.1466492.
- 6 Characteristic of ceramic coatings on aluminum by plasma electrolytic oxidation in silicate and phosphate electrolyte / G. Lv [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* 253 (5) (2006). – P. 2947–2952. – DOI 10.1016/j.apsusc.2006.06.036.
- 7 Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2 томах. Том 2 / И. В. Суминов, П. Н. Белкин, А. В. Эпельфельд [и др.] ; под общей редакцией И. В. Суминова. – Москва : Техносфера, 2011. – 512 с. – ISBN 978-5-94836-268-7.
- 8 Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования / В. Н. Малышев, Г. А. Марков, В. А. Федоров [и др.] // *Химическое и нефтяное машиностроение*. – 1984. – № 1. – С. 26–27.
- 9 Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин [и др.]. – Москва : ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с. – ISBN 5-89594-110-9.
- 10 **Malyshev, V. N.** Features of Microarc Oxidation Coatings Formation Technology in Slurry Electrolytes / V. N. Malyshev, K. M. Zorin // *Applied Surface Science*. – 2007. – Т. 254, № 5. – P. 1511–1516.
- 11 МДО-синтез нанокерамических слоев на деталях из металлов и сплавов / Б. Крит, В. Людин, И. Суминов [и др.] // *Наноиндустрия*. – 2010. – № 2. – С. 12–13. – ISSN 1993-8578.

References

- 1 **Shrestha, S.** Plasma electrolytic oxidation and anodising of aluminium alloys for spacecraft applications / S. Shrestha, B. D. Dunn // *Surface Engineering of Light Alloys*, 18. – Woodhead Publishing Limited, 2010. – P. 603–641.
- 2 Microarc oxidation. Science and humanity : almanac / Ed. by A.A. Logunov. – Moscow : Znanie, 1981. – P. 341.
- 3 **Markov, G. A.** Microarc oxidation / G. A. Markov, V. I. Belevantsev, O. P. Terleeva // *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. – 1992. – No. 1. – P. 34–56. – ISSN 0236-3941.
- 4 **Simchen, F.** Introduction to plasma electrolytic oxidation-an overview of the process and applications / F. Simchen, M. Sieber, A. Kopp, T. Lampke // *Coatings*. 10 (7) (2020). – P. 628. – DOI 10.3390/coatings10070628.
- 5 **Clyne, T. W.** A Review of Recent Work on Discharge Characteristics During Plasma Electrolytic Oxidation of Various Metals / T. W. Clyne, S. C. Troughton // Taylor and Francis Ltd. – 2018. 64 (1) – P. 1–36. – DOI 10.1080/09506608.2018.1466492.
- 6 Characteristic of ceramic coatings on aluminum by plasma electrolytic oxidation in silicate and phosphate electrolyte / G. Lv [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* 253 (5) (2006). – P. 2947–2952. – DOI 10.1016/j.apsusc.2006.06.036.
- 7 Plasma-electrolytic surface modification of metals and alloys. In 2 volumes. Vol. 2 / I. V. Suminov, P. N. Belkin, A. V. Apelfeld [et al.] ; ed. by I. V. Suminov. – Moscow : Tekhnosfera, 2011. – 512 p. – ISBN 978-5-94836-268-7.
- 8 Features of the structure and properties of coatings applied by microarc oxidation / V. N. Malyshev, G. A. Markov, V. A. Fedorov [et al.] // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 1984. – No. 1. – P. 26–27.
- 9 Microarc oxidation (theory, technology, equipment) / I. V. Suminov, A. V. Apelfeld, V. B. Lyudin [et al.]. – Moscow : Ecomet, 2005. – 368 p. – ISBN 5-89594-110-9.
- 10 **Malyshev, V. N.** Features of Microarc Oxidation Coatings Formation Technology in Slurry Electrolytes / V. N. Malyshev, K. M. Zorin // *Applied Surface Science*. – 2007. – Vol. 254, No. 5. – P. 1511–1516.
- 11 MAO-synthesis of nanoceramic layers on metal and alloy parts / B. Krit, V. Lyudin, I. Suminov [et al.] // *Nanoindustry*. – 2010. – No. 2. – P. 12–13. – ISSN 1993-8578.

- 12 **Xinyang, Wang**, Effects of halloysite nanotube integration on the soft sparking micro-arc oxidation process and coatings properties of aluminum alloys / Wang Xinyang, Fengyun Yu, Weigiang Wang // *Surface and Coatings Technology*. – 2025. – Vol. 511. – 132301. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2025.132301.
- 13 **Комаров, А. И.** Создание износостойких упрочняющих покрытий микродуговым окислением, непосредственной и последующей модификацией углеродными наноматериалами / А. И. Комаров, П. А. Витязь, В. И. Комарова // *Перспективные технологии / под редакцией В. В. Клубовича*. – Витебск, 2011. – Гл. 6. – С. 114–148.
- 14 Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П. А. Витязь [и др.] ; под редакцией П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 381 с.
- 15 Особенности формирования износостойких слоев на поверхности модифицированного фуллеренами МДО-покрытия при трении / П. А. Витязь [и др.] // *Трение и износ*. – Минск, 2011. – Т. 32, № 4. – С. 313–325.
- 16 **Витязь, П. А.** Влияние наноразмерных частиц углерода на формирование структуры и свойств микродуговых керамических покрытий на сплавах алюминия / П. А. Витязь, А. И. Комаров, В. И. Комарова // *Доклады НАН Беларуси*. – 2013. – Т. 57, № 2. – С. 96–101.
- 17 **Malyshev, V. N.** Effective Electrochemical Transformation Method of Valve Metals Surface Layer into High-Tensile Ceramic Coating. Chapter in Book: *Chemical Reactions on Surfaces*. Chapter 7. Editor J.I. Duncan and A.B. Klein. 2008, Nova Science Publishers, Inc. – P. 211–262. – ISBN 978-1-60456-898-1.
- 18 **Зорин, В. А.** Основы теории трения и изнашивания : практикум / В. А. Зорин, Ю. В. Штефан. – Москва : МАДИ, 2023. – 126 с.
- 19 **Зедгенидзе, И. Г.** Планирование экспериментов для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгенидзе. – Москва : Наука, 1976. – 390 с.
- 20 **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский – Москва : Наука, 1976. – 139 с.
- 21 **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – Москва : Статистика, 1973. – 391 с.
- 22 **Гуськов, О. И.** Математическое моделирование в геологии и разведке полезных ископаемых
- 12 **Xinyang, Wang**, Effects of halloysite nanotube integration on the soft sparking micro-arc oxidation process and coatings properties of aluminum alloys / Wang Xinyang, Fengyun Yu, Weigiang Wang // *Surface and Coatings Technology*. – 2025. – Vol. 511. – 132301. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2025.132301.
- 13 **Komarov, A. I.** Creation of wear-resistant hardening coatings by microarc oxidation, direct and subsequent modification with carbon nanomaterials / A. I. Komarov, P. A. Vityaz, V. I. Komarova // *Advanced Technologies / ed. by V. V. Klubovich*. – Vitebsk, 2011. – Chapter. 6. – P. 114–148.
- 14 Nanodiamonds of detonation synthesis : production and application / P. A. Vityaz [et al.] ; ed. P. A. Vityaz. – Minsk : Belarus Science, 2013. – 381 p.
- 15 Features of the formation of wear-resistant layers on the surface of a fullerene-modified MAO-coating under friction / P. A. Vityaz [et al.] // *Friction and Wear*. – Minsk, 2011. – Vol. 32, No. 4. – P. 313–325.
- 16 **Vityaz, P. A.** The effect of nanoscale carbon particles on the formation of the structure and properties of microarc ceramic coatings on aluminum alloys / P. A. Vityaz, A. I. Komarov, V. I. Komarova // *Report of the National Academy of Sciences of Belarus*. – 2013. – Vol. 57, No. 2. – P. 96–101.
- 17 **Malyshev, V. N.** Effective Electrochemical Transformation Method of Valve Metals Surface Layer into High-Tensile Ceramic Coating. Chapter in Book: *Chemical Reactions on Surfaces*. Chapter 7. Editor J.I. Duncan and A.B. Klein. 2008, Nova Science Publishers, Inc. – P. 211–262. – ISBN 978-1-60456-898-1.
- 18 **Zorin, V. A.** Fundamentals of friction and wear theory : workshop / V. A. Zorin, Yu. V. Stefan. – Moscow : MADI, 2023. – 126 p.
- 19 **Zedgenidze, I. G.** Planning experiments for the study of multicomponent systems / I. G. Zedgenidze. Moscow : Nauka, 1976. – 390 p.
- 20 **Adler, Yu. P.** Planning an experiment in searching for optimal conditions / Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Granovsky. – Moscow : Nauka, 1976. – 139 p.
- 21 **Draper, N.** Applied regression analysis / N. Draper, G. Smith. – Moscow : Statistics, 1973. – 391 p.
- 22 **Guskov, O. I.** Mathematical modeling in geology and mineral exploration / O. I. Guskov,

/ О. И. Гуськов, А. Б. Каждан, А. А. Шиманский.
– Москва, 1979. – 168 с.

23 Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / А. А. Петросянц, В. Н. Малышев, В. А. Федоров, Г. А. Марков // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 2. – С. 350–354.

A. B. Kazhdan, A. A. Shimansky. – Moscow, 1979. – 168 p.

23 Wear kinetics of coatings applied by microarc oxidation / A. A. Petrosyants, V. N. Malyshev, V. A. Fedorov, G. A. Markov // Friction and Wear. – 1984. – Vol. 5, No. 2. – P. 350–354.

V. N. Malyshev, D. D. Matyushenko

EFFECT OF ELECTROLYTE MODIFICATION WITH CARBON NANOTUBES ON THE MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF MAO-COATINGS

Abstract. This study examined the influence of technological parameters of microarc oxidation (MAO), including modification of the base electrolyte with carbon nanotubes, on the wear resistance and microhardness of the formed coatings. Using the concept of a multifactorial experiment, factors such as anodic current density, carbon nanotubes concentration in the electrolyte, and grade of aluminum alloy (D16T, B95) were investigated. Wear resistance tests were performed using a ball-on-plane friction scheme according to ASTM G133-02, and microhardness was measured using the Vickers method. Through correlation-regression analysis and subsequent validation of the models using the Fisher criterion, it was established that the introduction of a small amount of carbon nanotubes into the electrolyte and the use of B95 alloy as a substrate at reduced current density improves the wear resistance and microhardness of MAO-coatings

Keywords: microarc oxidation, MAO-coating, carbon nanotubes, wear resistance, microhardness, regression analysis.

For citation: Malyshev, V. N. Effect of electrolyte modification with carbon nanotubes on the mechanical and tribological characteristics of MAO-coatings / V. N. Malyshev, D. D. Matyushenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 53–64. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_53.

Сведения об авторах

Малышев Владимир Николаевич

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина ((РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина), кафедра трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования, доктор технических наук, профессор, e-mail: vmal@inbox.ru, malyshev.v@gubkin.ru

Матюшенко Денис Дмитриевич

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина ((РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина), кафедра трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования, аспирант, ассистент кафедры теоретической механики, e-mail: denis.matyushenko.d@yandex.ru

Information about the authors

Malyshev Vladimir Nikolaevich

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Chair “Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment”, Doctor of Engineering Science, Professor, e-mail: vmal@inbox.ru, malyshev.v@gubkin.ru

Matyushenko Denis Dmitrievich

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Chair “Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment”, Postgraduate Student, Assistant of the Chair “Theoretical Mechanics”, e-mail: denis.matyushenko.d@yandex.ru

А. Е. Набоков, А. Н. Чукарин, И. А. Яицков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИЙ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА ПРИ ОБРАБОТКЕ КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЕННЫМИ ДИСКОВЫМИ И ГРЕБЕНЧАТЫМИ ФРЕЗАМИ НА РЕЗЬБООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКАХ

Аннотация. Резьбообрабатывающие станки специализируются на нарезания резьб различных типов и размеров, как внутренних, так и наружных, с использованием консольно-закрепленных дисковых и гребенчатых фрез. В статье представлены теоретические исследования и выведены аналитические зависимости уровней звукового давления и звуковой мощности для технологических процессов фрезерования. Полученные аналитические зависимости дают возможность прогнозировать уровень шума на различных стадиях резьбофрезерования и разрабатывать мероприятия по его снижению. К таким мероприятиям относятся оптимизация режимов резания, применение вибродемпфирующих материалов, использование шумозащитных кожухов и экранов, а также превентивное обслуживание станочного оборудования с целью устранения дисбаланса и люфтов. Внедрение предложенных рекомендаций позволит не только повысить точность и качество резьбовых соединений за счет уменьшения вибраций и улучшения стабильности процесса резания. Это, в свою очередь, приведет к снижению брака, повышению производительности и сокращению производственных затрат, но и снизить негативное воздействие шума на операторов станков.

Ключевые слова: станочное оборудование, дисковые и гребенчатые фрезы, колебательная система, сила резания, скорость колебаний, уровень звукового давления.

Для цитирования: Набоков, А. Е. Исследование частотных характеристик вибраций источников звука при обработке консольно закрепленными дисковыми и гребенчатыми фрезами на резьбообрабатывающих станках / А. Е. Набоков, А. Н. Чукарин, И. А. Яицков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4 – С. 65–70. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_65.

Введение

На резьбообрабатывающих станках выполняется широкий спектр операций по обработке. Технологии резьбообработки, применяемые на этих станках, варьируются в зависимости от предъявляемых требований к прецизионности, скорости производства и свойств обрабатываемого металла. Основные способы включают нарезание резьбы с помощью метчиков и плашек, резьбофрезерование, накатка и токарная обработка резьбы. Каждый из упомянутых подходов отличается своими достоинствами и недостатками, а выбор оптимального варианта обуславливается спецификой решаемой задачи.

Исследование частотных характеристик вибраций, издаваемых дисковыми и гребенчатыми фрезами с консольным креплением, применяемыми в резьбообрабатывающем оборудовании, представляет собой сложную задачу, требующую принимать во внимание многочисленные параметры, определяющие динамические свойства инструмента и всей станочной системы. Колебательные процессы, возникающие в процессе резания, оказывают значительное воздействие на точность обработки, качество поверхности резьбы и на срок службы инструмента и оборудования. Поэтому идентификация и изучение частотных характеристик этих колебаний является важным для оптимизации режимов резания, снижения уровня шума и повышения производительности технологического процесса.

Основными источниками вибраций при работе консольно закрепленных дисковых и гребенчатых фрез являются силы резания, изменяющиеся во времени в зависимости от геометрии зуба фрезы, скорости резания, подачи и свойств обрабатываемого материала. Эти переменные силы вызывают колебания инструмента, станка и заготовки, которые в свою очередь генерируют звуковые волны. Структура этих волн, а именно их частотный состав, несет в себе информацию о характере вибраций и, следовательно, о причинах их возникновения [1, 2].

Модель и объект исследования

Дисковые и гребенчатые фрезы устанавливаются на консольной части шпинделя. На рис. 1, 2 представлены расчетные схемы технологического процесса фрезерования гребенчатой фрезой: 1 – наружной и внутренней резьбы; 2 – на длинных заготовках.

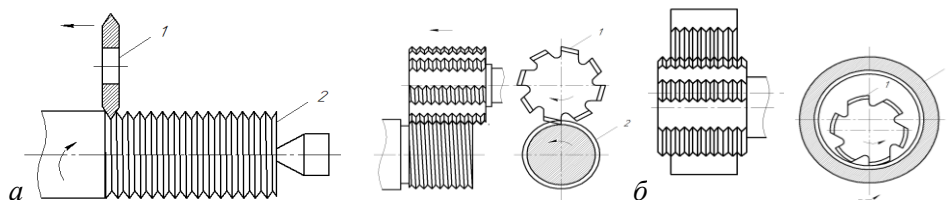


Рис. 1. Расчетная схема фрезерования резьбы:
а – наружной и *б* – внутренней; *1* – гребенчатая фреза; *2* – заготовка



Рис. 2. Расчетная схема фрезерования резьбы на длинных заготовках дисковой фрезой

Исходя из условий закрепления режущего инструмента, заготовок и их геометрических размеров приняты следующие акустические модели источников:

точечный источник – гребенчатые фрезы и обрабатываемые заготовки;

круглая пластина, закрепленная в центре – дисковые фрезы для фрезерования резьб на длинных заготовках.

Зависимости, определяющие звуковое давление (P), звуковую мощность (N) и их уровни с учетом исследований, приведенных в работах [1–5], доведены до следующих формул:

– *обрабатываемые заготовки и гребенчатые фрезы при нарезании резьбы*

$$P = 4 \cdot 10^{-4} \frac{D^3 \omega^2 V_K \cos \theta}{r}; \quad L_p = 20 \lg \frac{V_K \cos \theta}{r} + 40 \lg f_c + 60 \lg D + 60, \text{ дБ};$$

$$N = 1,2 \cdot 10^{-10} D^6 f_c^4 V_K^2; \quad L_N = 60 \lg D + 40 \lg f_c + 40 \lg V_K + 52, \text{ дБ}, \quad (1)$$

– *дисковые фрезы для фрезерования резьб на длинных заготовках*

$$P = 3 \cdot 10^3 \frac{D \cdot h \cdot V_K \cdot k}{r}, \quad L_p = 20 \lg \frac{D \cdot h \cdot V_K \cdot k}{r} + 164, \text{ дБ},$$

$$N = 0,1(D \cdot h \cdot V_K \cdot k)^2, \quad L_N = 20 \lg DhV_K k + 110, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где D – диаметр источника, м; h – толщина резца, м; ω – частота образования стружки, р/с; V_K – скорость колебательного движения, м/с; θ – угол излучения; r – дистанция от источника колебаний до точки измерения, м; k – коэффициент, задающий собственные частоты колебаний; f_c – собственная частота колебаний источника, Гц.

Для определения собственных частот колебаний (f_c), проявляющихся в процессе нарезания резьбы гребенчатыми фрезами, применяется следующая зависимость между ключевыми параметрами:

$$f_c = \sqrt{\frac{c}{m + \left(\frac{l}{l_1}\right)^3 \rho F}}, \quad (3)$$

$$\text{где } c = \frac{EJ_x}{l^3}.$$

Анализ приведенных уравнений позволяет выявить определяющие факторы, влияющие на собственные частоты колебаний. Для гребенчатых фрез: жесткость системы (c , Н/м), определяемая модулем упругости (E , Па) материала шпинделя и фрезы, напрямую влияет на частоту. Увеличение модуля упругости приводит к повышению жесткости и, следовательно, к увеличению собственной частоты. Момент инерции (J_x , м⁴) характеризует геометрию сечения детали. Чем он выше, тем больше сопротивление изгибу, что также повышает собственную частоту. Длина шпинделя и фрезы (l и l_1 , м) оказывают обратное воздействие: чем они больше, тем ниже собственная частота колебаний, так как удлинение конструкции снижает ее жесткость. Масса обрабатываемой заготовки или гребенчатой фрезы (m , кг) также обратно пропорциональна собственной частоте, что логично, поскольку большая масса требует меньшей частоты для возникновения колебаний. F – площадь поперечного сечения шпинделя, м²; ρ – плотность, кг/м³.

Для дисковых фрез, используемых при фрезеровании резьбы на протяженных заготовках:

$$f_c = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot k \cdot h}{D}, \quad (4)$$

где h – толщина реза, м; k – коэффициент, определяющий собственные частоты колебаний, определяется экспериментально или теоретически, исходя из конкретной геометрии и материала дисковой фрезы и заготовки; D – диаметр источника, м. Для дисковых фрез толщина режущей части (h) и диаметр источника (D) являются ключевыми параметрами, так увеличение толщины режущей части приводит к повышению собственной частоты, так как увеличивается жесткость конструкции, диаметр источника связан с размером диска, вызывающего колебания.

Для анализа частот вибраций применяются различные методы, включая экспериментальные измерения с использованием акселерометров и микрофонов, а также теоретическое моделирование с использованием конечно-элементного анализа.

Для рассматриваемых моделей с выраженным высокочастотным диапазоном частот собственных колебаний динамическое уравнение в векторном представлении записывается как:

$$\overline{F}_u + \overline{F}_d + \overline{F}_y + \overline{P}_p = 0, \quad (5)$$

где F_u , F_d , F_y , P_p – силы инерции, демпфирования, упругости и резания (соответственно).

Силы, возникающие при резании, зависят от многих факторов, включая скорость резания, глубину резания, подачу, свойства обрабатываемого материала и геометрию реза. В первом приближении можно принять, что эти силы пропорциональны площади срезаемого слоя материала. Площадь срезаемого слоя в свою очередь зависит от текущих отклонений реза по осям Y и Z .

Вследствие разной интенсивности действия сил резания вдоль координатных осей O_z и O_y , можно утверждать, что:

$$\overline{F}_u = -m \left[\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \bar{i} + \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} \bar{k} \right], \quad (6)$$

где m – масса реза, кг; y и z – отклонение реза по осям Y и Z ; \bar{i} и \bar{k} – единичные векторы вдоль осей Y и Z .

Для более точного моделирования процесса нарезания резьбы необходимо учитывать не только статические параметры, такие как жесткость системы и силы резания, но и динамические характеристики, включая массу режущего инструмента и демпфирующие свойства системы.

$$\overline{F}_d = \varepsilon \left[\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \bar{i} + \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} \bar{k} \right],$$

$$\overline{F}_y = j \left[y(x,t) \bar{i} + z(x,t) \bar{k} \right], \quad (7)$$

где j – параметр, характеризующий сопротивление деформации (жесткость) системы «заготовка–фреза», Н/м; ε – коэффициент демпфирования, который определяется зависимостью [3–5]:

$$\varepsilon = \frac{2m}{T} \delta_0,$$

где m – масса фрезы, кг; T – период колебания, с; δ_0 – логарифмический показатель уменьшения амплитуды колебаний, имеющий величину $\delta_0 = 0,32$ для фрезерных и шлифовальных систем [3, 4].

Для представленной модели скорость колебаний вычисляется на основе уравнения:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + \eta_{ob} \frac{dz}{dt} + Cz = P_z(t), \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} + \eta_{ob} \frac{dy}{dt} + Cy = 0,4P_z(t),$$

где C – жесткость системы, Н/м; η_{ob} – обобщенный коэффициент сопротивления, который определяется зависимостью [7, 8]:

$$\eta_{ob} = \frac{2m}{T} \delta_0.$$

Для резьбообрабатывающих станков следует учитывать составляющие силы резания в направлении осей O_z и O_y , а также пропорцию сил резания $P_y = 0,4 P_z$ и механические характеристики фрез. Тогда дифференциальные уравнения колебаний в направлении осей координат примут вид:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{10^{-2} k}{R^3 h^{1.5}} \frac{dz}{dt} + 2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} z = \frac{4 \cdot 10^{-5} P_z}{R^2 h} \cos \left[0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right],$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{10^{-2} k}{R^3 h^{1.5}} \frac{dy}{dt} + 2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} z = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_z}{R^2 h} \cos \left[0,1 n z^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right].$$

Решение уравнений вынужденных колебаний получены в следующем виде:

$$z = \frac{4 \cdot 10^{-5} P_z \cos \left[0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}}$$

$$y = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} P_z \cos \left[0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}}$$

Значения скорости колебаний в направлении осей Oz и Oy получены в следующем виде:

$$|V_z| = \frac{4 \cdot 10^{-6} P_z n z^* \sin \left[0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}}$$

$$|V_y| = \frac{1,6 \cdot 10^{-6} P_z n z^* \sin \left[0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}}$$

Измерение уровней звукового давления и звуковой мощности основано на вычислении среднеквадратичного значения скоростей колебаний:

$$V_k = \frac{4,3 \cdot 10^{-6} P_z n z^* \sin \left[0,1nz^* t - (q-1) \frac{2\pi}{z^*} \right]}{\sqrt{\left[2 \cdot 10^6 \frac{1}{R^2 h} - (0,1nz^* t)^2 \right]^2 + \frac{10^{-4} k}{R^6 h^3}}} + \frac{9 \cdot 10^{-12} P_z l^3}{R^5 h^{0,5}} \sin \frac{1,4 \cdot 10^3}{R h^{0,5}} t.$$

Для практических расчетов следует определять не изменение уровней звукового давления во времени, а их максимальное значение в течение времени обработки

$$0 \leq t \leq \frac{l_u}{S_n},$$

где l_u – длина резьбы, м; S_n – скорость продольной подачи, м/с.

$$V_{k \max} = \sqrt{\left(\frac{dz}{dt} \right)_{\max}^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)_{\max}^2}. \quad (8)$$

Анализ акустических свойств системы «фреза – заготовка» фрезерных станков подразумевает определение величин амплитуд колебаний на резонансных частотах источников возбуждения. В качестве подтверждения теоретических расчетов проводились экспериментальные исследования в производственных условиях. Измерения дают возможность получить фактические значения частот вибраций в различных точках станка и режущего инструмента, а теоретическое моделирование – установить собственные частоты колебаний системы. В ходе экспериментов были получены следующие результаты: подтверждены теоретические расчеты частот собственных колебаний; определены фактические уровни звукового давления в различных точках рабочей зоны; выявлены резонансные частоты систем «фреза – обрабатываемая заготовка»; зафиксированы зависимости уровня шума от режимов резания.

Сопоставление результатов экспериментальных исследований и теоретического моделирования позволяет получить более полное представление о динамических процессах, происходящих при резбообработке. Важным аспектом анализа является выявление резонансных частот, на которых амплитуда вибраций значительно возрастает, что может приводить к нестабильности процесса резания и возникновению автоколебаний. Предотвращение резонансных явлений достигается путем изменения параметров режима резания, конструкции инструмента или станка, а также путем применения демпфирующих элементов.

Заключение

Проведенные исследования дают возможность выявить основные закономерности формирования акустических полей при фрезеровании и разработать акустические модели для расчета уровней шума. Разработанные акустические модели позволяют прогнозировать уровень звукового давления при фрезеровании, что позволяет инженерам и технологам оптимизировать технологические операции на этапе планирования.

Список литературы

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

References

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

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

3 **Балыков, И. А.** Влияние процессов резания на шум фрезерных станков / И. А. Балыков, А. Н. Чукарин, Д. З. Евсеев // Новое в безопасности и жизнедеятельности и экологии : сборник докладов и тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 14–16 окт. 1996 г. – Санкт-Петербург, 1996. – С. 222–223.

4 **Жарков, И. Г.** Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. – 184 с.

5 Расчеты на прочность в машиностроении. В 3 т. Т. 1 : Теоретические основы и экспериментальные методы / под редакцией С. Д. Пономарева. – Москва : Машгиз, 1956. – 884 с.

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

7 **Рыжков, Д. И.** Вибрации при резании металлов и методы их устранения / И. Д. Рыжков. – Москва : Машиностроение, 1961. – 172 с.

8 **Месхи, Б. Ч.** Математическое моделирование шумообразования системы инструмент–заготовка при фрезеровании и шлифовании / Б. Ч. Месхи, В. А. Гергерт // *Строительство-2003 : материалы Международной научно-практической конференции / РГСУ*. – Ростов-на-Дону, 2003. – С. 50–57. – EDN VIHKAD.

9 **Набоков, А. Е.** Экспериментальные исследования шума на рабочих местах станочников резьбообрабатывающих и шлицефрезерных станков / А. Е. Набоков // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2023. – № 5. – С. 77–84. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-77-78.

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

3 **Balykov, I. A.** Influence of cutting processes on the noise of milling machines / I. A. Balykov, A. N. Chukarin, D. Z. Evseev // *New in safety and life and ecology : collection of reports and abstracts of the All-Russian scientific and practical conference with international participation Oct 14–16, 1996*. – Saint Petersburg, 1996. – P. 222–223.

4 **Zharkov, I. G.** Vibrations when processing with blade tools / I. G. Zharkov. – Leningrad : Mechanical engineering. Leningrad Department, 1986. – 184 p.

5 Strength calculations in mechanical engineering. In 3 vols. Vol. 1 : Theoretical foundations and experimental methods / edited by S. D. Ponomarev. – Moscow : Mashgiz, 1956. – 884 p.

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

7 **Ryzhkov, D. I.** Vibrations during metal cutting and methods for eliminating them / D. I. Ryzhkov. – Moscow : Mashinostroenie, 1961. – 172 p.

8 **Meski, B. Ch.** Mathematical modeling of noise generation in the tool-workpiece system during milling and grinding / B.Ch. Meski, V. A. Gergert // *Construction-2003 : materials of the International scientific-practical conference / Rostov State University of Civil Engineering*. – Rostov-on-Don, 2003. P. 50–57. – EDN VIHKAD.

9 **Nabokov, A. E.** Experimental studies of noise at the workplaces of machine operators of thread-processing and slot-milling machines / A. E. Nabokov // *News of the Tula State University. Technical sciences*. – 2023. – No. 5. – P. 77–84. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-77-78.

A. E. Nabokov, A. N. Chukarin, I. A. Yaitskov

STUDY OF THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SOUND SOURCE VIBRATIONS DURING PROCESSING WITH CANTILEVER-MOUNTED DISC AND COMB MILLING CUTTERS ON THREAD PROCESSING MACHINES

Abstract. Thread milling machines specialize in cutting threads of various types and sizes, both internal and external, using cantilever-mounted disk and comb milling cutters. This article presents theoretical research and derives analytical relationships for sound pressure and sound power levels in milling processes. The resulting analytical relationships make it possible to predict noise levels at various stages of thread milling and develop measures to reduce them.

These measures include optimizing cutting conditions, using vibration-damping materials, employing noise-reducing enclosures and screens, and performing preventive maintenance on machine tools to eliminate imbalances and backlash. Implementing the proposed recommendations will not only improve the accuracy and quality of threaded connections by reducing vibration and improving the stability of the cutting process. This, in turn, will lead to a reduction in defects, increased productivity, and a reduction in production costs, but will also reduce the negative impact of noise on machine operators.

Keywords: machine tools, disk and comb milling cutters, oscillatory system, cutting force, oscillation velocity, sound pressure level.

For citation: Nabokov, A. E. Study of the frequency characteristics of sound source vibrations during processing with cantilever-mounted disk and comb milling cutters on thread-processing machines / A. E. Nabokov, A. N. Chukarin, I. A. Yaitskov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 65–70. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_65.

Сведения об авторах

Набоков Александр Евгеньевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Строительная механика», старший преподаватель, e-mail: mr.nae@yandex.ru

Чукарин Александр Николаевич

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

Яицков Иван Анатольевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), электромеханический факультет, доктор технических наук, профессор, декан, e-mail: yia@rgups.ru

Information about the authors

Nabokov Alexander Evgenievich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Structural Mechanics”, Senior Lecturer, e-mail: mr.nae@yandex.ru

Chukarin Alexander Nikolaevich

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

Yaitskov Ivan Anatolievich

Rostov State Transport University (RSTU), Electromechanical Department Doctor of Engineering Sciences, Professor, Dean, e-mail: yia@rgups.ru

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 625.1 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_71

*В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, М. В. Окост, Т. П. Горбачева***ПОРИСТЫЙ ГЕОКОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ
ДЛЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА ***

Аннотация. Настоящая работа посвящена исследованию возможности создания на базе глинистых грунтов, применяемых при строительстве земляного полотна железных дорог, нового геокомпозитного материала, обладающего свойствами, позволяющими использовать его в качестве элемента конструкции грунтовых объектов, строящихся в сложных условиях, где от материалов и конструкций необходимы такие свойства, как пониженный вес и теплопроводность, при этом они должны обеспечить стабильность земляного полотна и его основания. В качестве такого материала в работе предлагается геокомпозит, состоящий из глинистого грунта и полиуретана, который в результате изготовления будет формировать пористую структуру и при этом не потребует дополнительного воздействия высокими температурами.

Ключевые слова: глинистый грунт, геокомпозит, земляное полотно, полиуретан, теплопроводность, облегченные конструкции.

Для цитирования: Пористый геокомпозитный материал для сложных условий строительства / В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, М. В. Окост, Т. П. Горбачева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 71–80. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_71.

Введение

Развитие сети железных и автомобильных дорог связано со строительством в том числе в сложных природных и климатических условиях, на слабом основании или участках с многолетнемерзлыми грунтами. В таких условиях необходимо предусмотреть мероприятия, снижающие вероятность возникновения деформаций при эксплуатации. Для возможности строительства в таких условиях необходимы современные материалы, обладающие свойствами, способными уменьшить нагрузку на слабые основания и снизить влияние термических воздействий на земляное полотно и его основание.

Последнее время все большее распространение получают геополимеры и геокомпозиты, имеющие различные свойства и находящие свое применение в различных областях промышленности, транспорта, строительства и др. Одними из направлений развития материалов, в основе которых лежат геополимеры, являются пористые геополимеры. Основными преимуществами таких материалов являются возможность использования отходов различных производств, их экологичность, повышенные прочностные свойства и улучшенные теплопроводные характеристики. В классическом представлении под геополимерами понимают алюмосиликатные материалы, активированные щелочными или кислотными активаторами [1, 2]. Современные основы исследования создания пористых геополимеров приведены в работах [3–5].

В работе [6] рассмотрены различные варианты изготовления пористого геополимера с твердением при различных температурах, а также при воздействии СВЧ электромагнитного поля на образец. Установлено, что при определенном сочетании температурных воздействий удается добиться прочности образца на сжатие до 10,2 МПа, что является достаточно высоким показателем. При этом при формировании геокомпозита при комнатной температуре прочность составляет всего 0,37 МПа. В работе [7] авторы получили геокомпозит с плотностью 351 кг/м³, коэффициентом теплопроводности 0,0782 Вт/(м·К) и прочностью на сжатие 0,62 МПа. Такие свойства получены при использовании 30 %-ного раствора пероксида водорода. Коллективом авторов [8] был проведен комплексный анализ структуры и свойств вспененных геополимеров, их фазовый состав, микроструктура и механические характеристики, что позволило установить взаимосвязь между структурой и свойствами материала. В работе [9] авторы получили образцы геополимера, имеющие низкую плотность и прочность от 0,73 до 1,17 МПа. В работе [10] авторы провели исследования по влиянию добавок CaO, MgO, ZnO, TiO₂, Al₂O₃, SiC и ZrO₂ на

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (соглашение № 109-03-2025-007).

характеристики геополимера на основе отходов сжигания угля. Прочность таких образцов составила от 1,35 до 2,03 МПа.

Данное исследование посвящено созданию геокомпозита при температурах окружающей среды, имеющего достаточную прочность для возможности его использования в облегченных конструкциях земляного полотна автомобильных и железных дорог, а также низкую плотность и теплопроводность для использования в качестве теплоизоляционного материала для устойчивого строительства в районах со сложными условиями строительства и эксплуатации. Предлагаемый материал относится к пористым геокомпозитам на основе органических полимерных композиций и матрицы из глинистых грунтов.

Методы. Оптическая и электронная микроскопия

Для оценки характеристик пористой структуры геокомпозита и анализа элементного состава глинистого грунта и полученного вспененного материала использованы методы оптической и электронной микроскопии, дополненные применением энергодисперсионного рентгеновского детектора.

Микроизображения образцов в оптическом диапазоне получены с помощью оптического микроскопа ЛОМО БИОЛАМ Р12 с цифровой насадкой DCM-310, цифрового микроскопа Levenhuk DTX90 с камерой 5 МП. Макросъемка выполнена цифровой камерой 64 МП. Поскольку исследуемые образцы имеют микрорельеф, то для данных с оптических микроскопов были выполнены процедуры обработки, обеспечивающие четкость снимков на всех фокусных расстояниях. Для этих же типов микроскопов выполнялась специальная процедура пробоподготовки, которая заключалась в выполнении шлифовки исследуемой плоскости образца. На подготовленных образцах выбирались несколько областей от 3 до 5, где производилась послойная съемка с последующим получением объединенного изображения.

Электронная микроскопия выполнялась с использованием электронного сканирующего микроскопа ZEISS EVO MA 18, оснащенного энергодисперсионным рентгеновским детектором (EDAX) модели X-Max 50N. Ускоряющее напряжение варьировалось от 2 до 10 kV. Съемка осуществлялась при низком вакууме, пробы предварительно не подвергались процедуре напыления.

Определение теплопроводности

Теплопроводность исходного грунта и полученного геокомпозита осуществлялась прибором ИТП-МГ4, который создает стационарный тепловой поток, проходящий через плоский образец определенной толщины в определенном направлении с последующим измерением плотности теплового потока и температуры противоположной грани. Размеры образцов составляли 100 на 100 мм, толщина образцов составляла 18 мм.

Определение прочности

Прочность подготовленных образцов геокомпозитов на сжатие определялась в лабораторных условиях с использованием автоматизированного вычислительного комплекса «АСИС», обеспечивающего статическую нагрузку на поверхность образца в условиях одноосного сжатия. Подготовленные образцы-кубы с гранями 4 см предварительно осматривались, измерялись, взвешивались. Для обеспечения плоскостности опорных поверхностей и перпендикулярности смежных граней образцов проводилась их торцовка и шлифование. Нагружение образцов проводилось непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки 1 мм/мин. При разрушении образца (наличие трещин в образце) либо при отсутствии нарастания разрушающей нагрузки установка разгружалась и фиксировалось значение нагрузки. Прочность образцов рассчитывалась, как отношение предельной разрушающей нагрузки на площадь опирания штока пресса на поверхность образца.

Материалы. Глинистый грунт

Одним из компонентов геокомпозита является глинистый грунт, который имеет следующие основные физические характеристики, определенные в лабораторных условиях: влажность на границе раскатывания (W_p) – 19,08 %, влажность на границе текучести (W_L) – 40,67 %, число пластичности (I_p) – 21,59 %, оптимальная влажность (W_{opt}) – 19,50 %, плотность частиц грунта (ρ_s) – 2,76 г/см³. Исследуемый грунт классифицируется, как глина легкая, пылеватая.

Полиуретан

В качестве полимера использован двухкомпонентный полиуретан с временем жизни 3–4 минуты и временем полного отверждения 24–48 часов. Твердость полученного пластика по Шор Д составляет 75–80. Полиуретаны – это синтетические полимеры, содержащие в основе цепи макромолекулы уретановых групп, которые в общем виде можно представить следующим выражением $-\text{HN}-\text{C}(\text{O})-\text{O}-$.

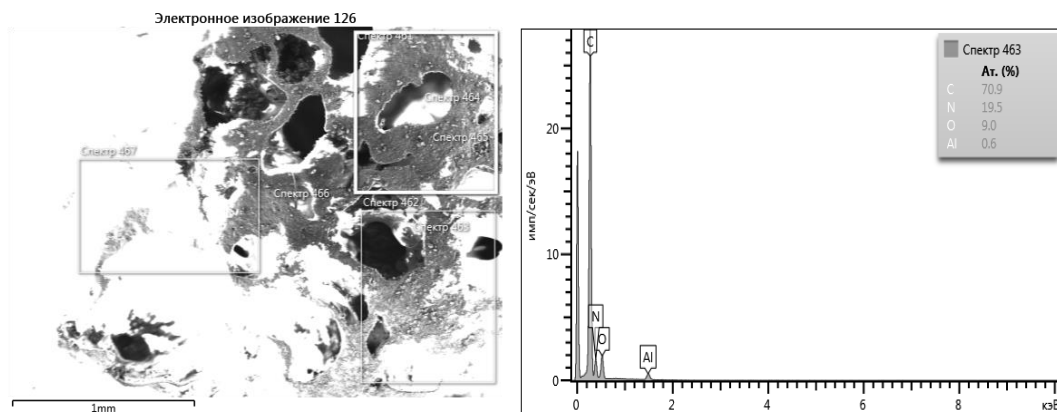


Рис. 1. Расположение участков для элементного анализа и спектр одного из них

Выполненный элементный анализ в затвердевшем полимере показал наличие в составе пробы С (66 %), N (9 %), O (22 %). Всего было проанализировано 7 областей и локальных участков. Области образца, в которых получены спектры и статистические характеристики по выбранным участкам, приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики концентраций элементов на выбранных участках пробы портландцемента (%)

Концентрация	С	N	O
Максимальная	72,87	19,52	31,63
Минимальная	56,28	2,91	9,00
Усредненная	65,73	9,20	21,97
Стандартное отклонение	5,35	5,26	7,38

Экспериментально установлено, что для создания полимера подходят все виды глинистых грунтов, имеющие влажность от 10 до 50 %. Регулирование пористости вспененного геокомпозитного материала осуществлялось изменением соотношения пропорций глинистых грунтов и полиуретанов, а также исходной влажностью глинистого грунта. При изготовлении образцов – производилось смешиванием глинистых грунтов и полиуретана в заданном соотношении, после чего происходила реакция вспенивания и полимеризации (твердения). Смешивание происходило в специальной форме (рис. 2), стенки которой были обработаны для предотвращения прилипания геокомпозита. В зависимости от применяемых компонентов и их свойств скорость протекания реакции может отличаться и составлять от нескольких минут (при двухкомпонентных составах полиуретана с использованием затвердителя), как в рассматриваемом случае, до нескольких часов (при использовании однокомпонентных связующих). Вспенивание и отверждение происходило при естественной влажности грунта, близкой к оптимальным и естественным температурам окружающей среды без дополнительных термических воздействий. Время набора прочности после отверждения зависит от типа связующего и влажности глинистого материалов. В рассматриваемой композиции твердение происходило в течение 2–3 минут.



Рис. 2. Процесс формирования геокомпозита в металлической форме

При формировании геокомпозита протекала достаточно активная химическая реакция с выделением тепла и газов, которые формировали поры в образце в процессе его твердения. Так, например, объем смеси после протекания реакции и формирования геокомпозита с исходной влажностью глинистого грунта 20 % и содержанием полиуретана 50 % увеличился почти в 3 раза. После твердения образец извлекался из формы, с последующим разделением образца на фрагменты для испытаний на теплопроводность и прочность.

Структура и свойства геокомпозита

Полученный геокомпозит (рис. 3) представляет из себя матрицу из глинистого грунта, связанную полиуретаном холодного твердения, в которой при затвердевании сформированы закрытые поры.



Рис. 3. Внешний вид пористого геокомпозита

Геокомпозит после изготовления представляет собой материал, имеющий пористую структуру комбинированного закрытого и открытого типа, обладающего пониженной плотностью и достаточно высокой прочностью на сжатие, что дает возможность применять данный материал для строительства облегченных конструкций земляного полотна.

Микроструктура

Фотографии поверхности среза образца были обработаны в программе Gwyddion, с помощью которой были выделены поры на изображении, определена их площадь и их средний размер. Так площадь пор образца, приведенного на рис. 4, составила 33,8 %, а средний размер зерна 0,53 мм.

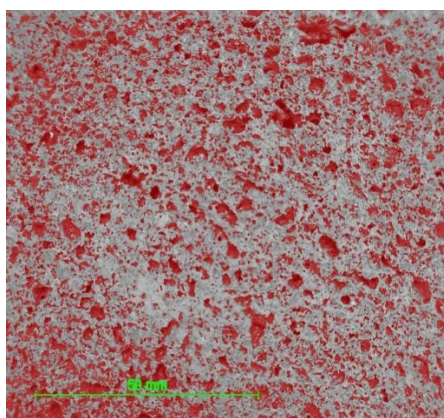


Рис. 4. Структура пор образца геокомпозита

Для оценки влияния концентрации полимера и влажности глинистого грунта на плотность и прочностные характеристики материала была подготовлена серия образцов при двух концентрациях (30 и 50 % полимера) и трех влажностях глинистого грунта (20–40 %). Для каждого сочетания изменяемых параметров получены образцы, которые были подготовлены шлифовкой поверхности с целью дальнейшего микроскопического исследования. Анализировались поры размером более 0,2 мм. Усредненные значения содержания пор приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Таблица 2

Усредненная пористость рассматриваемых образцов геокомпозита

Влажность грунта (W), %	Объем пор образца, %	
	Соотношение глинистого грунта и полимера 50 % (глина)/50 % (полимер)	Соотношение глинистого грунта и полимера 70 % (глина)/30 % (полимер)
20	33,46	18,57
30	34,13	1,63
40	1,49	3,56

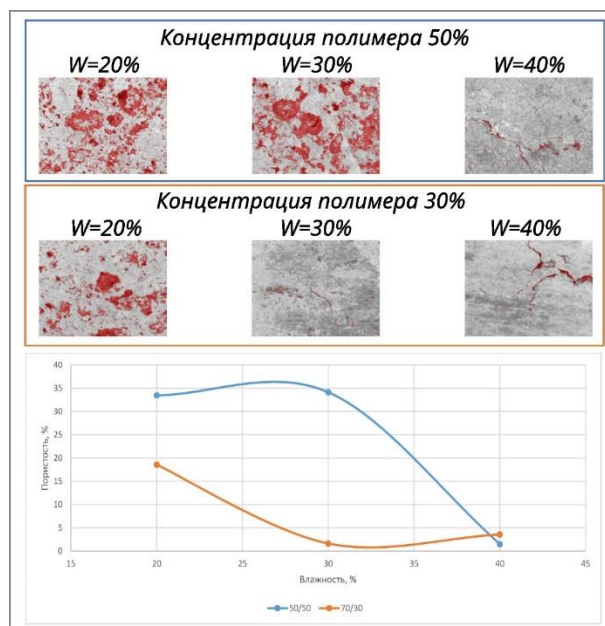


Рис. 5. Внешний вид и размеры пор рассматриваемых образцов геокомпозита

Из изображений видно, что при большей концентрации полимера объем сформированных крупных пор больше, а при высоких влажностях, формирование крупных пор значительно сокращается. Так при влажности более 40 % и большей концентрации полимера, крупные округлые поры практически отсутствуют, а при меньшей концентрации такие процессы происходят уже при влажности более 30 %.

Для этих же образцов определены средние значения размеров пор. Средний размер рассчитывается усреднением стороны эквивалентного квадрата. Под стороной эквивалентного квадрата понимается сторона квадрата с той же площадью проекции, что и у поры. Значения для рассматриваемых образцов приведены в табл. 3. Образцы с влажностью 40 % при обеих концентрациях и образец при влажности 20 % и концентрации полимера 30 % не формируют округлые поры, поэтому данные по этим образцам не включены в табл. 3.

Таблица 3

Средний размер пор

Влажность грунта (W), %	Средний размер пор, мм	
	Соотношение глинистого грунта и полимера 50 % (глина)/50 % (полимер)	Соотношение глинистого грунта и полимера 70 % (глина)/30 % (полимер)
20	0,53	0,48
30	0,56	-

На рис. 6 приведены изображения, полученные на оптическом микроскопе для двух образцов при концентрации полимера 30 (рис. 6 а) и 50 (рис. 6 б) процентов с исходной влажностью глинистого грунта, равной 20 %.

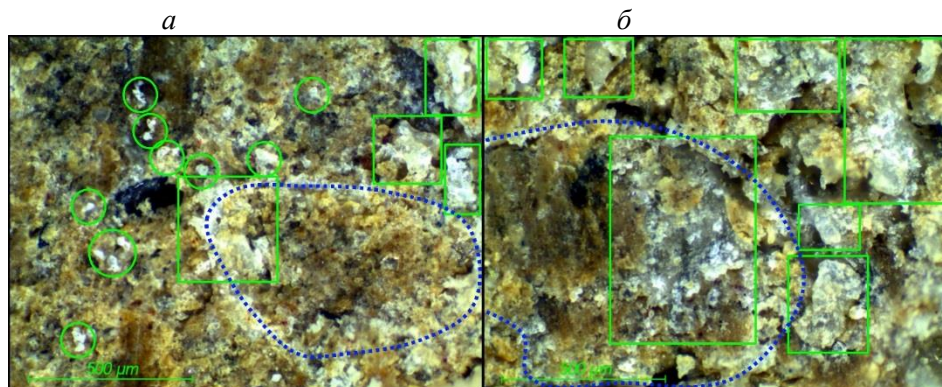


Рис. 6. Микроизображение геокомпозита с исходной влажностью глинистого грунта $W = 20 \%$

Зелеными кругами на рис. 6, а отмечены частички полимера, расположенные на поверхности пробы. Размер мелких частиц составляет в среднем порядка 40 микрон. На рис. 6, б такие частички отсутствуют. Зелеными прямоугольниками выделены большие участки, где визуальнo можно наблюдать более крупные комки полимера с небольшими примесями глинистых частиц. Синими прерывистыми линиями выделены полимерные жилы, сформированные вокруг агрегаций глинистого грунта.

Выполненный элементный анализ пробы геокомпозита с концентрацией полимера 50 % показал наличие в составе пробы С, О, Mg, Al, Si, S, К, Са, Fe. Наибольший вклад в пробу вносят кислород (33 %), углерод (26 %), кремний (17 %), алюминий (7 %) и кальций (9 %). Остальные элементы вносят незначительный вклад в состав пробы. Всего было проанализировано 12 областей и локальных участков. Статистические характеристики по выбранным участкам приведены в табл. 4.

Таблица 4

Статистические характеристики выбранных участков

Статистика	С	О	Mg	Al	Si	S	К	Са	Fe
Максимальная	63,26	55,54	1,89	12,28	40,00	0,17	7,71	45,87	25,21
Минимальная	6,30	12,17	0,28	1,80	4,67	0,10	0,42	0,26	0,14
Усредненная	26,23	33,44	1,05	6,62	17,10	0,14	2,45	8,56	4,41
Стандартное отклонение	14,84	16,66	0,46	2,93	10,55	0,05	2,44	14,77	7,17

Теплопроводность

Теплопроводность образцов определялась в соответствии с методикой проведения измерений теплопроводности с использованием прибора, описанного выше. В табл. 5 приведены значения эффективной теплопроводности λ испытуемых образцов. Для определения теплопроводности геокомпозита выбран образец, имеющий высокий процент пористости с исходной влажностью глинистого грунта близкой к оптимальной.

Таблица 5

Результаты измерений теплопроводности материалов

Название материала	Эффективная теплопроводность λ , Вт/м·К	Плотность ρ , г/см ³
Глина в сыпучем сухом состоянии	0,18	1,10
Глина сухая с коэффициентом уплотнения, равным 1	0,91	1,81
Глина при исходной влажности 20 % (50 % по массе образца)+полиуретан (50 % по массе образца)	0,17	0,74

Из табл. 5 видно, что по показателю плотности в сравнении с уплотненным глинистым грунтом у геокомпозита он в 2 раза меньше, а по показателю эффективной теплопроводности – более чем в 5 раз.

Прочность на сжатие

Прочность на сжатие подготовленных образцов из глинистого грунта и геокомпозита определялась в лабораторных условиях с использованием автоматизированного вычислительного комплекса «АСИС» (метод одноосного сжатия).

Образцы кубовидной формы размером 40×40×40 мм изготавливались из образца размером 100×100×100 с последующим выпиливанием образцов нужного размера и их торцовкой. Образцы нагружались со скоростью 1 мм в минуту до тех пор, пока усилие нагрузки не начинало уменьшаться, что свидетельствовало о частичном или полном разрушении образца. По отношению разрушающей нагрузки к площади верхней грани образца определялось значение прочности на сжатие. На начальной стадии нагружения образцы из геокомпозита проявляли упругие свойства и после снятия нагрузки почти в полной мере восстанавливали форму. При нагрузках, разрушающих образец, когда на боковой поверхности образцовывались трещины, образец сохранял целостность и не разрушался, а после снятия нагрузки частично восстанавливал исходную форму. Усредненные значения прочности образцов на сжатие R (МПа) приведены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что снижение влажности исходного глинистого грунта и увеличение концентрации двухкомпонентного полиуретана приводит к уменьшению плотности полученного геокомпозита. Так снижение влажности исходного глинистого грунта на 20 % приводит к уменьшению плотности на 19 % при 30 % концентрации полимера в смеси и на 35 % – при 50 % концентрации полимера в смеси. В отличие от уплотненного глинистого грунта геокомпозит имеет плотность ниже в 1,4–2,5 раза. Уменьшение влажности сказывается и на прочности на сжатие образца. Так уменьшение влажности исходного глинистого грунта на 20 % приводит к увеличению прочности на сжатие в 2,3 раза при 30 % концентрации полимера в смеси и в 1,3 раза – при 50 % концентрации полимера в смеси. Учитывая достаточно большой диапазон изменения плотности и прочности образцов геокомпозита, материал может иметь достаточно широкий спектр применения, как в качестве теплоизоляционного материала, так и в качестве материала для облегченных грунтовых конструкций.

Таблица 6

Результаты измерений прочности на сжатие

Название материала	Прочность на сжатие R , МПа	Плотность ρ , г/см ³
Глина сухая с коэффициентом уплотнения, равным 1	2,20	1,81
Глина при исходной влажности 20 % (50 % по массе)+полиуретан (50 % по массе)	1,18	0,74
Глина при исходной влажности 30 % (50 % по массе)+полиуретан (50 % по массе)	1,28	0,73
Глина при исходной влажности 40 % (50 % по массе)+полиуретан (50 % по массе)	1,39	1,17
Глина при исходной влажности 20 % (70 % по массе)+полиуретан (30 % по массе)	2,98	1,01
Глина при исходной влажности 30 % (70 % по массе)+полиуретан (30 % по массе)	2,33	1,10
Глина при исходной влажности 40 % (70 % по массе)+полиуретан (30 % по массе)	1,29	1,20
Глина при исходной влажности 50 % (70 % по массе)+полиуретан (30 % по массе)	0,60	1,33
Напряжения, возникающие на основной площадке и в основании 16-метровой насыпи, МПа		
Напряжения, возникающие в основании насыпи высотой 16 м, сложенной из глинистого грунта	~0,32	
Допустимые напряжения на основной площадке земляного полотна	0,08–0,12	

Выводы

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

– Экспериментально проверена возможность формирования геокомпозита из глинистых грунтов в широком диапазоне исходной влажности. Установлено, что влажность глинистого грунта, близкая к оптимальной, дает наилучшее сочетание плотности и прочности готового геокомпозита.

– Оценена возможность формирования геокомпозита из глинистых грунтов с влажностями на границе текучести и выше. Такая особенность позволяет разработать технологию стабилизации избыточно увлажненных грунтов.

– При повреждении геокомпозитного блока при транспортировке, укладке или эксплуатации, поврежденный блок имеет высокую ремонтпригодность. Восстановление осуществляется тем же полимерным составом, который использовался при изготовлении геокомпозита, путем заполнения полимером поврежденного участка.

– Геокомпозит обладает упругими свойствами и способен практически полностью восстанавливать форму при снятии незначительных нагрузок и частично восстанавливать форму после снятия нагрузок, близких к пределу прочности. При этом даже после разрушения геокомпозит способен воспринимать нагрузку.

– Предел прочности рассматриваемых образцов находится в пределах от 0,60 до 2,98 МПа, что позволяет использовать материал как на основной площадке земляного полотна, так и в основании насыпи.

– По показателю плотности в сравнении с уплотненным глинистым грунтом это значение у геокомпозита в 2 раза меньше, а по показателю эффективной теплопроводности – более чем в 5 раз.

– Пористость геокомпозита регулируется значением влажности исходного глинистого грунта и концентрацией полиуретана в подготовленной смеси. Учитывая большой диапазон изменения плотности и прочности образцов геокомпозита, материал может иметь достаточно широкий спектр применения как в качестве теплоизоляционного материала, так и в качестве материала для облегченных грунтовых конструкций.

Упругие свойства геокомпозита позволяют использовать данный материал для формирования виброгасящего слоя на основной площадке земляного полотна при организации скоростного и высокоскоростного движения.

Список литературы

1 **Bai, C.** Processing, properties and applications of highly porous geopolymers : a review / C. Bai, P. Colombo // *Ceram. Int.*, 44 (2018). – P. 16103–16118. – DOI 10.1016/j.ceramint.2018.05.219.

2 Porous geopolymer composites : a review / X. Zhang, C. Bai, Y. Qiao [et al.] // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 150 (2021), Article 106629. – DOI 10.1016/j.compositesa.2021.106629.

3 Porous geopolymer composites: A review / X. Zhang, C. Bai, Y. Qiao [et al.] // *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*. – 2021. – V. 150. – Article 106629. – DOI 10.1016/j.compositesa.2021.106629.

4 **Łach, M.** Geopolymer Foams – Will They Ever Become a Viable Alternative to Popular Insulation Materials – A Critical Opinion / M. Łach // *Materials*. – 2021. – V. 14 (13). – P. 3568. – DOI 10.3390/ma14133568.

5 **Novais, R. M.** Geopolymer foams: An overview of recent advancements / R. M. Novais, R. C. Pullar, J. A. Labrincha // *Progress in Materials Science*. – 2020. – V. 109. – P. 100621. – DOI 10.1016/j.pmatsci.2019.100621.

6 Исследование температурно-временных режимов низкотемпературного синтеза вспененных

References

1 **Bai, C.** Processing, properties and applications of highly porous geopolymers : a review / C. Bai, P. Colombo // *Ceram. Int.*, 44 (2018). – P. 16103–16118, DOI 10.1016/j.ceramint.2018.05.219.

2 Porous geopolymer composites : a review / X. Zhang, C. Bai, Y. Qiao [et al.] // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 150 (2021), Article 106629, DOI 10.1016/j.compositesa.2021.106629.

3 Porous geopolymer composites : a review / X. Zhang, C. Bai, Y. Qiao [et al.] // *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*. – 2021. – V. 150. – Article 106629. – DOI 10.1016/j.compositesa.2021.106629.

4 **Łach, M.** Geopolymer Foams – Will They Ever Become a Viable Alternative to Popular Insulation Materials – A Critical Opinion / M. Łach // *Materials*. – 2021. – V. 14 (13). – P. 3568. – DOI 10.3390/ma14133568.

5 **Novais, R. M.** Geopolymer foams : An overview of recent advancements / R. M. Novais, R. C. Pullar, J. A. Labrincha // *Progress in Materials Science*. – 2020. – V. 109. – P. 100621. – DOI 10.1016/j.pmatsci.2019.100621.

6 Study of temperature-time regimes of low-temperature synthesis of foamed geopolymers based on solid fuel energy waste / L. V. Klimova,

геополимеров на основе отходов твердотопливной энергетики / Л. В. Климова, В. С. Романюк, Ю. А. Бостанов [и др.] // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2025. – Т. 12, № 1. – С. 73–79. – DOI 10.24892/RIJE/20250112.

7 **Изварин, А. И.** Исследование порообразования теплоизоляционного геополимера на основе золошлаковых отходов / А. И. Изварин, Е. А. Яценко, Д. Н. Изварина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 77–82. – DOI 10.17213/1560-3644-2024-2-77-82.

8 Исследование структуры и свойств вспененных геополимерных материалов на основе отходов твердотопливной энергетики / Е. А. Яценко, А. И. Изварин, С. Чаудхари, В. С. Яценко // Вестник современных технологий. – 2023. – № 4 (32). – С. 35–40. – EDN HZYXUC.

9 Study on the Curing and Foaming of Surfactant-Modified Geopolymer Gels Based on Ash and Slag Waste from Coal Combustion / E. A. Yatsenko, S. V. Trofimov, B. M. Goltsman [et al.] // Gels. – 2024. – Vol. 10 (1), No. 19. – DOI 10.3390/gels10010019.

10 Recycling of Coal Combustion Waste through Production of Foamed Geopolymers with Improved Strength / E. A. Yatsenko, B. M. Goltsman, Y. V. Novikov [et al.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 23. – P. 16296. – DOI 10.3390/su152316296.

V. S. Romanyuk, Yu. A. Bostanov [et al.] // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2025. – Vol. 12, No. 1. – P. 73–79. – DOI 10.24892/RIJE/20250112.

7 **Izvarin, A. I.** Study of pore formation of heat-insulating geopolymer based on ash and slag waste / A. I. Izvarin, E. A. Yatsenko, D. N. Izvarina // Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences. – 2024. – No. 2. – P. 77–82. – DOI 10.17213/1560-3644-2024-2-77-82.

8 Study of the structure and properties of foamed geopolymer materials based on solid fuel energy waste / E. A. Yatsenko, A. I. Izvarin, S. Chaudhary, V. S. Yatsenko // Bulletin of modern technologies. – 2023. – No. 4 (32). – P. 35–40. – EDN HZYXUC.

9 Study on the Curing and Foaming of Surfactant-Modified Geopolymer Gels Based on Ash and Slag Waste from Coal Combustion / E. A. Yatsenko, S. V. Trofimov, B. M. Goltsman [et al.] // Gels. – 2024. – Vol. 10 (1), No. 19. – DOI 10.3390/gels10010019.

10 Recycling of Coal Combustion Waste through Production of Foamed Geopolymers with Improved Strength / E. A. Yatsenko, B. M. Goltsman, Y. V. Novikov [et al.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 23. – P. 16296. – DOI 10.3390/su152316296.

V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, M. V. Okost, T. P. Gorbacheva

POROUS GEOCOMPOSITE MATERIAL FOR CHALLENGING CONSTRUCTION CONDITIONS

Abstract. This paper explores the feasibility of developing a new geocomposite material based on clay soils used in railway subgrade construction. This material possesses properties suitable for use as a structural element in earth structures constructed in challenging conditions, where materials and structures require properties such as reduced weight and thermal conductivity while ensuring the stability of the subgrade and its foundation. The proposed material is a geocomposite consisting of clay soil and polyurethane, which, when manufactured, will form a porous structure and will not require additional exposure to high temperatures.

Keywords: clay soil, geocomposite, subgrade, polyurethane, thermal conductivity, light-weight structures.

For citation: Porous geocomposite material for challenging construction conditions / V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, M. V. Okost, T. P. Gorbacheva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 71–80. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_71.

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

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

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

Горбачева Татьяна Петровна

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
ассистент,
e-mail: nanami1995@bk.ru

Okost Maksim Victorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Railway Survey, Design and Construction”,
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

Gorbacheva Tatyana Petrovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Track and Track Facilities”,
Assistant,
e-mail: nanami1995@bk.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.225 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_81

*А. В. Дмитренко, С. М. Наурузбаев***ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СРЕДНЕГО ВЕСА ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА РАЗМЕРЫ ИХ ДВИЖЕНИЯ ПО МАГИСТРАЛЬНЫМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ЛИНИЯМ**

Аннотация. Исследованием выявлено, что традиционная стратегия освоения растущих перевозок путём увеличения веса поездов ограничена из-за особенностей грузопотоков и инфраструктуры. Определено, что ключевым фактором при планировании является не максимальный вес, а соответствие между весовой нормой, структурой грузопотоков и длиной станционных путей. Обоснована необходимость перехода к комплексному управлению пропускной способностью, сочетающему ситуационное повышение веса поездов с интенсификацией размеров движения, оптимизацией графиков и другими организационно-технологическими мерами. Предложены рекомендации по переходу к комбинированной стратегии управления пропускной способностью участков, сочетающей оптимизацию весовых норм с интенсификацией размеров движения, внедрением интеллектуальных систем управления и другими организационно-технологическими мерами, что позволит гибко осваивать растущие объёмы перевозок в условиях существующих инфраструктурных ограничений.

Ключевые слова: грузопотоки, вагонопотоки, статическая нагрузка, железнодорожный транспорт, средний вес, размеры движения.

Для цитирования: Дмитренко, А. В. Оценка влияния среднего веса грузовых поездов на размеры их движения по магистральным железнодорожным линиям / А. В. Дмитренко, С. М. Наурузбаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 81–89. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_81.

Введение

Цель исследования – установление эффективных условий и границ повышения провозной способности магистральных железнодорожных линий за счёт увеличения среднего веса грузовых поездов. Задачи исследования: оценить влияние среднего веса грузовых поездов на размеры их движения и эксплуатационные показатели, определить границы эффективности стратегии увеличения весовых норм в современных условиях, разработать алгоритм выбора мероприятий по усилению пропускной способности за счет организации движения тяжеловесных поездов. Методы исследования: анализ статистических данных и динамики показателей, сравнительный анализ сценариев с ограничениями и без ограничений по длине станционных путей и системный подход к оценке эксплуатационных решений.

С появлением железнодорожного транспорта сразу же возник вопрос о разработке мер, обеспечивающих освоение возрастающих объемов перевозок для развивающихся районов страны. Данная ситуация была обусловлена тем, что в начальный период эксплуатации вновь построенные железнодорожные линии характеризовались однопутной конструкцией, короткой длиной станционных путей и низкими весовыми нормами грузовых поездов. В условиях малых начальных объемов перевозок увеличение среднего веса грузового поезда, особенно на однопутных линиях, представляло собой один из наиболее эффективных методов освоения растущих грузопотоков железнодорожной сети страны. Однако на современном этапе технического прогресса средний вес грузовых поездов стал ограничиваться структурой грузопотоков в грузовом направлении, которые характеризуются величиной веса, приходящегося на один метр длины груженого состава.

Технический прогресс в экономической и хозяйственной деятельности населения и предприятий стран мира, широкомасштабное использование внешних источников энергии позволили создать технологии перевозок с меньшими капитальными затратами и эксплуатационными расходами. На первых порах существования железных дорог одним из важнейших путей эксплуатации магистральных линий явилось дальнейшее систематическое повышение среднего веса грузовых поездов. Это направление, известное как тяжеловесное движение, сохраняет свою стратегическую актуальность и в современную эпоху [1].

Аспекты повышения веса грузовых поездов отражены в работах С. В. Бушуева, С. М. Захарова,

Д. Ю. Левина, Л. А. Мугинштейна, К. П. Шенфельда и др. Вопросам организации тяжеловесного движения в 2024 году было посвящено заседание Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». На данном заседании было отмечено увеличение среднего веса поезда за последние десять лет (рис. 1) и количества отправляемых поездов весом свыше 7 тыс. т (рис. 2).

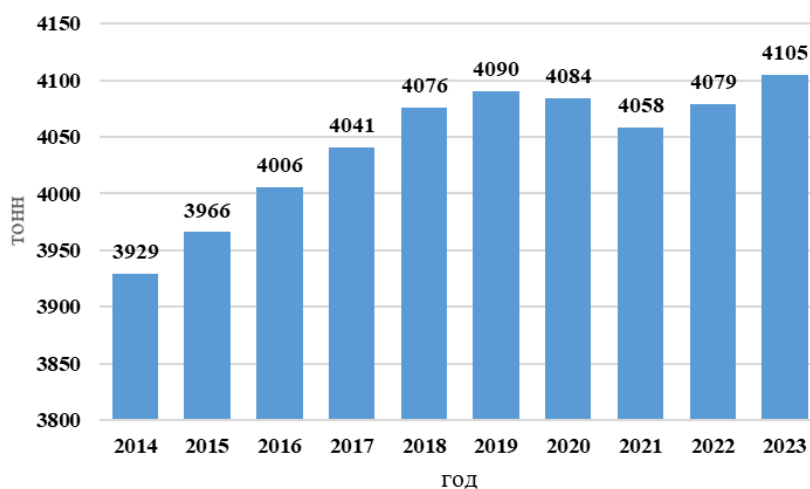


Рис. 1. Средний вес грузового поезда, т

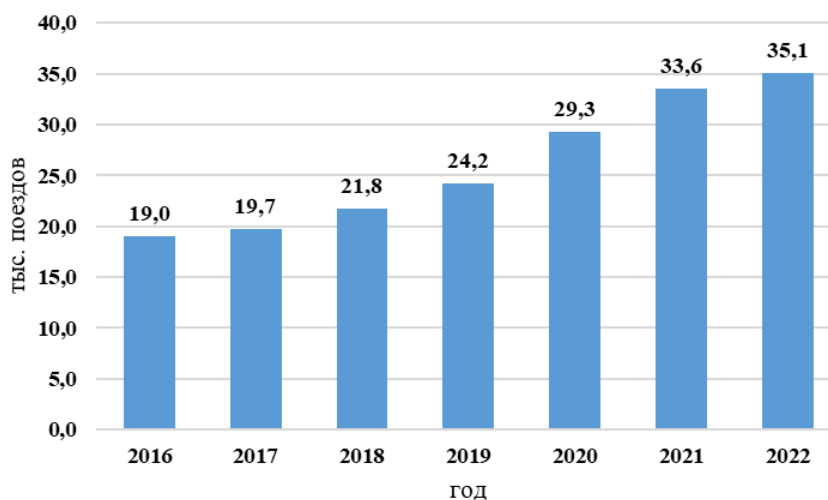


Рис. 2. Отправление по сети ОАО «РЖД» поездов свыше 7 тыс. т, тыс. поездов

Однако остается большое количество научно-технологических задач организации тяжеловесного движения. Так, в генеральной схеме развития сети железных дорог ОАО «РЖД» до 2030 года и на перспективу до 2036 года выделены полигоны обращения тяжеловесных поездов весом 7100, 8000, 9000, а также до 10 500 т (рис. 3). Предусматривается пропуск соединенных поездов весом до 14 200 т.

Нужно отметить, что на начальном периоде функционирования железнодорожного транспорта были в основном крытые двухосные вагоны с тарой в 10 т и статической нагрузкой в 20 т на вагон. При наличии только 2-осных вагонов нагрузка грузового поезда на один погонный метр пути составляла всего 3,75 т. Для существующей полезной длины станционных путей в 1050 м данный состав грузового поезда из двухосных вагонов составлял бы всего вес в 3750 т. Для данной конструкции подвижного состава нагрузка на ось вагонов составляла всего 15 т. По сравнению с начальным периодом на современном этапе технического прогресса появились новые четырехосные вагоны со статической нагрузкой в 65 т на вагон. Вместо малоэффективных паровозов, появились новые более мощные электровозы и тепловозы. Появилась возможность водить несколько локомотивов одной локомотивной бригадой. На всех станциях решающих магистральных железнодорожных линий было произведено удлинение станционных путей с 720 до 850 и 1050 м.

Эмпирические данные свидетельствуют о наличии зависимости средней массы грузовых поездов от установленных весовых норм на железнодорожных линиях. Динамика данного соотношения детерминирована технологическим развитием и оптимизацией эксплуатации локомотивного парка. На

протяжении нескольких десятилетий операционные преимущества формирования тяжеловесных поездов демонстрировали более высокую эффективность по сравнению с капиталовложениями в удлинение станционных путей.



Рис. 3. Полигоны обращения тяжеловесных поездов весом 7100, 8000, 9000 т

При этом модернизация верхнего строения пути (ВСП) осуществлялась незначительными темпами вследствие высокой ресурсоемкости. Существенное влияние на массовые показатели оказывает неоднородность перевозимых грузов по удельной плотности. На начальном этапе развития железнодорожного транспорта, в условиях ограниченной мощности паровозов, перевозка составов с высокоплотными грузами требовала применения кратной тяги с двумя локомотивными бригадами, что повышало эксплуатационные расходы.

Внедрение средств автоматики и телемеханики создало технологические предпосылки для управления сдвоенными составами одной локомотивной бригадой [2]. Одновременно оснащение вагонов автосцепкой повышенной прочности позволило обеспечить безопасность движения поездов увеличенной массы и длины. Изучение развития технологий указывает на то, что ключевым лимитирующим фактором роста средней массы поездов выступает ограниченная длина станционных путей. Данное ограничение обусловлено комплексом причин (рис. 4).



Рис. 4. Причины недостаточной длины станционных путей

Последовательное удлинение станционных путей до стандартизированных значений (600, 720, 850 и 1050 м) обеспечило увеличение пропускной способности примерно в 1,8 раза. Этот эффект достигнут за счет перехода от двухосных к четырехосным вагонам при сохранении постоянной длины состава. В текущий период на большинстве магистральных линий, включая электрифицированные участки Транссибирской магистрали, действует стандарт длины станционных путей 1050 м. Следует учитывать, что исторически железнодорожная инфраструктура формировалась на периферии городских агломераций, где существовал значительный земельный резерв. В современную эпоху большая часть грузовых станций оказалась расположенной в застроенной части крупных городов. Организация вождения составов в границах крупных городов повышенного веса или длины грузовых поездов стала затруднительной мерой.

На показатель «средний вес грузовых поездов» значительное влияние оказывает структура грузопотоков. Это средний вес тары и грузов в вагонах, приходящихся на 1 пог. м длины всего грузового поезда. Данный технико-экономический показатель исследуется в организации функционирования железнодорожного транспорта с учетом особенностей в развитии технического прогресса на железнодорожном транспорте [3, 4].

Основная часть

Цель исследования – установление эффективных условий и границ повышения провозной способности магистральных железнодорожных линий за счёт увеличения среднего веса грузовых поездов. При этом в качестве целевого задания для каждой магистрали рассматривается условие следования полновесных или полносоставных грузовых поездов. Задачи исследования: оценить влияние среднего веса грузовых поездов на объёмы их движения и эксплуатационные показатели, определить границы эффективности стратегии наращивания весовых норм в современных условиях, разработать алгоритм организации движения тяжеловесных поездов. Методы исследования: анализ статистических данных и динамики показателей, сравнительный анализ сценариев с ограничениями и без ограничений по длине станционных путей и системный подход к оценке эксплуатационных решений.

На практике наблюдается значительная доля легковесных грузов. Широкое распространение контейнерных перевозок привело к ситуации, когда фактическая масса грузовых поездов зачастую существенно ниже нормы, установленной для полносоставных составов. В данных условиях степень использования грузоподъёмности вагонов оказывается ниже по сравнению с гипотетическим сценарием, при котором по магистральной железнодорожной линии курсировали бы исключительно полновесные или полносоставные поезда. В этом случае нагрузка от грузопотока, а именно масса каждого конкретного поезда, приходящаяся на погонный метр пути, может быть оценена по формуле (1):

$$P_{cm}^{cp} = \frac{\sum Q_{cp}^{om}}{\sum Nl}, \text{ т/пог. м,} \quad (1)$$

где $\sum Q_{cp}^{om}$ – совокупная масса грузов, отправленных с сортировочной станции за рассматриваемый период в грузовых поездах, т;

$\sum Nl$ – общий пробег составов (в условных километрах), рассчитываемый как сумма длин всех отправленных грузовых поездов, км.

Так, для Транссибирской магистрали в нечетном грузовом направлении (Новосибирск – на запад в сторону Москвы) $P_{cm}^{cp} = 4,8$ т/пог. м. Данная величина показывает, что по сравнению с нормативной нагрузкой, равной 6,0 т на пог. м, средняя погонная нагрузка вагонов в грузовом направлении оказывается ниже нормы на 1,2 т/пог. м пути.

Следует учитывать, что в технико-экономических расчетах, в зависимости от характера конструкции локомотивов, норма веса грузовых поездов может иметь самую различную величину в 4800 т при норме в 6000 т.

При проведении технико-экономических расчетов необходимо учитывать показатель «средний вес грузового поезда», значение которого определяется на основе установленной нормы для конкретной магистральной железнодорожной линии, в рассматриваемом случае – двухпутной. Она может быть в интервале с шагом в 1000 т. В данном случае с каждым интервалом величина условно установленной нормы будет возрастать на 1000 т. В практических условиях – выполнением моделирования процесса использования локомотивов различной величины: в 6, 8 и в 12 осей.

Для каждого из этих вариантов на каждую дополнительную ось фактический возможный вес грузовых поездов будет возрастать на 500 т. Тогда при наличии шестиосных локомотивов его фактический вес будет составлять около 3000 т. При этом длина состава грузовых неполновесных составов грузовых поездов будет составлять

$$P_6 = 500 \cdot n_{oc}, \text{ м.} \quad (2)$$

Для шести осей в локомотиве средний вес грузовых поездов будет возрастать, и длина поезда составит:

$$l_6 = \frac{Q_n}{P_{cm}^{cp}} = \frac{3000}{4,8} = 625 \text{ м,} \quad (3)$$

где 3000 – весовая норма грузовых поездов при наличии полезной длины станционных путей в 1050 м.

В случае наличия восьмиосных локомотивов для нормы веса составов грузовых поездов возможной длины или неполновесных длина будет следующей:

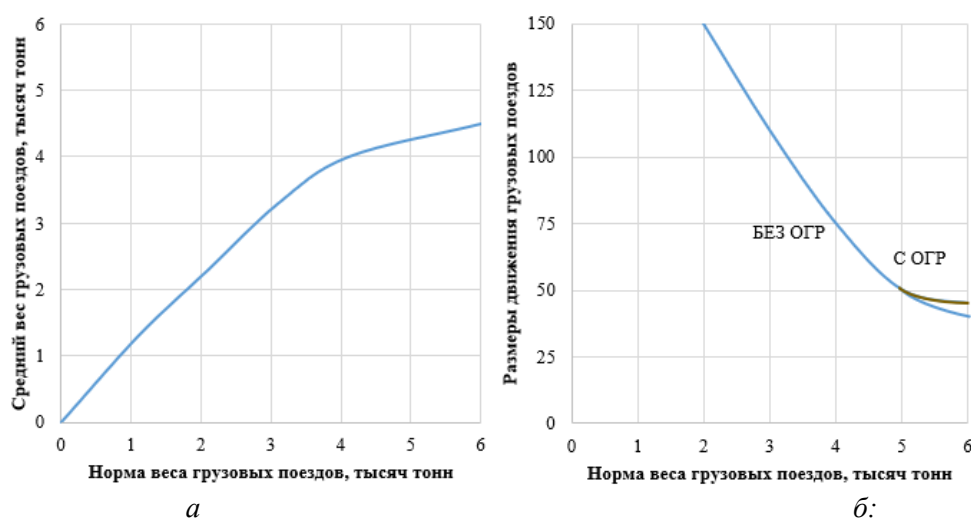
$$l_8 = \frac{Q_n}{P_{cm}^{cp}} = \frac{4000}{4,8} = 833 \text{ м.} \quad (4)$$

В случае наличия в составах только восьмиосных локомотивов средняя величина прироста состава будет составлять

$$\Delta l_{12} = 833 - 625 = 208 \text{ м.} \quad (5)$$

При замене 8-осных локомотивов на 12-осные средняя длина составов грузовых поездов возрастает только на 167 т, а средний вес увеличивается на 800 т при росте весовой нормы на 2000 т. В целом величина среднего фактического веса составов грузовых поездов будет ограничиваться установленной нормативной длиной станционных путей в 1050 м.

На рис. 5, а представлена зависимость среднего веса грузовых поездов от структуры грузопотоков на Транссибирской магистрали при варьировании весовой нормы. Для существующей структуры грузопотоков Транссибирской магистрали, составляющей 4,8 т/пог. м, на рис. 5 представлена зависимость среднего веса грузовых поездов от степени использования весовой нормы, построенная на основе исходных данных по магистрали. Как показано на рис. 5, б, для исходного нормативного веса состава характерны максимальные размеры движения.



БЕЗ ОГР – в случае отсутствия ограничений в длине станционных путей;
С ОГР – в варианте ограничений в длине станционных путей в 1050 м.

Рис. 5. Зависимость среднего веса составов грузовых поездов и размеров движения от величины весовой нормы для имеющейся структуры вагонопотоков

Однако на начальном этапе функционирования линии последующее увеличение среднего веса поездов, даже в незначительной степени, обуславливает резкое сокращение интенсивности движения, что является эффективным механизмом для освоения возрастающих грузопотоков.

В новых условиях становится целесообразным осваивать растущие объемы перевозок за счет повышения размеров движения грузовых поездов и сокращения при этом суммарных расходов за счет организационно-технологических мер [5–7].

Таким образом, проведенный анализ демонстрирует, что традиционная стратегия освоения растущих перевозок за счет постоянного увеличения среднего веса грузовых поездов на современном этапе развития железнодорожного транспорта достигает предела своей эффективности. Это связано с комплексом факторов: структурой грузопотоков, насыщенными легковесными грузами, ограничениями по длине станционных путей в урбанизированной среде и высокими затратами на кардинальную реконструкцию инфраструктуры. В связи с этим перспективным направлением является переход к комплексному управлению пропускной и провозной способностью, где повышение веса поезда является лишь одним из многих инструментов, применяемым ситуационно [8–10]. Соответственно, на первый план выходят такие меры, как интенсификация размеров движения, внедрение интеллектуальных систем управления перевозочным процессом, оптимизация графиков движения и развитие обходных маршрутов. Именно такой подход позволит гибко и экономически обоснованно осваивать возрастающие объемы перевозок в условиях существующих инфраструктурных и грузовых ограничений.

В рамках такого ситуационного подхода применение тяжеловесных поездов не исключается, но требует четкого алгоритма. Например, алгоритм применения тяжеловесного движения как меры увеличения пропускной и провозной способностей может включать в себя следующие этапы, приведенные на рис. 6.

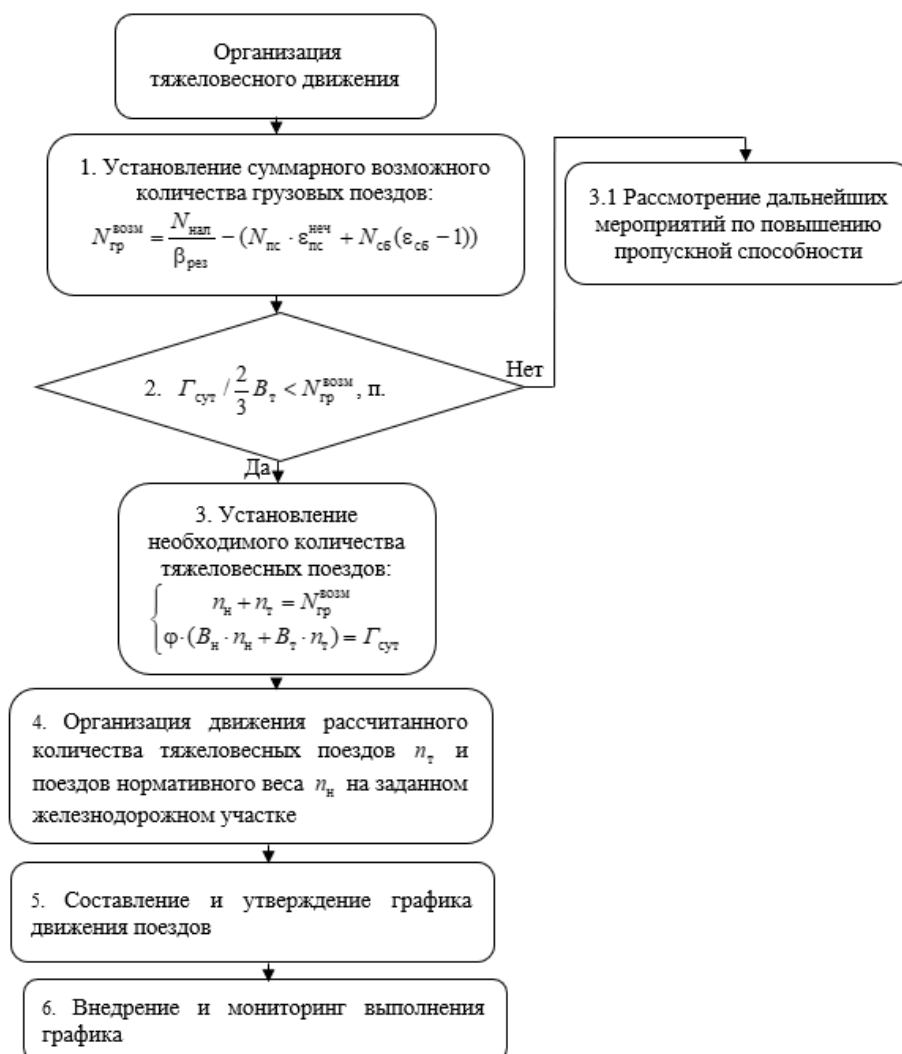


Рис. 6. Алгоритм организации тяжеловесного движения в качестве мероприятия по повышению пропускной и провозной способностей

Основные этапы:

- 1 Определение суммарного количества грузовых поездов по участку.
- 2 Анализ необходимости повышения пропускной способности. Проверяется, достаточно ли существующей пропускной способности для выполнения плана перевозок.
- 3 Определение количества тяжеловесных поездов.
- 4 Организация движения тяжеловесных поездов и поездов нормативного веса на участке.
- 5 Разработка графика движения. Составляется и утверждается график движения поездов, учитывающий движение обоих типов составов.
- 6 Внедрение и мониторинг графика движения. График вводится в действие, осуществляется постоянный контроль за его выполнением и при необходимости корректируется. Исходные данные для ввода представлены в работе [11].

Выводы

- 1 Рост среднего веса грузовых поездов на протяжении десятилетий являлся ключевым фактором минимизации эксплуатационных расходов при освоении растущих объемов перевозок.
- 2 На дальнейшую эффективность повышения среднего веса составов грузовых поездов значительное влияние оказывает структура вагонопотоков и наличие в них легковесных грузов.
- 3 На Транссибирской магистрали в западной её части на грузовом направлении наличие средней поезда погонной нагрузки в 4,8 т на пог. м ограничивает возможности новых и более мощных локомотивов, в случае дальнейшего повышения веса составов грузовых поездов.
- 4 Ключевым фактором при планировании развития магистралей становится не максимально возможный вес поезда, а соответствие между весовой нормой, структурой грузопотока и длиной станционных путей. Эффективное управление этим соответствием позволяет найти баланс между провозной способностью и экономической эффективностью.

Список литературы

- 1 **Югина, О. П.** Организация тяжеловесных поездов на Западно-Сибирской железной дороге / О. П. Югина, Ю. А. Танайно // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. – 2017. – № 46. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-tyazhelovesnyh-poezdov-na-zapadno-sibirskoy-zheleznoy-doroge> (дата обращения: 23.12.2025).
- 2 On the issue of using digital radio communications of the DMR standard to control the train traffic on Russian railways / A. Nikitin, A. Manakov, I. Kushpil, A. Kostrominov, A. Osminin // IEEE East-West Design & Test Symposium. – 2020. – P. 480–485. – DOI 10.1109/EWDTS50664.2020.9224707.
- 3 **Наурузбаев, С. М.** Математическое моделирование производственных процессов станции в условиях прогнозируемого роста грузопотоков / С. М. Наурузбаев // Цифровая трансформация транспорта : проблемы и перспективы : материалы III Международной научно-практической конференции. – Москва, 2023. – С. 274–279. – EDN ULYNFK.
- 4 Mathematical modelling of the railway station's technological parameters in transport corridor system of export traffic increasing volumes / E. V. Ryazanova, E. A. Chebotareva, S. M. Nauruzbaev, I. V. Merkulov // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 431. – P. 13. – DOI 10.1051/e3sconf/202343108014.
- 5 **Верескун, В. Д.** Оценка перспектив роста грузооборота международного транспортного коридора «Север – Юг» в современных условиях /

References

- 1 **Yugrina, O. P.** Organization of heavy trains on the West Siberian Railway / O. P. Yugrina, Yu. A. Tanaino // Collection of scientific papers of DONIZHT. – 2017. – No. 46. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-tyazhelovesnyh-poezdov-na-zapadno-sibirskoy-zheleznoy-doroge> (date of access: 23.12.2025).
- 2 On the issue of using digital radio communications of the DMR standard to control the train traffic on Russian railways / A. Nikitin, A. Manakov, I. Kushpil, A. Kostrominov, A. Osminin // IEEE East-West Design & Test Symposium. – 2020. – P. 480–485. – DOI 10.1109/EWDTS50664.2020.9224707.
- 3 **Nauruzbaev, S. M.** Mathematical modeling of the production processes of the station in the conditions of the projected growth of cargo flows / S. M. Nauruzbaev // Digital transformation of transport : problems and prospects : Materials of the III International scientific and practical conference. – Moscow, 2023. – P. 274–279. – EDN ULYNFK.
- 4 Mathematical modelling of the railway station's technological parameters in transport corridor system of export traffic increasing volumes / E. V. Ryazanova, E. A. Chebotareva, S. M. Nauruzbaev, I. V. Merkulov // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 431. – P. 13. – DOI 10.1051/e3sconf/202343108014.
- 5 **Vereskun, V. D.** Assessment of the prospects for growth of freight turnover of the international

В. Д. Верескун, Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (91). – С. 45–56. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_45.

6 **Мамаев, Э. А.** К оценке потенциала развития международного транспортного коридора : теоретические аспекты / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин, И. Д. Долгий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (80). – С. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

7 **Мамаев, Э. А.** К оценке потенциала развития международного транспортного коридора «Север – Юг» / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 86–96. – ISSN 2220-4245.

8 **Чеботарева, Е. А.** Анализ мероприятий по повышению пропускной способности участков Северо-Кавказской железной дороги / Е. А. Чеботарева // Транспорт : наука, техника, управление. – 2022. – № 1. – С. 29–34. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-01-5

9 **Покровская, О. Д.** Разработка математической модели и автоматизированного алгоритма расчёта пропускной способности / О. Д. Покровская, М. А. Марченко, Я. В. Кукушкина // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 181–196. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-181-196.

10 **Голочалов, Н. С.** Повышение пропускной способности железных дорог за счет совершенствования работы устройств автоматики и телемеханики : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 2.9.4 / Голочалов Николай Сергеевич. – Екатеринбург, 2023. – 183 с.

11 **Наурузбаев, С. М.** К вопросу оптимизации принятия решения об организации продвижения транспортных потоков на направлениях коридора «Север – Юг» / С. М. Наурузбаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 173–183. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_173.

transport corridor "North – South" in modern conditions / V. D. Vereskun, E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 3 (91). – P. 45–56. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_45.

6 **Mamaev, E. A.** On assessing the development potential of the international transport corridor : theoretical aspects / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin, I. D. Dolgiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (80). – P. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

7 **Mamaev, E. A.** On assessing the development potential of the international transport corridor "North – South" / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // Izvestia Transsiba. – 2020. – No. 3 (43). – P. 86–96. – ISSN 2220-4245.

8 **Chebotareva, E. A.** Analysis of measures to increase the throughput capacity of sections of the North Caucasian Railway / E. A. Chebotareva // Transport : science, technology, management. – 2022. – No. 1. – P. 29–34. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-01-5.

9 **Pokrovskaya, O. D.** Development of a mathematical model and automated algorithm for calculating throughput / O. D. Pokrovskaya, M. A. Marchenko, Ya. V. Kukushkina // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 181–196. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-181-196.

10 **Golochalov, N. S.** Increasing the throughput of railways by improving the operation of automation and telemechanics devices : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 2.9.4 / Golochalov Nikolay Sergeevich. – Ekaterinburg, 2023. – 183 p.

11 **Nauruzbaev, S. M.** On the issue of optimizing decision-making on organizing the movement of transport flows in the directions of the North-South corridor / S. M. Nauruzbaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 4 (96). – P. 173–183. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_173.

A. V. Dmitrenko, S. M. Nauruzbaev

ASSESSING THE IMPACT OF THE AVERAGE WEIGHT OF FREIGHT TRAINS ON THEIR TRAFFIC VOLUME ALONG MAIN RAILWAY LINES

Abstract. It was found that the traditional strategy of mastering growing traffic by increasing train weight is limited by the characteristics of freight flows and infrastructure. It was determined that the key factor in planning is not the maximum weight, but the correspondence between the weight standard, the structure of freight flows, and the length of station tracks. The need for a transition to integrated capacity management, combining situational increases in train weights with traffic intensification, schedule optimization, and other organizational

and technological measures, is substantiated. Recommendations are proposed for the transition to a combined capacity management strategy for sections, combining weight standard optimization with increased traffic volumes, the implementation of intelligent control systems, and other organizational and technological measures. This will enable the flexible development of growing traffic volumes within existing infrastructure constraints.

Keywords: freight flows, wagon flows, static load, rail transport, average weight, traffic volumes.

For citation: Dmitrenko, A. V. Assessing the impact of the average weight of freight trains on their traffic volume along main railway lines / A. V. Dmitrenko, S. M. Nauruzbaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 81–89. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_4_81.

Сведения об авторах

Дмитренко Алексей Васильевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: dmitrenkoav@mail.ru

Information about the authors

Dmitrenko Alexey Vasilievich

Siberian Transport University (STU),
Chair “Management of Operational Work”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: dmitrenkoav@mail.ru

Наурузбаев Сабир Мансурович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
аспирант,
e-mail: sabir.nauruzbayev@mail.ru

Nauruzbaev Sabir Mansurovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Management of Operational Work”,
Postgraduate Student,
e-mail: sabir.nauruzbayev@mail.ru

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин

ФОРМИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ МАЛОИНТЕНСИВНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ ПО НАБОРУ ПАРАМЕТРОВ

Аннотация. Специализация железнодорожных линий в современных условиях имеет сложную структуру, учитывающую различные показатели. В статье предложена система управления параметрами железнодорожных линий с использованием групп исходных, технологических, инфраструктурных и экономических показателей, на основе которых реализуется моделирование сценариев для функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий. Система управления параметрами железнодорожных линий основана на использовании нечеткой логики по набору правил взаимного влияния различных показателей друг на друга.

Предлагаемая система параметров железнодорожной линии позволяет определять нечеткие веса показателей для формирования комплексного интегрального индекса, который дает возможность наиболее полно характеризовать работу железнодорожных линий различной специализации.

Разработаны сценарии функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий для дальнейшего формирования управляющих воздействий, направленных на повышение эффективности работы железнодорожной транспортной сети.

Результаты исследования могут быть применены при разработке сценариев развития железнодорожной транспортной сети, а также при формировании комплексных программ развития транспортной системы с учетом особенностей рассматриваемых групп показателей.

Ключевые слова: малоинтенсивные железнодорожные линии, сценарное моделирование, показатели работы железнодорожной линии, наличная пропускная способность, железнодорожный транспорт, нечеткая логика, метод главных компонент.

Для цитирования: Ковалев, К. Е. Формирование сценариев организации работы малоинтенсивных железнодорожных линий по набору параметров / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 90–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_90.

Введение

Железнодорожная транспортная сеть представляет собой совокупность железнодорожных линий, станций, узлов, технических средств и организационных структур, обеспечивающих перевозку пассажиров и грузов [1–3]. Железнодорожные линии имеют специализацию и классификацию по набору различных показателей. Каждая специализированная линия определяется по набору показателей. Специализация линий включает в себя: высокоскоростные (*V*); скоростные (*C*); с преимущественно пассажирским движением (*O*); с преимущественно грузовым движением (*G*); особо грузонапряженные (*P*); с тяжеловесным грузовым движением (*T*); малоинтенсивные (*M*).

Сложность исследования и управления железнодорожными линиями различной специализации состоит в многочисленности и многообразии их параметров, свойств и характеристик [4–6]. Отсутствует система их параметров и показателей оценки по набору ресурсных, инфраструктурных, технологических, экономических и эксплуатационных показателей, что затрудняет принятие решений по управлению и перераспределению потоков в железнодорожной транспортной сети и оценку эффективности такого управления. Вследствие этого появляются затруднения в продвижении грузопотоков в адрес морских торговых портов, отставленных от движения поездов, избыточного подвижного состава и функционировании убыточных малоинтенсивных железнодорожных линий. В качестве критериев оценки работы железнодорожной линии предлагается использовать набор показателей на основе технического нормирования [7], которое позволяет выполнять сравнение плановых и фактических показателей. Однако расчетные значения показателей в большом массиве данных не дают формирования целостной картины для выработки управляющих воздействий на работу железнодорожной линии. Предлагается производить оценку работы линии по выделенному набору показателей, которые более полно дают представление о работе линии (рис. 1).

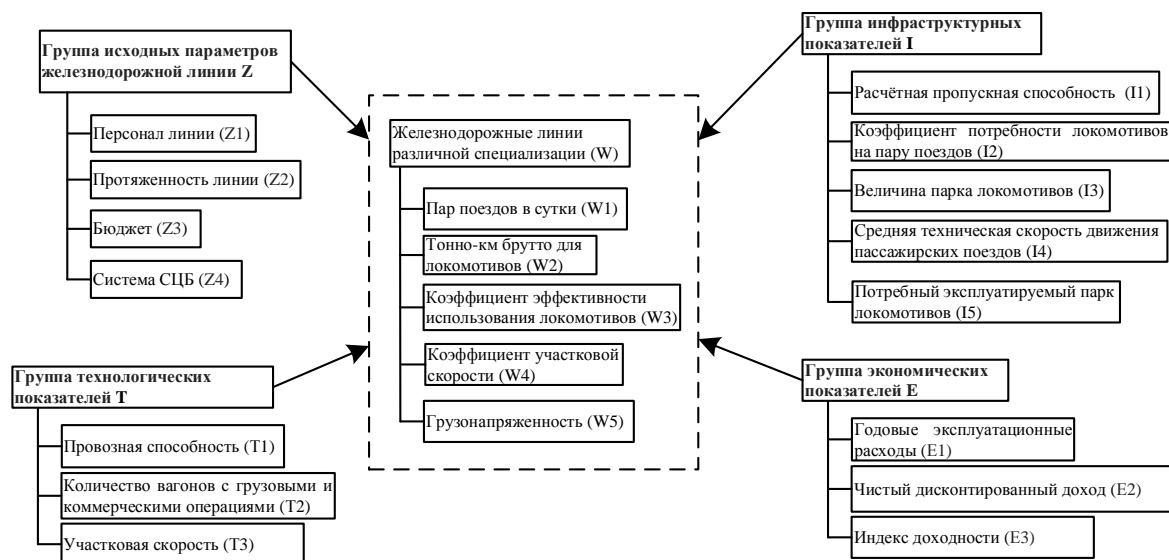


Рис. 1. Система параметров работы железнодорожной линии

Таким образом, математическая постановка задачи формирования системы оценки комплексного показателя работы железнодорожной линии имеет следующий вид. Пусть имеется железнодорожная транспортная сеть L , состоящая из железнодорожных линий $l \in L$ различной специализации $s(l) \in S = \{V, C, O, G, P, T, M\}$, где V – высокоскоростная железнодорожная линия; C – скоростная железнодорожная линия; O – линия с преимущественно пассажирским движением; G – железнодорожная линия с преимущественно грузовым движением; P – особо грузонапряженная железнодорожная линия; T – железнодорожная линия с тяжеловесным грузовым движением; M – малоинтенсивная линия [8–10].

Каждая линия характеризуется группой показателей $G = \{Z, I, T, E, W\}$, где Z – группа исходных параметров железнодорожной линии; T – группа технологических показателей; I – группа инфраструктурных показателей; E – группа экономических показателей; W – группа выходных параметров, характеризующих специализацию линии. Для каждой группы показателей задан набор частных индикаторов.

Требуется разработать систему для прогнозирования изменения значений технических, технологических и экономических показателей при различных сценариях работы железнодорожной линии для формирования управляющих воздействий лицом, принимающим решения. Задача является сложно структурированной, показатели имеют различную размерность, поэтому для ее решения предлагается использовать нечеткую логику [11–15] и структурировать на следующие этапы:

1 Сбор статистических данных показателей за отчетный период с использованием существующих информационных систем.

2 Нормализация данных для линии l , которая имеет набор показателей $x_{l,g,k} \in R, g \in G, k \in K_g$, где l – железнодорожная линия; $g \in G$ – группа показателей; $k \in K_g$ – показатель внутри группы; $x_{l,g,k} \in R$ – числовое значение показателя. В качестве функции принадлежности предлагается использование треугольной функции, лингвистические переменные и треугольные нечеткие числа для оценки показателей работы железнодорожной линии. При этом функции принадлежности не фиксированы, а заданы нечетко треугольными интервалами, которые характеризуются тремя параметрами минимального, среднего и максимального значения показателя, что эффективно использовать при большом количестве переменных и наличии взаимного влияния переменных друг на друга. Показатели средней технической скорости грузовых поездов с нормировкой в диапазоне $[0,1]$ имеют следующие диапазоны (табл. 1).

Таблица 1

Набор показателей работы железнодорожной линии

Диапазоны	Шкала нечетких чисел
Низкий уровень (Low)	(0,0; 0,0; 0,4)
Средний уровень (Med)	(0,3; 0,5; 0,7)
Высокий уровень (High)	(0,6; 1,0; 1,0)

График функций принадлежности для рассматриваемых диапазонов по индикатору средней технической скорости грузовых поездов имеет вид, представленный на рис. 2.

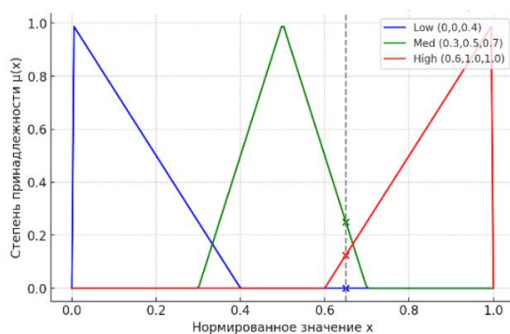


Рис. 2. Функция принадлежности для показателя $I4$

Вертикальная линия показывает точку $x = 0,65$, которая частично принадлежит к среднему (0,25) и высокому уровню (0,125). Показатель скорости не является средним или высоким, а находится между этими значениями. Нечёткая логика позволяет нормализовать такие показатели путем частичной принадлежности разным категориям одновременно. Для дальнейших расчетов используются обе принадлежности при учете влияния взаимосвязей с другими показателями по набору правил, представленных в виде табл. 2.

Таблица 2

Набор правил нечеткой логики

Группа показателей	Условие	Результат
$Z \rightarrow I$	$Z1, Z3$ – соответствует нормативному значению	$I1$ – на достаточном уровне
	$Z1, Z3$ – ниже нормативного значения	$I1, I2$ – пропускная способность и коэффициент использования устройств низкие
	$Z4$ – современная	$T3$ – высокая
	$Z4$ – устаревшая	$T3$ – низкая
$I \rightarrow T$	$W1, W3$ – низкие	$T1$ – высокая
	$I3, I4$ – высокие	$T3$ – высокая
	$I5$ – в норме	$T1$ – высокий
$T \rightarrow E$	$T1, T1$ – высокие	$E2, E3$ – положительные
	$T1, T3$ – низкие	$E2, E3$ – отрицательный
$E \rightarrow W$	$E2, E3$ – низкие	$W4, W5$ низкий
	$W1, W5$ – низкие	$E3$ – низкий

Разработанные правила подтверждают, что при нормальном оснащении инфраструктуры скорость движения поездов и пропускная способность высокие, что повышает провозную способность и экономические показатели линии. Недостаток бюджета и персонала линии влияет на снижение пропускной и провозной способности, что приводит к отрицательным значениям чистого дисконтированного дохода.

Если скорость грузовых и пассажирских поездов высокая на рассматриваемом участке, то принимается высокий уровень (High). Оба случая используются с разной степенью влияния (0,25 и 0,125).

1 Определяются нечеткие веса показателей и групп показателей. Каждому показателю задаём вес нечётким числом в виде интервала. Веса показателей и групп показателей задаются нечеткими числами. Группа экономических показателей имеет вид треугольной функции принадлежности $w_E = (0,3;0,35;0,4)$. Сумма весов показателей и групп определена в диапазоне $\sum_k w_{g,k}^{ind} = 1; \sum_g w_g^{grp} = 1$.

2 Иерархическая нечеткая агрегация показателей. Для каждого показателя определяется его относительное значение (низкий (Low); средний (Med); высокий (High), результатом которого является вектор принадлежностей. Определяются индикаторы внутри одной группы и объединяются с помощью набора правил. Для каждого показателя определяется вектор принадлежности по выражению.

$\mu_{L,g,k}^{(ind)} = (\mu_{Low}, \mu_{Med}, \mu_{High})$. По группам показателей (ресурсы, инфраструктура, технологии, экономика) с учетом разработанного набора правил формируется нечеткое множество для группы, а также интегральное значение оценки линии W с применением комбинированного набора правил $W_i \in R \subset [0,1]$, где R – нечеткое число, показывающее диапазон возможной оценки. На уровне показателей определяется уровень у каждого показателя (низкий/средний/высокий). На уровне групп формируются оценки (плохо/удовлетворительно/хорошо/отлично). На интегральном уровне объединяются все группы для итоговой оценки линии (неудовлетворительно/удовлетворительно/хорошо/отлично). Результаты исследования этапов 1–4 представлены в (табл. 3).

Таблица 3

Нечеткая агрегация показателей

Показатель	Нормализация	Единицы измерения	Допустимый диапазон значений
Группа исходных параметров железнодорожной линии Z			
$Z1$	(0,9;0,97,1,03;1)	чел.	[30;150]
$Z2$	–	км	–
$Z3$	$(x-1200)/(2200-1200)$	млн руб./год	[1200;2200]
$Z4$	ЭЖС = 0,0; ПАБ = 0,5; АБ = 1	баллы	[0;1]
Группа инфраструктурных показателей I			
$I1$	$(x-40)/(120-40)$	пар/сут	40–120
$I2$	$(x-0,5)/(0,9-0,5)$	%	0,5–0,9
$I3$	$(x-0,5)/(0,9-0,5)$	%	0,5–0,9
$I4$	$(x-30)/(70-30)$	км/ч	30–90
$I5$	$(x-60)/(120-60)$	км/ч	60–120
$I6$	$(x-0,6)/(1-0,6)$	–	0,6–1
Группа технологических показателей T			
$T1$	$(x-15)/(60-15)$	млн т/год	8–60
$T2$	$(x-600)/(2000-600)$	ваг/сут	4–2000
$T3$	$(x-40)/(80-40)$	км/ч	40–80
Группа экономических показателей $E1$			
$E1$	$(2000-x)/(2000-1200)$	млн руб./год	[1200;2000]
$E2$	$x/800$	млн руб.	[0;800]
$E3$	$(x-1,0)/(1,6-1,0)$	–	[-0,5;1,2]
Группа выходных параметров W			
$W1$	$(x-8)/(110-40)$	пар/сут	[8;110]
$W2$	$(x-300)/(1300-300)$	млн т-км/сут	[300;1300]
$W3$	$(x-0,5)/(0,9-0,5)$	–	[0,5;0,9]
$W4$	$(x-0,6)/(0,95-0,6)$	–	[0,6;0,95]
$W5$	$(x-2)/(12-2)$	млн т-км/км	[2;12]

3 Настройка модели под статистическим данным реализуется с использованием задачи оптимизации, которая имеет вид

$$\min_{\theta \in \Theta} \sum (d(W_i(\theta), W_i^{ref}))^2, \quad (1)$$

где d – расстояние между нечеткими числами; θ – параметры функций принадлежности и весов; W_i^{ref} – эталонные экспертные оценки.

4 На основе анализа чувствительности модели после определения W_1 в некоторых случаях можно получить диапазон значений $W_1 \in [W_1^{\min}; W_1^{\max}]$, что позволит выявлять железнодорожные линии с высокой степенью неопределенности показателей.

5 Формирование комплексных показателей по набору технических (PC_1), технологических (PC_2) и экономических показателей (PC_3). Для обобщения полученного множества признаков предлагается использовать новый синтетический признак, который характеризует группы показателей. Набор

технических параметров (PC_1) включает в себя $Z_2, T_1, I_1, W_2, W_1, T_2, I_5$. Набор технологических параметров (PC_2) включает в себя I_4, W_3, W_4, Z_4 . Набор экономических параметров (PC_3) включает в себя E_1, E_2, E_3, W_4, W_5 , значения которых определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} PC_{1i} &= v_{11}z_{i1} + v_{12}z_{i2} + \dots + v_{1p}z_{ip}, \\ PC_{2i} &= v_{21}z_{i1} + v_{22}z_{i2} + \dots + v_{2p}z_{ip}, \\ PC_{3i} &= v_{31}z_{i1} + v_{32}z_{i2} + \dots + v_{3p}z_{ip}, \end{aligned} \quad (2)$$

где PC_{ki} – значение k -й компоненты для объекта i ; v_{kj} – вес признака j в компоненте k ; z_{ij} – стандартизированные значения признаков.

6 Прогноз изменения значений групп показателей при различных сценариях работы линий. Имеется множество мероприятий, которые оказывают воздействие на компоненты PC_1, PC_2, PC_3 для M , представленные в табл. 4, где 1 – негативное влияние; 0 – нейтральное; 1 – слабый положительный эффект; 2 – средний; 3 – сильный.

Таблица 4

Степень влияния мероприятий на компоненты показателей (I)

Мероприятия	Степень влияния на группы показателей		
	PC_1	PC_2	PC_3
1 Увеличение грузовой базы с учетом существующих мощностей предприятий	1	2	3
2 Увеличение грузовой базы с учетом новых мощностей предприятий	2	2	3
3 Увеличение грузовой базы за счет привлечения новых клиентов	1	2	3
4 Увеличение грузовой базы за счет оказания транспортно-логистических, терминально-складских и экспедиционных услуг	3	3	3
5 Изменение технологии эксплуатационной работы M (изменение режима работы линии, станции)	1	3	2
6 Совмещение профессий работников, обслуживающих M	0	1	3
7 Изменение технологии обслуживания станций и линий в зависимости от размеров перевозок	2	1	3
8 Техническое переоснащение	2	1	3
9 Цифровизация процессов управления перевозками	2	3	3
10 Ремонтные работы по консервированию работы M	-1	-1	2
11 Ремонтные работы по демонтажу M	-1	-1	3

Имеется набор сценариев функционирования M , который включает в себя поиск грузовой базы, модернизацию, консервирование, демонтаж, и комплексный сценарий, который включают в себя возможность перехода между сценариями (табл. 5) с указанием степени влияния различных мероприятий (I) на различные сценарии (P).

Таблица 5

Приоритеты мероприятий по сценариям (P)

Мероприятия	Сценарии				
	1 Поиск грузовой базы	2 Модернизация	3 Консервирование	4 Демонтаж	5 Комплексный сценарий
1 Увеличение грузовой базы с учетом существующих мощностей предприятий	3	2	0	0	3
2 Увеличение грузовой базы с учетом новых мощностей предприятий	3	3	0	0	3
3 Увеличение грузовой базы за счет привлечения новых клиентов	3	2	0	0	3
4 Увеличение грузовой базы за счет оказания транспортно-логистических, терминально-складских и экспедиционных услуг	3	3	0	0	3
5 Изменение технологии эксплуатационной работы M (изменение режима работы линии, станции)	2	3	2	0	3
6 Совмещение профессий работников, обслуживающих M	2	2	3	1	3
7 Изменение технологии обслуживания станций и линий в зависимости от размеров перевозок	2	3	2	0	3
8 Техническое переоснащение	1	3	0	0	3
9 Цифровизация процессов управления перевозками	1	3	0	0	3
10 Ремонтные работы по консервированию работы M	0	1	3	0	1
11 Ремонтные работы по демонтажу M	0	0	1	3	0

Ожидаемый эффект от реализации сценариев определяется как взвешенная сумма влияний мероприятий в каждом из рассматриваемых комплексных показателей:

$$E_{s,pc} = \sum_{l \in L} p_{s,l} \cdot i_{l,pc} \quad (3)$$

где $p_{s,l}$ – вес мероприятия в каждом из сценариев; $i_{l,pc}$ – вес каждого мероприятия в сценарии.

Суммарный эффект сценариев для комплексных показателей представлен в табл. 6.

Таблица 6

Эффект сценариев для комплексных показателей

Сценарии	PC_1	PC_2	PC_3
Поиск грузовой базы	29	48	56
Модернизация	43	61	65
Консервация	18	22	12
Демонтаж	9	5	-3
Комплексный	51	69	71

Зеленым цветом выделены положительные значения, желтым – умеренные и красным – наименьшие значения в рассматриваемых сценариях. Так, сценарий демонтажа имеет самые низкие показатели по всем группам параметров PC_1 , PC_2 , PC_3 .

Для формирования прогнозных значений параметров PC_1 , PC_2 , PC_3 выполняется минимаксная нормализация значений в диапазоне $[0;1]$ по выражению

$$PC_n = \frac{PC_i - PC_{\min}}{PC_{\max} - PC_{\min}}, \quad (4)$$

где PC_i – значение показателя; PC_{\min} , PC_{\max} – минимальное и максимальное значение в столбце.

Для построения планируемого временного диапазона вводится временная функция для каждого из сценариев, имеющая вид

$$PC_k(t) = PC_n \cdot (1 + \alpha_k \cdot (t - t_0)) + \varepsilon_t, \quad (5)$$

где α_k – коэффициент темпа роста; ε_t – случайное отклонение (принимается равным 0,1).

Общий интегральный индекс сценариев по набору параметров PC_1 , PC_2 , PC_3 определяется по выражению

$$S(t) = w_1 \cdot PC_1(t) + w_2 \cdot PC_2(t) + w_3 \cdot PC_3(t), \quad (6)$$

где w_1 , w_2 , w_3 – вес каждого из параметров PC_1 , PC_2 , PC_3 (принимается соответственно 0,3; 0,3; 0,4).

Результаты моделирования представлены на рис. 3.

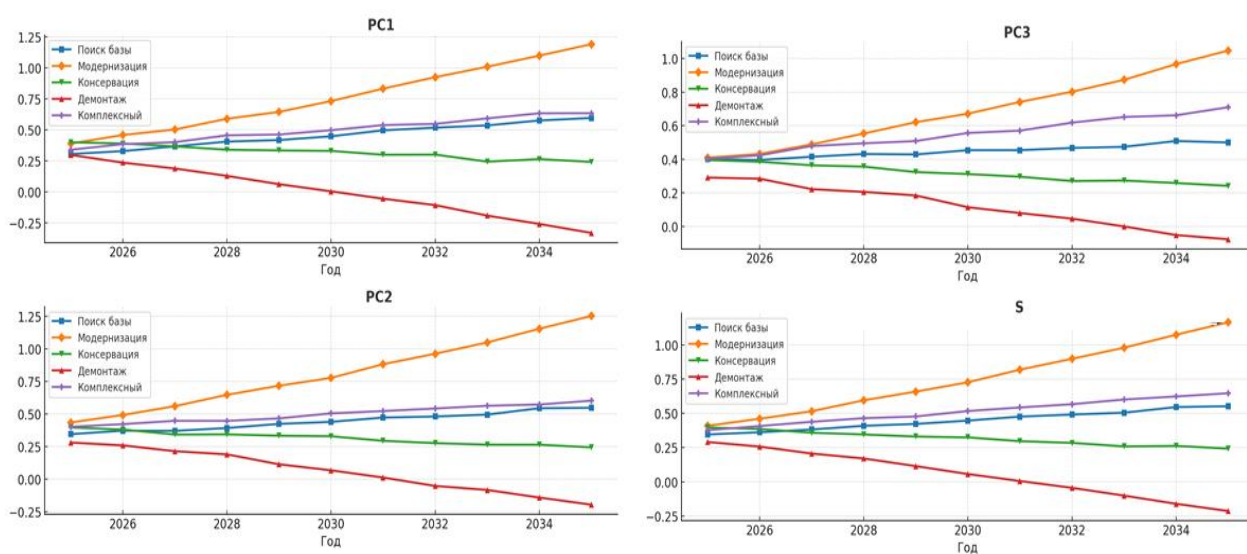


Рис. 3. Результаты моделирования параметров PC_1 , PC_2 , PC_3 и интегрального индекса (S)

Выводы

На основании комплексных показателей PC_1 , PC_2 , PC_3 сформирована интегральная модель (S) оценки и прогнозирования различных сценариев для M . Комплексные показатели сформированы как набор нормализованных технических, технологических и экономических показателей.

На основании рассчитанных значений комплексных показателей по пяти сценариям (поиск грузовой базы, модернизация, консервация, демонтаж и комплексный сценарий) вычислен интегральный индекс эффективности для каждого из сценариев.

Наибольшее значение интегрального индекса – у сценариев комплексного развития и модернизации. Однако при увеличении степени случайного отклонения установлено, что сценарий «модернизации» имеет более устойчивое поведение. Графически динамика сценариев по годам представлена в виде ломаных трендов с зонами вероятностного разброса, что позволяет видеть вариативность стратегических решений.

Таким образом, установлено, что рост PC_2 оказывает наибольшее влияние на общий интегральный результат. Для линий с низкой интенсивностью перевозок оптимальным направлением является поэтапная модернизация с последующим развитием интеграции с линиями других специализаций. Комплексный сценарий эффективен в условиях стабильной бюджетной поддержки, но менее устойчив к неопределённости внешних факторов. Консервация и демонтаж показывают снижение всех комплексных показателей, что отрицательно влияет на функционирование всей железнодорожной транспортной сети. Реализация сценария «модернизации» обеспечивает максимизацию интегрального индекса эффективности при минимальной чувствительности к неопределённости.

Список литературы

- 1 Транспортно-логистические системы в условиях системных изменений в экономике / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, В. А. Финоченко, К. А. Годованый // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.
- 2 Долгий, А. И. Интеллектуальный мониторинг перевозочных процессов на основе динамического метода главных компонент / А. И. Долгий, С. М. Ковалев, А. Н. Гуда // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 240–251. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_240.
- 3 Оценка возможности перераспределения грузопотока между видами транспорта на генеральных направлениях МТК «Север – Юг» / Д. В. Сорокин, А. И. Хашев, С. М. Наурузбаев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 243–253. – DOI 10.46973/0201727X_2025_2_243.
- 4 Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects / C. J. Purnell, G. Frommer, K. Chan, A. A. Auch // Radiation Protection Dosimetry. – 2004. – Vol. 108, No. 4. – P. 353. – DOI 10.1093/rpd/nch035.
- 5 Ballis, A. Issues on railway wagon asset management using advanced information systems / A. Ballis, L. Dimitriou // Transportation Research Part C : Emerging Technologies. – 2010. – Vol. 18, No. 5. – P. 807–820.
- 6 Никитин, А. Б. Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малонапряженных линиях / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5, № 1. – С. 45–61. – DOI 10.20295/2412-9186-2019-1-45-61.
- 7 Interaction of Intensive and Low-Density Lines : Management Approach and Models. In : A. Manakov, A. Edigarian [et al.]. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021 / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // TransSiberia-2021. 8 Lecture Notes in Networks and Systems.

References

- 1 Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy / E. A. Mamaev, A. N. Guda, V. A. Finochenko, K. A. Godovany // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.
- 2 Dolgiy, A. I. Intelligent monitoring of transportation processes based on the dynamic method of principal components / A. I. Dolgiy, S. M. Kovalev, A. N. Guda // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 240–251. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_240.
3. Assessment of the possibility of redistributing freight traffic between modes of transport on the main routes of the North-South International Transport Corridor / D. V. Sorokin, A. I. Khashev, S. M. Nauryzbaev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 243–253. – DOI 10.46973/0201727X_2025_2_243.
- 4 Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects / C. J. Purnell, G. Frommer, K. Chan, A. A. Auch // Radiation Protection Dosimetry. – 2004. – Vol. 108, No. 4. – P. 353. – DOI 10.1093/rpd/nch035.
- 5 Ballis, A. Issues on railway wagon asset management using advanced information systems / A. Ballis, L. Dimitriou // Transportation Research Part C : Emerging Technologies. – 2010. – Vol. 18, No. 5. – P. 807–820.
- 6 Nikitin, A. B. Possibility of introducing digital radio communication and organizing data transmission between stations on low-traffic lines / A. B. Nikitin, I. V. Kushpil // Automation in transport. – 2019. – Vol. 5, No. 1. – P. 45–61. – DOI 10.20295/2412-9186-2019-1-45-61.
- 7 Interaction of Intensive and Low-Density Lines : Management Approach and Models. In : A. Manakov, A. Edigarian [et al.]. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia-2021 / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // TransSiberia-2021. 8 Lecture Notes in Networks and Systems.

Vol. 402. – Springer, Cham. – DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_76.

8 **Нутович, В. Е.** Алгоритмическое обеспечение и концептуальные модели логистического навигатора в части определения условий перевозок грузов различными видами транспорта / В. Е. Нутович, Т. В. Тулина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (97). – С. 86–93. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_86.

9 **Вакуленко, С. П.** Малодеятельные линии: состояние и варианты оптимизации / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евренова // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15, № 3 (70). – С. 174–180. – DOI 10.30932/1992-3252-2017-15-3-16.

10 Механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе нечеткого когнитивного моделирования / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, И. Л. Сакович, В. А. Болотин // Автоматика на транспорте. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 72–86. – DOI 10.20295/2412-9186-2023-9-01-72-86.

11 **Ковалев, К. Е.** Процедура планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий: логистические аспекты и нейросетевые модели / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 325–335. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-2-325-335.

12 **Sobol, I. M.** Numerical Monte Carlo Methods / I. M. Sobol ; Main editorial board of physical and mathematical literature. – Moscow : Nauka, 1973. – 313 p.

13 **Михайлов, Г. А.** Рандомизированные алгоритмы метода Монте-Карло для задач со случайными параметрами (метод «двойной рандомизации») / Г. А. Михайлов // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 187–200. – DOI 10.15372/SJNM20190205.

14 **Ермаков, С. М.** Метод Монте-Карло для решения систем ОДУ / С. М. Ермаков, Т. М. Товстик // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 411–421. – DOI 10.21638/11701/spbu01.2019.306.

15 **Юнусова, Л. Д.** Анализ методов ценообразования опционов : модель Блэка – Шоулза и метод Монте-Карло // Международный научный журнал. – 2020. – № 4. – С. 64–67. – DOI 10.34286/1995-4638-2020-73-4-64-67.

Vol. 402. – Springer, Cham. – DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_76.

8 **Nutovich, V. E.** Algorithmic support and conceptual models of a logistics navigator in terms of determining the conditions for transporting goods by various modes of transport / V. E. Nutovich, T. V. Tulina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 1 (97). – P. 86–93. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_86.

9 **Vakulenko, S. P.** Low-traffic lines: status and optimization options / S. P. Vakulenko, A. V. Kolin, N. Yu. Evreenova // World of Transport. – 2017. – Vol. 15, No. 3 (70). – P. 174–180. – DOI 10.30932/1992-3252-2017-15-3-16.

10 Mechanism for diagnosing the operation of low-intensity railway lines based on fuzzy cognitive modeling / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin, I. L. Sakovich, V. A. Bolotin // Automation in transport. – 2023. – Vol. 9, No. 1. – P. 72–86. – DOI 10.20295/2412-9186-2023-9-01-72-86.

11 **Kovalev, K. E.** Procedure for planning the operation of low-intensity railway lines : logistic aspects and neural network models / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Proceedings of Petersburg transport university. – 2023. – Vol. 20, No. 2. – P. 325–335. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-2-325-335.

12 **Sobol, I. M.** Numerical Monte Carlo Methods / I. M. Sobol ; Main editorial board of physical and mathematical literature. – Moscow : Nauka, 1973. – 313 p.

13 **Mikhailov, G. A.** Randomized algorithms of the Monte Carlo method for problems with random parameters (the "double randomization" method) / G. A. Mikhailov // Siberian journal of numerical mathematics. – 2019. – Vol. 22, No. 2. – P. 187–200. – DOI 10.15372/SJNM20190205.

14 **Ermakov, S. M.** Monte Carlo method for solving ODE systems / S. M. Ermakov, T. M. Tovstik // Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy. – 2019. – Vol. 6, No. 3. – P. 411–421. – DOI 10.21638/11701/spbu01.2019.306.

15 **Yunusova, L. D.** Analysis of options pricing methods : the Black – Scholes model and Monte Carlo method // International Scientific Journal. – 2020. – No. 4. – P. 64–67. – DOI 10.34286/1995-4638-2020-73-4-64-67.

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

DEVELOPING OPERATIONAL SCENARIOS FOR A LOW-INTENSITY RAILWAY LINES BASED ON A SET OF PARAMETERS

Abstract. Modern railway line specialization has a complex structure that takes into account various indicators. This article proposes a system for managing railway line parameters

using groups of initial, technological, infrastructure, and economic indicators, which are used to model scenarios for the operation of low-volume railway lines. The railway line parameter management system is based on fuzzy logic, using a set of rules for the mutual influence of various indicators.

The proposed system of railway line parameters allows for the determination of fuzzy weights for indicators and groups of indicators to form a complex integral index, that provide a more comprehensive characterization of the operation of railway lines with various specializations.

Scenarios for the operation for low-volume railway lines are presented for the subsequent development of control actions to improve the efficiency of the railway transport network.

The results of the study can be applied in developing scenarios for the development of the railway transport network, as well as in the formation of comprehensive programs for the development of the transport system, taking into account the specific features of the indicator groups under consideration.

Keywords: low-intensity railway lines, scenario modeling, railway line performance indicators, available capacity, railway transport, fuzzy logic, principal component analysis.

For citation: Kovalev, K. E. Developing operational scenarios for a low-intensity railway lines based on a set of parameters / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 90–99. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_4_90.

Сведения об авторах

Ковалев Константин Евгеньевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (РГУПС),
кафедра «Логистика и коммерческая работа»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kovale@pgups.ru

Новичихин Алексей Викторович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (РГУПС),
кафедра «Логистика и коммерческая работа»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: novitchihin@bk.ru

Information about the authors

Kovalev Konstantin Evgenievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Chair “Logistics and Commercial Work”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kovale@pgups.ru

Novichikhin Aleksey Viktorovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Chair “Logistics and Commercial Work”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: novitchihin@bk.ru

В. Е. Нутович, Т. В. Тулина

МЕТОДЫ ВЕДЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЛОГИСТИЧЕСКОГО НАВИГАТОРА

Аннотация. Рассмотрены основные составляющие информационного обеспечения, необходимые для поиска оптимального маршрута по заданному критерию с привлечением автомобильного, авиационного, морского и железнодорожного транспорта. Для определения информационного обеспечения были рассмотрены принципы формирования маршрутов на примере различных транспортно-экспедиторских компаний, нормативные акты и справочники, регламентирующие процесс грузоперевозки различных типов груза на различных видах транспорта, а также принципы вычисления нормативных сроков доставки груза для каждого из вышеперечисленных видов транспорта. На основе проведенного анализа были определены основные данные, необходимые для решения задачи логистического навигатора, их источники и способы получения. Полученные результаты будут использованы для проектирования алгоритмической составляющей логистического навигатора.

Ключевые слова: логистический навигатор, определение маршрута, структура данных, методы API, расчет нормативного срока.

Для цитирования: Нутович, В. Е. Методы ведения специализированного информационного обеспечения для решения задач логистического навигатора / В. Е. Нутович, Т. В. Тулина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 100–107. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_100.

Введение

Логистический навигатор – ИТ-решение, предназначенное для поиска оптимального маршрута перевозки груза с использованием морского, авиационного, железнодорожного и автомобильного транспорта по критерию стоимости или времени. Данное решение позволит сократить трудозатраты экспедиторов и грузоотправителей на поиск маршрута грузоперевозки, транспортных операторов, работающих с заданным видом груза и участками маршрута и выполнение прочих рутинных задач.

Ранее проводимые исследования, посвященные формализации параметров грузовой перевозки, на основании которых определяются основные требования к используемым транспортным средствам и ограничениям маршрута, изложены в статье [1].

Основная часть

В настоящей статье рассмотрены основные составляющие информационного обеспечения логистического навигатора, а именно состав и структура данных, хранимых на стороне логистического навигатора и получаемых по запросу, а также необходимые связи между данными. Для решения поставленной задачи были изучены нормативно-правовые акты, регламентирующие условия перевозки груза, получены консультации представителей транспортно-экспедиторских компаний, рассмотрены существующие методы и способы расчета нормативных сроков доставки груза на различных видах транспорта, порядок формирования транспортных ставок у выбранных транспортных операторов, особенности транспортных средств.

В качестве критериев оптимизации для решения задачи логистического навигатора выделены время и стоимость. Рассмотрим необходимые данные для решения задачи оптимизации по каждому из выделенных критериев.

Расчет времени обусловлен расстоянием между заданными объектами инфраструктуры – портами, станциями, аэропортами, которые являются ближайшими к заданному месту отправления или назначения (в случае, если адрес отправления или назначения не совпадает с адресом станции, порта, аэропорта). Станции, порты, аэропорты отбираем по признакам работы с заданным типом груза и моделями транспортных средств для заданного типа груза. Структура данных, необходимая для отбора объектов инфраструктуры, представлена на рис. 1 (структура приведена на примере станции, аналогичные структуры ведутся для станций и аэропортов). В качестве ограничений выберем модели транспортных средств и виды грузов.

Отметим, что некоторые порты имеют выход на железнодорожные пути, а следовательно, и на станции. В связи с заданным ограничением дополнительно определены связи между сущностями Железнодорожная станция и Порт.

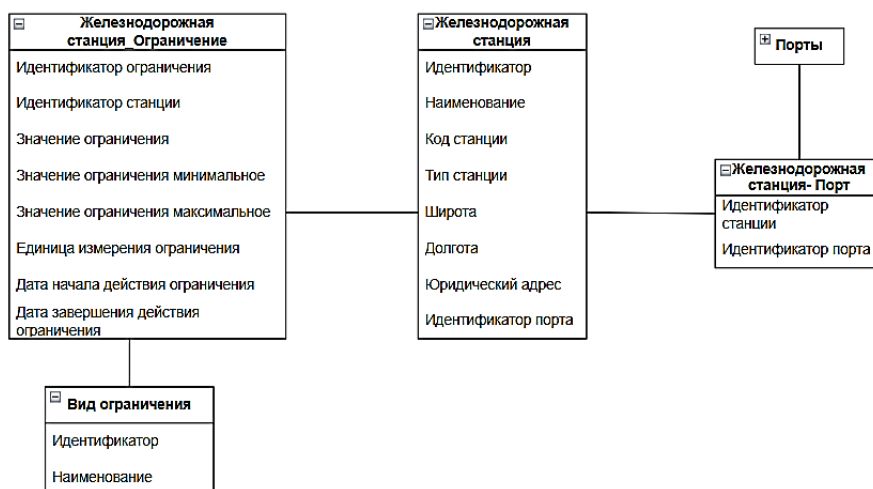


Рис. 1. Структура данных для отбора портов, аэропортов, станций

Выбрав объекты инфраструктуры, рассмотрим, как осуществляется расчет времени между ними для каждого из видов транспорта и какие информационные составляющие необходимы для решения поставленной задачи.

Железнодорожный транспорт

На основе анализа нормативных документов [2] было выявлено, что расчет нормативного времени доставки груза определяется исходя из нормы суточного пробега и тарифного расстояния. Определение тарифного расстояния осуществляется в соответствии с Тарифным руководством № 4 [3–5]. Норма суточного пробега рассчитывается в соответствии с Правилами исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом [2].

Кроме временных затрат на саму перевозку необходимо учитывать добавление дополнительных суток для случаев: прибытия и отправления, передачи на другой вид транспорта, передачи между инфраструктурами и т.д.

Структура данных, необходимых для расчета нормативного расстояния, приведена на рис. 2.

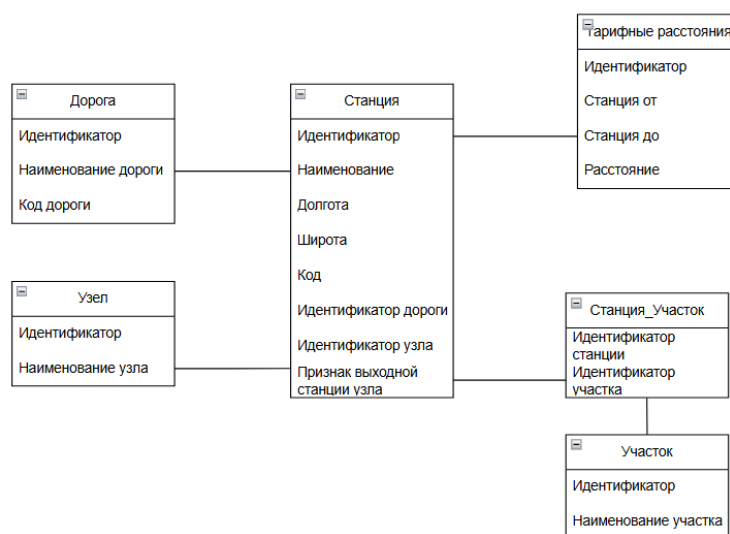


Рис. 2. Структура данных для железнодорожного транспорта

Автомобильный транспорт

Для получения времени доставки груза на автомобильном транспорте используем готовый метод API 2 ГИС GetDistMatrix [6], который позволяет найти кратчайшее расстояние между двумя заданными точками и время в пути для найденного маршрута с учетом статистических данных о дорожном движении. Дополнительно метод API принимает на вход параметры транспортных средств (разрешенные массы, нагрузки на ось, высота, длина, ширина) и груза (признак опасности, взрывчатости) для отбора автомобильных дорог маршрута, удовлетворяющих ограничениям по видам провозимых грузов и габаритам транспортных средств. Пример рассчитанного времени и расстояния в формате JSON представлен на рис. 3.

```

"reliability": 1.0,
"requested_filters": ["dirt_road", "toll_road"],
"result_filters": ["dirt_road", "toll_road"],
"route_id": "moscow-tr-back.m1/truckrouting/1752677494.573992",
"total_distance": 12641,
"total_duration": 2312,
"type": "truckrouting",
"ui_total_distance": {
  "unit": "км",
  "value": "13"
},
"ui_total_duration": "38 мин",
"visited_pass_zone_ids": [3, 4],
"waypoints": [
  {
    "original_point": {
      "lat": 55.77548696452943,
      "lon": 37.58308657528283
    },
    "projected_point": {
      "lat": 55.77548696452943,
      "lon": 37.58308657528283
    },
    "transit": false
  },
  {
    "original_point": {
      "lat": 55.76492488357115,
      "lon": 37.65674806925451
    },
    "projected_point": {
      "lat": 55.76492488357115,
      "lon": 37.65674806925451
    }
  }
]

```

Рис. 3. Результат работы метода GetDistMatrix из пакета API 2 ГИС

Морской транспорт

Расчет времени для морского транспорта осуществляется по формуле [7]:

$$T = T_x + T_{ст} + T_{доп},$$

где T_x – ходовое время, вычисляется исходя из длины пути и эксплуатационной скорости судна, сут; $T_{ст}$ – время в порту отправления и назначения, сут; $T_{доп}$ – время на дополнительные операции, сут.

Так как для морского транспорта нет единой методики расчета тарифного расстояния и нормативного времени груза в пути, необходимо хранить средние значения для следующих величин: длина пути между портами, время в порту отправления и назначения, время на дополнительные операции для заданного вида груза и транспорта. Структура данных, необходимых для вычисления времени, представлена на рис. 4.

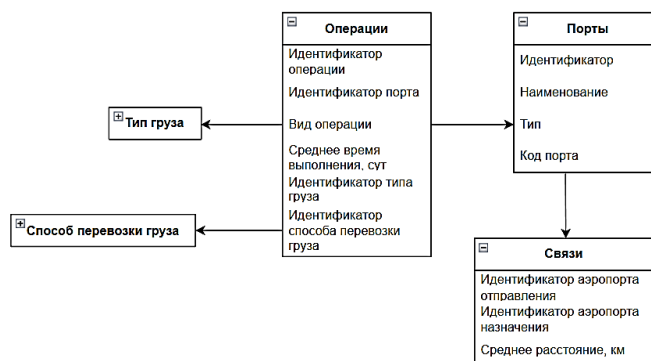


Рис. 4. Структура данных для расчета времени морской перевозки

Авиационный транспорт

Согласно Федеральным авиационным правилам (ФаП) [8], сроки доставки определяются федеральными авиационными правилами или установленными перевозчиком правилами воздушных перевозок, если иное не предусмотрено договором воздушной перевозки груза. Таким образом, при отсутствии единой методики определения нормативного времени грузоперевозки расчет времени осуществляется по среднему времени аналогично принципу расчета для морской перевозки. Для решения задачи выделим международные аэропорты и аэропорты федерального назначения, представленные на сайте Росавиации [9].

Перейдем к определению информационного обеспечения логистического навигатора в части стоимостных характеристик.

Для получения транспортных операторов, работающих с заданными объектами инфраструктуры – портами, аэропортами, станциями, регионами (для автомобильных маршрутов), необходимо иметь привязку операторов к обозначенным объектам инфраструктуры, а также информацию о перевозимых грузах и наличии моделей транспортных средств у операторов.

Для отбора транспортных операторов требуется иметь информацию о территориальных исключениях в разрезе станций, регионов, железных дорог, портов, аэропортов.

Для всех видов транспорта, кроме железнодорожного, привязки объекта инфраструктуры к транспортному оператору выполнены напрямую. Для железнодорожного транспорта привязку объекта инфраструктуры (станции) к операторам будем осуществлять через сущность Перевозчик.

Структура данных, необходимая для отображения связей между сущностями Оператор, Исключения оператора, Виды перевозимых грузов, Морские порты, Аэропорты оператора, Транспортные средства оператора и т.д., представлена на рис. 5.

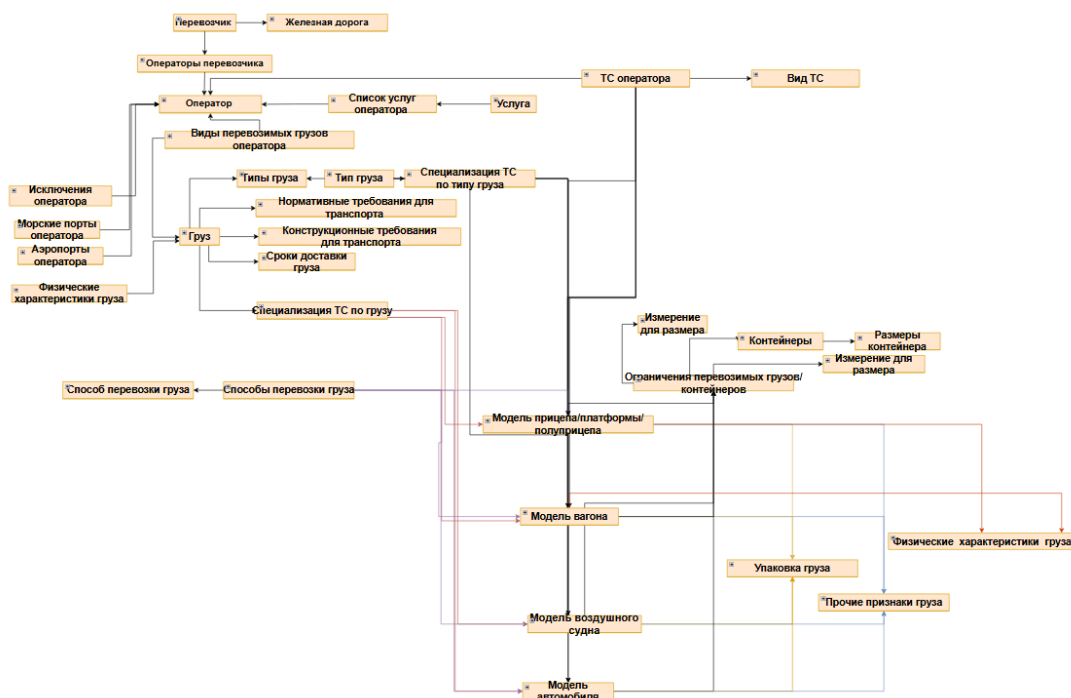


Рис. 5. Структура данных для определения транспортных операторов

Для получения ставок на перевозку груза для каждого из операторов будем в момент расчета обращаться к ИТ-ресурсу оператора. Это поможет более точно определить ставки, так как у каждого оператора есть свои многочисленные условия их определения и порядка обновления, алгоритмы по планированию использования свободных транспортных средств на заданные даты, которые могут корректироваться. Перенос логики вычисления ставок на сторону оператора позволит обеспечить независимость логистического навигатора от изменений алгоритмов расчета операторов. Так, любое изменение, вносимое в расчет, не потребует внесения изменений в программный код логистического навигатора, достаточно только внести изменения в код на стороне оператора, порядок публикации изменений также будет определяться оператором самостоятельно.

Для получения ставок необходимо определить перечень транспортных операторов, занимающихся перевозкой заданного груза и имеющих модели транспортных средств, подходящие для заданного груза и объектов инфраструктуры – порта, аэропорта, станции, а также предоставляющих дополнительные услуги, выбранные грузоотправителем. Для каждого из найденных операторов получим ИТ-ресурс и сформируем запрос на получение ставок. Все услуги, включая саму перевозку, перечислены во входном параметре «Перечень услуг». Схема запроса приведена на рис. 6.

Если стоимость услуги исчисляется по времени фактического использования, логистический навигатор будет показывать стоимость заданной услуги на единицу времени.

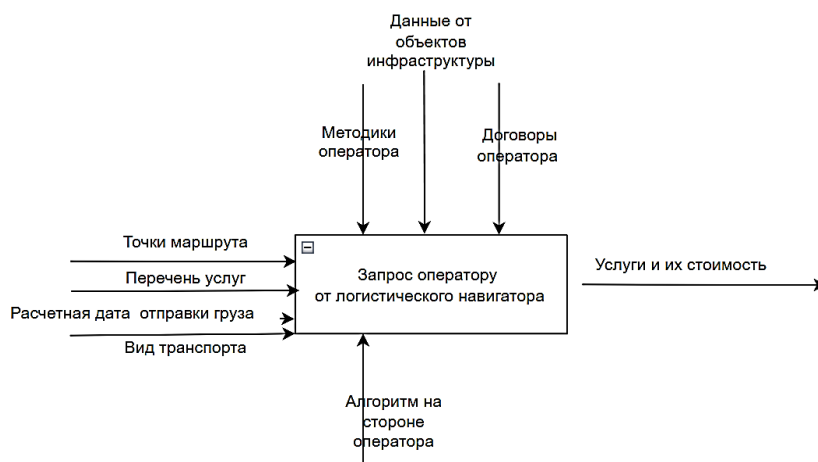


Рис. 6. Запрос транспортному оператору

Для отбора транспортных операторов, предоставляющих заданные дополнительные услуги, необходимо синхронизировать список услуг на стороне логистического навигатора и транспортного оператора по коду услуги. Структура справочника услуг на стороне логистического навигатора и транспортного оператора, а также принцип связи между ними представлены на рис. 7. Отметим, что структура данных на стороне оператора является ориентировочной и может быть изменена самим оператором в случае необходимости.

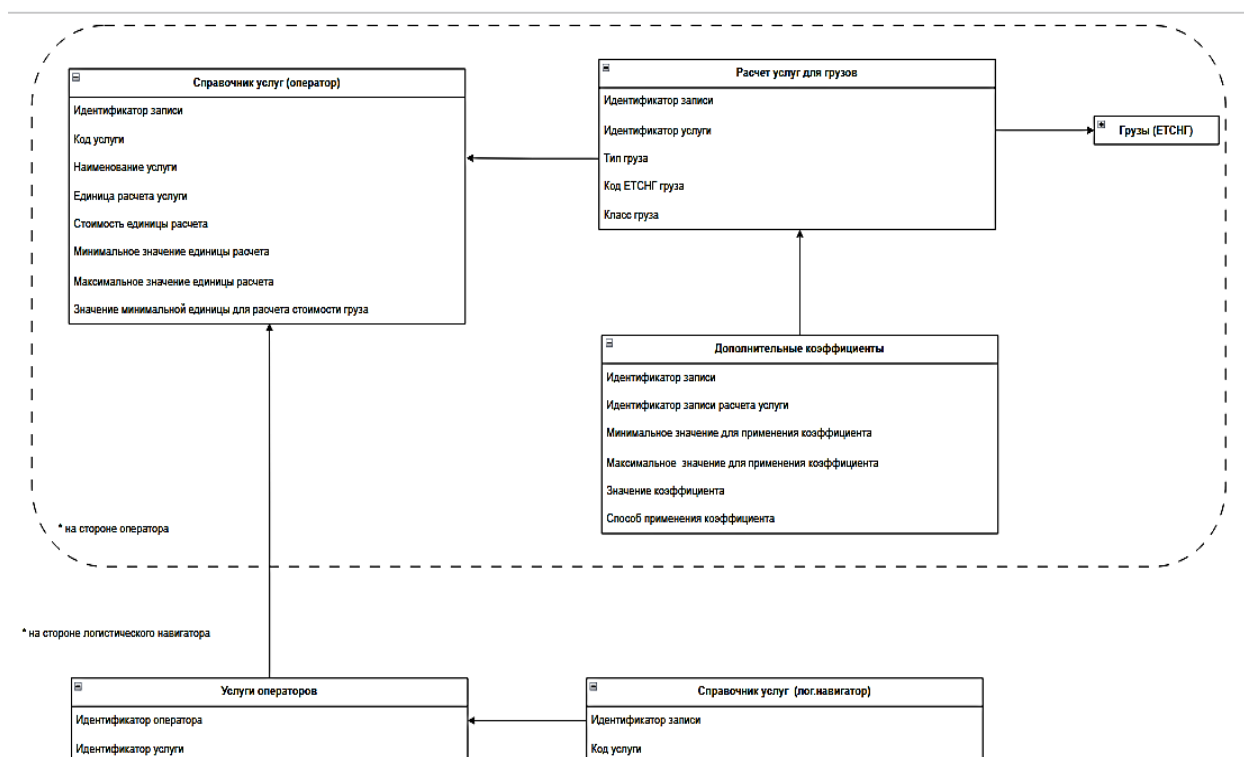


Рис. 7. Структура справочников услуг

Для станций, портов, аэропортов отправления и назначения будем дополнительно уточнять сборы, если они не заложены в стоимость перевозки транспортным оператором. В связи с изменением размера сборов объектов инфраструктуры по причине экономических показателей, сезонных ограничений было решено не хранить размеры сборов на стороне логистического навигатора, а получать их путем выполнения запроса к выбранному объекту инфраструктуры. Схема запроса приведена на рис. 8.

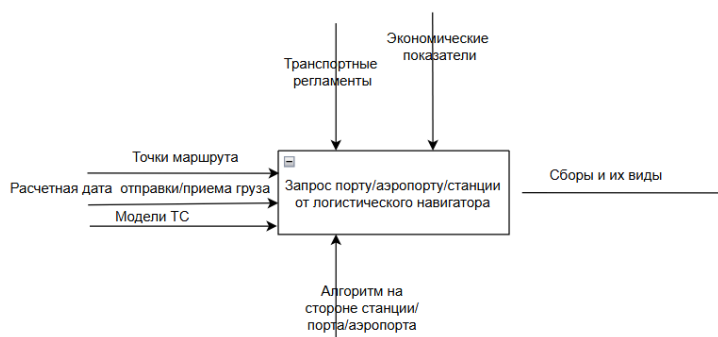


Рис. 8. Запрос для получения сборов для объекта инфраструктуры

Получив размеры сборов для объекта инфраструктуры, суммируем их со ставками, полученными от транспортных операторов, и сформируем ценовую характеристику для заданного участка маршрута.

Выводы

Таким образом, определенные в статье методы ведения информационного обеспечения позволяют определить объекты инфраструктуры, необходимые для выделения участков маршрута для разных видов транспорта, а также временные и стоимостные характеристики участков, необходимые для решения задач оптимизации. Выделенные аспекты информационного обеспечения будут использоваться для последующих исследований в части проектирования алгоритмического обеспечения логистического навигатора.

Список литературы

- 1 Нутович, В. Е. Алгоритмическое обеспечение и концептуальные модели логистического навигатора в части определения условий перевозок грузов различными видами транспорта / В. Е. Нутович, Т. В. Тулина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (97). – С. 86–93. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_86.
- 2 Об утверждении Правил исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом : приказ Минтранса РФ от 7 августа 2015 года N 245 (зарегистрировано в Минюсте России 14.03.2016 N 41393) // КонсультантПлюс : справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_195371/7e56a5d7bcd2354f625a48f146ddf2d50d752d0f/ (дата обращения: 10.10.2025).
- 3 Тарифное руководство N 4 (ред. от 25.01.2016). Книга 1. Тарифные расстояния между станциями на участках железных дорог : утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества // КонсультантПлюс : справочная правовая система. – URL:

References

- 1 Nutovich, V. E. Algorithmic support and conceptual models of a logistics navigator in terms of determining the conditions for the transportation of goods by various modes of transport / V. E. Nutovich, T. V. Tulina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 1 (97). – P. 86–93. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_86.
- 2 On approval of the Rules for calculating the delivery times for cargo and empty freight cars by rail : Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated August 7, 2015 N 245 (registered in the Ministry of Justice of Russia on March 14, 2016 N 41393) // ConsultantPlus : legal reference system. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_195371/7e56a5d7bcd2354f625a48f146ddf2d50d752d0f/ (date of access: 10.10.2025).
- 3 Tariff Guide No. 4 (as amended on 25.01.2016). Book 1. Tariff distances between stations on railway sections : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States // ConsultantPlus : legal reference system. – URL:

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_63243/ (дата обращения: 10.10.2025).

4 Тарифное руководство N 4 (ред. от 25.01.2016). Книга 2. Часть 1. Алфавитный список железнодорожных станций : утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества // КонсультантПлюс : справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66064/ (дата обращения: 10.10.2025).

5 Тарифное руководство N 4 (ред. от 25.01.2016). Книга 3. Тарифные расстояния между станциями на участках железных дорог : утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества // КонсультантПлюс : справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_67544/73ba14926afd5c555e886af89e48427f3677a7bc/#dst100010 (дата обращения: 10.10.2025).

6 Distance Matrix API: обзор // 2GIS Developers : официальный сайт. – URL: <https://docs-new.2gis.com/api/navigation/distance-matrix/overview> (дата обращения: 15.10.2025).

7 **Щелкунова, И. В.** Условия перевозок и тарифы в международном сообщении : методические указания к курсовой работе / И. В. Щелкунова, И. М. Басыров, Н. А. Конарева. – Москва : РУТ (МИИТ) : ИУЦТ, 2023. – 103 с.

8 Об утверждении Федеральных авиационных правил «Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования к обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей» (зарегистрировано в Минюсте России 27.09.2007 N 10186) : приказ Минтранса России от 28 июня 2007 года N 82 (ред. от 25.12.2024) // КонсультантПлюс : справочная правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_71492/ (дата обращения: 10.10.2025).

9 Федеральное агентство воздушного транспорта. Деятельность: аэропорты и аэродромы // favt.gov.ru : официальный сайт. – URL: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy/> (дата обращения: 15.10.2025).

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_63243/ (date of access: 10.10.2025).

4 Tariff Guide No. 4 (as amended on 25.01.2016). Book 2. Part 1. Alphabetical list of railway stations : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States // ConsultantPlus : legal reference system. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66064/ (date of access: 10.10.2025).

5 Tariff Guide No. 4 (as amended on 25.01.2016). Book 3. Tariff distances between stations on railway sections : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States // ConsultantPlus : legal reference system. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_67544/73ba14926afd5c555e886af89e48427f3677a7bc/#dst100010 (date of access: 10.10.2025).

6 Distance Matrix API: overview // 2GIS Developers : official website. – URL: <https://docs-new.2gis.com/api/navigation/distance-matrix/overview> (date of access: 15.10.2025).

7 **Shchelkunova, I. V.** Conditions of transportation and tariffs in international traffic : methodological guidelines for coursework / I. V. Shchelkunova, I. M. Basyrov, N. A. Konareva. – Moscow : RUT (MIIT) : IUTsT, 2023. – 103 p.

8 On approval of the Federal Aviation Rules "General rules for the air transportation of passengers, baggage, cargo and requirements for servicing passengers, shippers, and consignees" (Registered with the Ministry of Justice of Russia on September 27, 2007 No. 10186) : Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 28, 2007 N 82 (as amended on December 25, 2024) // ConsultantPlus : legal reference system. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_71492/ (date of access: 10.10.2025).

9 Federal Air Transport Agency. Activities : airports and airfields // favt.gov.ru : official website. – URL: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy/> (date of access: 15.10.2025).

V. E. Nutovich, T. V. Tulina

METHODS OF MAINTAINING SPECIALIZED INFORMATION SUPPORT FOR SOLVING THE PROBLEMS OF LOGISTICS NAVIGATOR

Abstract. This article examines the key components of information support required to find the optimal route based on a given criterion using road, air, sea, and rail transport. To determine the information support, we reviewed the principles of route formation using examples from various freight forwarding companies, regulations, and reference books governing the transportation of various types of cargo by various modes of transport, as well as the principles for calculating standard delivery times for each of these modes of transport. Based on

the analysis, we identified the key data required to solve the logistics navigator problem, its sources, and methods for obtaining it. The results will be used to design the algorithmic component of the logistics navigator.

Keywords: logistics navigator, route determination, data structure, API methods, standard delivery time calculation.

For citation: Nutovich, V. E. Methods of maintaining specialized information support for solving the problems of a logistics navigator / V. E. Nutovich, T. V. Tulina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 100–107. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_100.

Сведения об авторах

Нутович Вероника Евгеньевна

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

Тулина Татьяна Владимировна

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

Information about the authors

Nutovich Veronika Evgenievna

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

Tulina Tatyana Vladimirovna

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

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 001 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_108

*С. М. Ковалев, И. В. Котенко, С. И. Родзин, А. Н. Гуда, А. В. Суханов,
М. А. Бутакова, С. Ю. Гришаев*

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ ИТИ'25

Аннотация. В обзоре приводится краткое реферирование коллекции наиболее интересных докладов 9-й Международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии для индустрии» (ИТИ'25), которая проходила в период с 4 по 7 ноября 2025 г. на территории Федерального центра «Сириус» в России. Конференция была организована Научно-технологическим университетом «Сириус», Ростовским государственным университетом путей сообщения и Научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте при поддержке Российской ассоциации искусственного интеллекта.

Цель конференции – ускорить ориентированную на человека трансформацию в Индустрию 5.0 посредством инноваций на основе ИИ, способствуя внедрению практических, безопасных и устойчивых технологий, которые ставят во главу угла интересы людей и прогресса. В докладах представлены междисциплинарные исследования, сочетающие ИИ в индустрии, человеко-машинный интерфейс, робототехнические системы, интеллектуальные транспортные системы, мягкие вычисления, машинное обучение, многоагентные системы с эмпирической проверкой в реальных промышленных условиях.

Ключевые слова: интеллектуальные информационные технологии, искусственный интеллект в Индустрии 5.0, робототехнические системы, автоматизация на транспорте, машинное обучение, мягкие вычисления, биоинспирированные алгоритмы, интеллектуальные агенты.

Для цитирования: Аналитический обзор трудов конференции ИТИ'25 / С. М. Ковалев, И. В. Котенко, С. И. Родзин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 108–150. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_108.

Введение

Конференции серии ИТИ проводятся ежегодно с участием ведущих ученых из России и других стран. В разные годы конференции проводились на множестве международных площадок, таких как Технический университет Остравы, Технический университет Варны, Стамбульский университет Айдын, Харбинский политехнический университет. Англоязычные труды конференции публикуются в серии *Lecture Notes in Networks and Systems* издательства Springer, индексируемой в международных базах данных научного цитирования SCOPUS, INSPEC, WTI Frankfurt eG, zbMATH, SCImago. Среди участников конференции, которая в нынешнем году проходила в Научно-технологическом университете «Сириус», – граждане России, Кубы, Китая, Турции, Беларуси, Бразилии, Болгарии, США, Камеруна, Венесуэлы. Всего на конференцию было подано 162 доклада, 120 из которых были приняты для публикации Международным программным комитетом. Общее количество очных и дистанционных участников составило 268 человек.

ИТИ'2025 была посвящена теоретическим и практическим аспектам применения ИИ в индустрии, интеллектуальным информационным технологиям, человеко-машинному интерфейсу, робототехническим системам, интеллектуальным транспортным системам, мягким вычислениям, машинному обучению и многоагентным системам, а также их применению в промышленной сфере. Конференция традиционно рассматривалась как место встречи исследователей и практиков, позволяющее обменяться опытом использования новейших достижений и направлений применения ИИ и внедрения передовых информационных технологий в различные отрасли производства и социальной сферы.

В 2025 году в рамках конференции ИТИ состоялось еще два крупных мероприятия:

- заседание комитетов ассоциации «Объединение производителей железнодорожной техники» (ОПЖТ) на тему «Роботизация сложных технологических процессов. Перспективы внедрения»;
- секция Научно-технического совета АО «НИИАС» «Построение цифровых двойников инфраструктурных объектов»,

а также серия обучающих мастер-классов, организованных и проведенных Центром обучения АО «НИИАС».

Такое объединение на одной площадке ученых, занимающихся проблемами ИИ, исследователей, проектировщиков и разработчиков в сфере информатизации и автоматизации на железнодорожном транспорте и производителей высокотехнологичной железнодорожной техники дало несомненный синергетический эффект и старт дальнейшему взаимодействию представителей науки и производства.

На конференцию были приглашены ряд ведущих ученых в области ИИ, представивших пленарные доклады:

1 «Многомерное прогнозирование временных рядов в сценариях передовых вычислений и его приложения» – Ли Вэй, Харбинский инженерный университет, Китай;

2 «Технологии противодействия новой квантовой киберугрозе» – С. А. Петренко, НТУ «Сириус»;

3 «Технология раннего выявления угроз информационно-психологической безопасности обучающихся образовательных организаций на территории Федеральной территории “Сириус” на основе моделей и методов искусственного интеллекта» – К. О. Гнидко, НТУ «Сириус»;

4 «Проблема временного кодирования в биологически инспирированных интеллектуальных системах» – Л. Ю. Жиликова, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН;

5 «Модели анализа рисков, надежности и выживаемости: современное состояние, новейшие результаты и применение в промышленности и медицине» – Л. В. Уткин, Институт компьютерных наук и технологий СПбПУ;

6 «Поворотный момент в развитии компьютерных наук: генеративные большие языковые модели – это не все, что нам нужно» – В. С. Заборовский, Высшая школа технологий искусственного интеллекта, Институт компьютерных наук и технологий СПбПУ;

7 «Кластерная модель защиты информации» – П. В. Сундеев, НТУ «Сириус».

Авторы хотели бы выразить личную признательность председателю Совета федеральной территории «Сириус» Шмелевой Елене Владимировне, главе администрации федеральной территории «Сириус» Плишкину Дмитрию Сергеевичу, директору НТУ «Сириус» Гусеву Антону Сергеевичу, исполнителю директору Научного центра информационных технологий и искусственного интеллекта НТУ «Сириус» и всей команде федеральной территории «Сириус» за радушный прием участников и всестороннюю поддержку конференции ПТТ’25.

В обзоре доклады конференции были распределены по следующим разделам в соответствии с программой конференции: «Логические основы искусственного интеллекта», «Интеллектуальные системы поддержки принятия решений», «Многоагентные системы», «Мягкие вычисления», «Интеллектуальные информационные технологии в области естественных, экономических и социальных наук», «Искусственный интеллект в информационной безопасности и квантовая информатика», «Промышленная интеллектуализация», «Финансовая математика», «Искусственные нейронные сети, машинное обучение и их применение в индустрии», «Интеллектуальные медицинские системы».

Ниже приводится краткое реферирование наиболее интересных докладов.

1 Логические основы искусственного интеллекта

Логические основы искусственного интеллекта (ИИ) – это подход к построению систем ИИ, основанный на моделировании рассуждений. Теоретической основой подхода служат логика и логико-алгебраические модели. Цель – наделить машины способностями к рассуждению, подобными человеческому интеллекту, и создать средства решения задач, традиционно считающихся интеллектуальными. Логический подход предполагает построение доказательств – цепочек рассуждений, ведущих к желаемым результатам. Исходные данные хранятся в базе данных в виде аксиом, правила логического вывода – как отношения между ними. Особенности данного подхода в ИИ: использование правил логического вывода, которые являются руководящими принципами для получения обоснованных выводов из существующих данных, а также учет специфики предметной области – в правила вывода и алгоритмы встраивают характеристики для каждой конкретной задачи.

Для реализации логического подхода в ИИ используются: автоматическое доказательство теорем – система пытается доказать цель как теорему, а если цель доказана, трассировка примененных правил позволяет получить цепочку действий, необходимых для реализации поставленной цели; предварительная подготовка ответов на возможные запросы из баз знаний. На рис. 1 представлен пример процесса логического вывода.

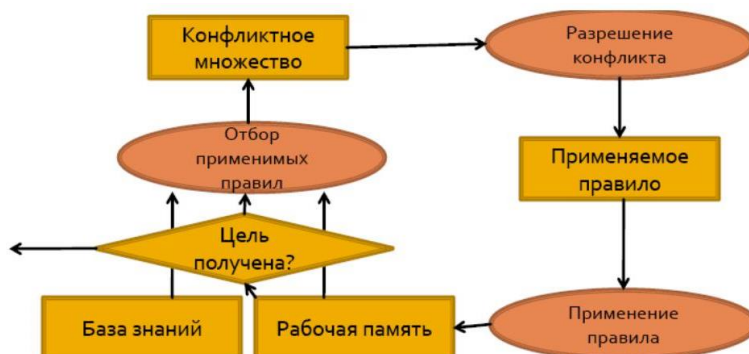


Рис. 1. Пример процесса логического вывода

Однако для большинства логических методов характерна большая трудоемкость, поскольку во время поиска доказательства возможен полный перебор вариантов. Поэтому подход требует эффективной реализации вычислительного процесса, и хорошая работа обычно гарантируется при сравнительно небольшом размере базы данных.

Данная секция на ПТГ'25 была представлена пятью докладами.

В [1] рассматривается актуальная задача поиска адаптивных инструментов для моделирования сложных объектов, способных к изменению свойств и вариантов поведения. По мнению авторов, к таким инструментам относится разработка исполнимых прототипов, используемых для повышения скорости и качества создания проектов, анализа динамического поведения, обнаружения аномалий в интеллектуальных системах. Логический подход с расширенной встроенной арифметикой для моделирования систем – это метод, который сочетает логическое представление системы и использование расширенных средств для работы с числами, превышающими стандартные типы данных. Такой подход позволяет учитывать процессы, возникающие при смене значений входных сигналов, с помощью многозначных алфавитов. В описание системы на логическом языке включаются: перечень элементов и их атрибутов (функций); отношения (предикаты) между элементами; аксиомы, определяющие эти отношения и атрибуты (зависимости между элементами); аксиомы, задающие ограничения на зависимости (условия «правильности» функционирования, аварийные ситуации). Цель логического подхода – создать структурную модель системы, отражающую взаимосвязи между данными и функциональными компонентами, без привязки к конкретной технической реализации.

Авторами исследуется подход к моделированию транспортных процессов, основанный на языке в классической логике предикатов первого порядка с равенством. Для выделенного эффективно реализуемого класса формул доказана его выразительность и определена семантика, допускающая точный контроль не только неопределенности, но и переопределения атрибутов и семантического противоречия. Анализируется возможность повышения выразительности описаний за счет расширения используемых спецификаций встроенной арифметикой. Определены достаточные условия конечной завершенности интерпретации определений с арифметическими функциями.

В качестве иллюстрации доказанных теоретических положений приводится описание прототипа, соответствующего реализации технологических процессов грузовой припортовой станции. Для представления динамических аспектов в логические формулы включаются переменные времени. Главным предназначением станции является выполнение операций по приему и отправке грузов железнодорожным транспортом из морского торгового порта, что описывает представленный прототип. Испытание динамического прототипа показало обнаружение аварийных ситуаций для временных промежутков не менее минуты (время ручного ввода фактов). Иными словами, метод хорошо показал себя как инструмент быстрого создания логического прототипа динамической структуры моделируемого объекта. Выведены достаточные синтаксически проверяемые условия конечной завершенности интерпретации определений с арифметическими функциями. Выразительность полученных классов спецификаций оказалась достаточной для создания динамического прототипа реализации технологических процессов железнодорожной станции.

В [2] исследуется роль аргументации в заслуживающих доверия системах принятия решений. Аргументация – это процесс приведения аргументов с целью убедить собеседника понять или принять точку зрения. Цель – сделать так, чтобы адресат принял выдвигаемую теорию, подтвердить ее истинность вескими доводами. Аргументация важна в разных ситуациях, например, когда нужно убедить собеседника во время переговоров, донести до сотрудников смысл задачи и пользу от ее выполнения;

внедрить изменения в индустрии и работать с возражениями, если большинство настроено против. Классическая структура аргументации включает обосновываемое утверждение (тезис), данные, подтверждающие истинность тезиса (аргументы), и демонстрацию логической связи между аргументами и тезисом. Основные принципы убедительной аргументации включают четкие формулировки, логичность изложения, учет позиции оппонента и продумывание контраргументов.

По мнению автора, ключевым понятием в этой структуре является атака аргументов – абстрактное формальное отношение, представляющее возможность опровержения одного аргумента другим. Соответственно аргументы представляются в виде сетей атак. В работе предлагается подход, формализующий представление об аргументированном (не сводимом к дедуктивному рассуждению) принятии решений с использованием логики аргументации. Предложенные формальные средства используются для анализа соответствия принятых решений объективному знанию на основании логической непротиворечивости. Обнаруженная зависимость результата такого анализа от аргументационной семантики свидетельствует о необходимости выбора семантики, адекватной природе задачи, для использования в системах управления и принятия решений. В частности, речь идет об использовании аргументации для построения объяснимых систем в прикладных областях медицинской информатики, транспорта, безопасности, робототехники и других системах, которые могут быть реализованы в различных областях простым изменением базы знаний.

В [3] исследуются логические и метрические расширения интервальной логики Аллена (LA). Эти расширения позволяют описывать не только качественные, но и количественные зависимости между темпоральными интервалами. Отметим, что булево расширение логики $LA+$ – это булевы комбинации LA с помощью связок \sim, \wedge, \vee . Например, множество предложений $LA+$ – замыкание множества предложений LA с помощью связок, а предложения $LA+$ могут включать пропозициональные переменные и атомарные ограничения. Особенности LA являются ее выразительность, которая увеличивается за счет добавления пропозициональных связок, а также то обстоятельство, что семантика расширенной логики определяется естественным образом – семантика языка LA сочетается с семантикой булевых связок.

Что касается метрических расширений логики Аллена (LA), то предложения расширенной логики – это булевы комбинации логики Аллена с включенными метрическими ограничениями для временных точек. Их некоторые особенности состоят в следующем: атомарные ограничения – равенства или неравенства видов $X = Y, X - Y = r, X - Y < r$ и др., где X, Y – концы интервалов, r – натуральное число; составное ограничение – конъюнкция атомарных ограничений, причем точка с запятой используется как знак для конъюнкции; связка Аллена с метрическими ограничениями – выражение вида $?(?)$, где $?$ – ограничение. Отметим, что расширенная логика позволяет описывать не только качественные, но и количественные зависимости между интервалами. Также для расширенной логики Аллена имеется метод дедукции, использующий аналитические таблицы, который применяется для вычисления ответов на запросы к онтологиям, записанным в языке расширенной логики. Преимущества использования метрических расширений известны: универсальность метрической системы, позволяющая ученым и инженерам по всему миру обмениваться данными и результатами без необходимости пересчета и адаптации, а также логичность и простота, взаимосвязь между различными физическими величинами, точность и стабильность, важные для научных исследований и высокотехнологичных производств, экономическая эффективность единой системы измерений, которая способствует стандартизации производственных процессов.

Авторы небезосновательно утверждают, что интервальная темпоральная логика Аллена довольно активно используется в процедурах поиска решения в современных интеллектуальных системах реального времени, поскольку она имеет алгоритм взаимодействия полиномиальной сложности. Однако этот алгоритм не является полным. В статье предлагаются логики, которые являются булевым и метрическим расширениями логики Аллена. Представлены обоснованные и полные системы правил вывода для этих логик (в виде аналитических таблиц). Показано, как эти логики могут быть применены к принятию решений на примере задачи логической конкретизации. Исследование проводится в рамках разработки методов и моделей для представления временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений в режиме реального времени.

В [4] исследуются критерии разумности интеллектуальных систем. Это подходы, которые оценивают, насколько система проявляет разумное поведение, решает задачи, не отличающиеся от человеческих, или соответствует определенным характеристикам. Эти критерии связаны со спорами о сущности разума, с исследованиями в области ИИ и с этическими аспектами. Поведенческий критерий предполагает, что система считается разумной, если демонстрирует поведение, не отличающееся от

человеческого, в нормальных ситуациях. Например, тест Тьюринга, который проверяет способность к языковой коммуникации: если машина демонстрирует неотличимую от человека способность общаться и поддерживать разговор, она успешно проходит тест. Критерий, связанный с символическим подходом, предполагает, что разум рассматривается как устройство, оперирующее информацией в соответствии с формальными правилами, а все знание и все задачи могут быть формализованы. Критерий целенаправленного поведения предполагает определение интеллекта через его способность достигать целей с определенным качеством, а также способность к самообучению и адаптивности ИИ, понимаемую как способность к развитию интеллектуальной системы в соответствии с объективными изменениями модели проблемной области. Критерий этичности означает прозрачность и объяснимость системы, чтобы процессы и результаты принятия решений были понятны всем заинтересованным сторонам, а также человекоцентричность алгоритмов, разрабатываемых для расширения возможностей людей, а не на замену им.

Современные исследования, посвященные критериям разумности интеллектуальных систем, в основном сосредоточены на следующих подходах:

- разработка эталонных тестов для оценки производительности систем искусственного интеллекта. Например, исследователи в области машинного обучения создали инструменты, которые позволяют отслеживать прогресс в разработке систем «общего назначения» – *AgentBench*, оценивает способность большой языковой модели вести себя как агент;
- оценка «сильного» ИИ по выполнению простых задач, связанных с абстрактным мышлением и способностями к обобщению;
- проверка способностей систем ИИ действовать в реальном мире;
- гибридный подход к оценке ИИ-систем с использованием широкого спектра методов, которые выявляют как сильные, так и слабые стороны ИИ.

При этом многие ученые считают, что универсального метода определения «разумности» машин не существует и, вероятно, никогда не появится. Идея о едином тесте, способном однозначно установить интеллектуальность ИИ, постепенно уходит в прошлое.

Авторы статьи считают, что можно выделить ключевые аспекты, которые позволяют оценить потенциальные возможности искусственных систем по демонстрации разумности поведения. По их мнению, критерий разумности ИИ должен включать этические и функциональные аспекты оценки, рациональность и оптимизацию процессов принятия решений, постановки целей и их достижения. Четкие критерии оценки систем ИИ имеют решающее значение для обеспечения того, чтобы технологии ИИ были полезными, этичными и соответствовали общественным ценностям. Это подразумевает баланс между инновациями и регулированием. Предлагаемый подход основан на оценке разумности ИИ через призму его способности самостоятельно генерировать цель деятельности, воспроизводить наиболее соответствующий ожиданиям результат, а также тиражировать этот результат. Дальнейшие исследования по данной тематике, по-видимому, должны быть направлены не только на повышение эффективности алгоритмов, но и на моделирование когнитивных процессов, лежащих в основе творчества и осознанного мышления.

Статья [5] посвящена проблеме минимального поиска строк при обычных ограничениях. Отметим, что строчные критерии поиска в целом включают минимальную и максимальную длину строки, набор разрешенных символов, а также дополнительные ограничения на строку (разрешенные или неразрешенные комбинации символов, ограничения на количество тех или иных символов и т. п.). Также в строчных критериях поиска могут быть указаны: логика поиска (поиск по включению, началу, концу или точное совпадение); многословный и контекстный поиск (поиск по отдельным словам, поисковый запрос, где результаты сочетаются по логическому ИЛИ, игнорированию падежей и т. п.); обработка пробелов (игнорировать, обрезать лидирующие пробелы слева-справа, последовательность пробелов сокращать до одного).

Авторы исследуют проблему поиска минимальных строк в рамках данного языка в соответствии с заданными шаблонами. Предлагается системный подход, позволяющий задавать шаблоны с помощью регулярных выражений и выполнять над ними операции, такие как объединение соответствующих регулярных языков. Оказалось, что этот подход позволяет найти все минимальные строки, которые удовлетворяют нескольким ограничениям шаблона одновременно. Это обобщение хорошо известной задачи о кратчайшей общей суперпоследовательности (SCS), которая важна при решении задач планирования, сжатия данных, оптимизации запросов к базе данных, в биоинформатике, где цель со-

стоит в том, чтобы найти самую короткую строку, содержащую все заданные шаблоны в виде подпоследовательности. Этот подход был успешно применен для анализа последовательностей ДНК, продемонстрировав его практическую полезность в приложениях биоинформатики.

2 Интеллектуальные системы поддержки принятия решений

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений (ИСППР) – это специализированные программные комплексы, которые используют методы и технологии ИИ для решения сложных управленческих задач. Такие системы помогают лицам, принимающим решения (ЛПР), анализировать данные, формулировать возможные альтернативы и выработать рекомендации на основе полученной информации. В настоящее время выделяют разные категории ИСППР:

- системы на основе анализа данных, использующие статистические методы и алгоритмы машинного обучения для обработки больших объемов информации и выявления шаблонов;
- экспертные системы, основанные на знании экспертов в конкретной области и позволяющие моделировать сложные ситуации, где необходим глубокий анализ;
- системы поддержки группового принятия решений, обеспечивающие платформу для совместной работы и взаимодействия между группами экспертов и менеджеров.

Их основные функции известны:

- поиск функциональных и логических закономерностей в предоставленных данных;
- построение моделей и правил, которые объясняют найденные закономерности и прогнозируют развитие некоторых процессов с определенной вероятностью;
- выбор наилучшего решения из множества возможных (оптимизация) или упорядочение возможных решений по предпочтительности (ранжирование);
- учет множества факторов, влияющих на окончательное решение.

Архитектура ИСППР, представленная на рис. 2, включает несколько компонентов, каждый из которых отвечает за определенную функцию: база знаний, содержащая информацию, необходимую для принятия решений, может быть представлена в виде фактов, правил или моделей; модели, отвечающие за вывод новых знаний из базы знаний, использующие различные алгоритмы, стратегии, правила вывода; пользовательский интерфейс, позволяющий пользователям взаимодействовать с системой и получать необходимую информацию и рекомендации для принятия решений.



Рис. 2. Архитектура ИСППР

В ИСППР используются методы машинного обучения, принятия решений в неопределенных и расплывчатых условиях, а также комбинации различных подходов к поддержке принятия решений, включая нейронные сети и системы интеллектуального анализа данных.

Статья [6] посвящена поддержке принятия решений с помощью рассуждений по аналогии, основанных на гибридном подходе к поиску конкретных ситуаций. Это метод, при котором знания, полученные из рассмотрения одного объекта, переносятся на другой, сходный по существенным свойствам. Заметим, что это позволяет понять сложившуюся ситуацию в сравнении с другой подобной ситуацией, а также сделать вывод о свойствах или поведении одного объекта на основе его сходства с другим объектом, свойства которого известны. Обычно метод используется в ИСППР для решения задач, когда требуется перенос решения из другой предметной области при наличии структурных или ролевых сходств. Для аналогии требуются не любые совпадения, а сходства в существенных признаках

при несущественности различий. Именно такие сходства служат основой для подобия объектов. При этом выделяют различные типы аналогии, например аналогию свойств и аналогию отношений между объектами. Алгоритмы, реализующие процесс вывода на основе аналогий, обычно включают следующие этапы: определение потенциальных аналогов, отображение между базой и целью, а также вывод. Степень сходства текущей ситуации и аналога может определяться с помощью различных методов, например методом ближайшего соседа.

Известны примеры реализации подобного рода подхода:

- для решения задач в повторяющихся ситуациях – рассуждение как основа принятия решения для множества управленческих решений в повторяющихся ситуациях;
- для задач прогнозирования;
- для решения технических проблем.

Следует иметь в виду ограничения, связанные с применением данного подхода: выводы по аналогии носят вероятностный характер, одного лишь рассуждения недостаточно для принятия решения в новой или сложной ситуации, когда у лица, принимающего решение, отсутствует соответствующий опыт или имеющаяся информация о ситуации недостаточно полна и достоверна. При оценке достоверности аналогий используются следующие критерии:

- количество сходств (чем больше сходств между областями, тем сильнее аналогия);
- количество различий (чем больше различий, тем слабее аналогия);
- степень незнания (чем больше степень незнания двух областей, тем слабее аналогия);
- причинно-следственные связи (анalogии, включающие причинно-следственные связи, более правдоподобны, нежели аналогии, не включающие таких связей);
- структурные аналогии (структурные аналогии сильнее, чем те, которые основаны на поверхностном сходстве);
- значимость сходств и различий для вывода.

Авторы статьи предлагают гибридный метод рассуждения по аналогии, сочетающий поиск примеров по аналогии на основе знаний предметной области с использованием классического алгоритма анализа данных k -ближайших соседей (k -NN). Используемые в данном случае предметно-ориентированные базы данных и базы знаний формируются в соответствии с их онтологиями, которые явно определяют их структуру, ограничения на возможное содержание и правила интерпретации. Описания конкретных случаев представлены в работе в онтологических терминах, понятны для пользователей и проводятся специалистами в предметной области.

Метод является двухэтапным. На первом этапе используются формализованные знания в предметной области и справочные базы данных для приведения всех параметров наблюдения к общей метрике и оценки их числовых эквивалентов. На втором этапе на основе оцененных эквивалентов вычисляется мера сходства случаев с использованием алгоритма k -NN. Авторы отмечают, что такой гибридный подход позволяет гибко и точно оценивать сходство ситуаций в случаях, содержащих разнородные параметры, решает проблему методов логического обоснования, основанных на конкретных примерах, а именно выбора методов для оценки сходства. Предлагаемый метод, по мнению авторов, особенно эффективен в сценариях, где не хватает знаний, стандартизированных решений, а также когда другие подходы, в частности методы, основанные исключительно на знаниях или машинном обучении, не дают адекватных решений.

Метод был успешно апробирован в двух прикладных областях: в медицине, где он был использован в качестве основы для системы поддержки принятия решений (СППР) при назначении персонализированного медикаментозного лечения, и в лазерном аддитивном производстве, использующем технологию направленного энергетического осаждения, что помогает инженерам-технологам настраивать режимы работы роботизированного оборудования, подходящие для выполнения конкретных технологических операций.

В [7] предлагается многокритериальный метод принятия решений при эвакуационных мероприятиях. Это подход направлен на выбор оптимальной стратегии эвакуации с учетом нескольких критериев, учитывая неопределенность и нечеткость информации. Такой метод подходит для задач эвакуации при чрезвычайных ситуациях, где необходимо быстрое реагирование в условиях дефицита времени и неопределенности. Метод должен включать учет критериев (вместимость помещений, легкость эвакуации, уровень безопасности убежищ), а также учет мнений экспертов через оценки критериев и альтернатив, которые могут быть выражены в лингвистических переменных, что позволяет учитывать сомнения и неуверенность экспертов. Эти принципы хорошо известны, они позволяют формализовать

задачу, определив множество вариантов, векторный критерий и весовые коэффициенты, а также учитывать компромисс выбора.

Основными этапами многокритериального метода принятия решений для сценария эвакуации являются:

- построение модели задачи, например, в виде эвакуационной транспортной сети;
- ранжирование помещений для эвакуации;
- агрегирование оценок по критериям, представленным в виде нечетких интуиционистских значений, в отличие от традиционных четких чисел;
- потоковая динамическая эвакуация с учетом возможности размещения пострадавших в помещениях для эвакуации, не являющихся убежищами.

При реализации многокритериального метода принятия решений для сценария эвакуации используются СППР, которые позволяют реализовывать формализованные процедуры многокритериального выбора вариантов, а также учитывать информацию о предпочтениях экспертов, например, получать нормированные коэффициенты относительной важности критериев на основе последовательного сравнения оценок.

Авторы предлагают решать задачу принятия решения о выборе наилучшей альтернативы эвакуации в виде организации промежуточного узла для размещения пострадавших и максимизации транспортируемого потока людей в нечетких условиях. Принятие решения в разработанном алгоритме основано на неопределенном лингвистическом операторе упорядоченного усреднения, который позволяет оперировать словами и лингвистическими переменными, что удобно для экспертов. Алгоритм состоит из пяти этапов. На первом этапе сеть эвакуации представляется в виде динамического графика и выполняется переход к сети с расширением во времени. На втором этапе определяется максимальный поток от источника к приемнику. Для транспортировки потока, остающегося в промежуточных вершинах, осуществляется транспортировка людей из вершин, не являющихся поглотителями. Транспортировка осуществляется из вершин, ранжированных по различным критериям в соответствии с принятием нечетких лингвистических решений (третий этап). После определения списка промежуточных вершин четвертый этап предполагает транспортировку потока к стоку из промежуточных вершин. Окончательный поток эвакуации рассчитывается на пятом этапе. Эта методика может быть применена в случае реальной эвакуации населения или при составлении планов реагирования на эвакуацию. В будущем планируется учитывать панику и иррациональное поведение людей при эвакуации, наличие перекрытых путей (например, из-за обрушения зданий или деревьев на дорогах), параметры риска и опасности эвакуации, которые могут сделать недоступными «оптимальные» маршруты, и другое.

В [8] предлагается контекстно-ориентированный подход к нечеткой параметризации функций принадлежности для принятия решений в задачах управления сложными системами. Речь идет о методе построения функций принадлежности (субъективных мер нечеткости) с учетом контекста свойств объекта и восприятия эксперта. Такой подход позволяет учитывать неопределенность, связанную с неоднозначностью и расплывчатостью категорий человеческого мышления, и строить функции принадлежности, которые содержательно представляют степень истинности соответствующего одноместного нечеткого предиката.

Подход предполагает, что функция принадлежности задается на основе экспертных оценок. Эксперт определяет значения функции принадлежности, характеризующей понятие, и они согласуются с его предпочтениями на множестве объектов. Отметим следующие особенности данного подхода:

- учет измеримых свойств (скорость, время, температура и т. п.) путем непосредственного задания значений степени принадлежности;
- учет качественных свойств (например, «скорость движения автомобиля находится приблизительно в пределах 50–60 км/ч»), когда на начальном этапе может быть достаточно представить множество трапецевидной функцией принадлежности с параметрами, соответствующими этому свойству. В последующем функция принадлежности может быть уточнена опытным путем на основе анализа результатов решения конкретных задач.

В настоящее время для реализации контекстно-ориентированного подхода используются прямые методы, когда эксперт непосредственно задает правила определения значений функции принадлежности, характеризующей понятие; косвенные методы, когда значения функции принадлежности выбираются таким образом, чтобы удовлетворять заранее сформулированным условиям (например, функция принадлежности должна отражать близость к заранее выделенному эталону); метод парных сравнений, когда отсутствуют измеримые свойства объектов в рассматриваемой предметной области.

Авторы отмечают, что предлагаемый подход для задачи управления предназначен в первую очередь для снижения трудоемкости составления базы правил для управления сложными системами. В то же время к преимуществам подхода можно отнести высокую степень взаимозаменяемости полученного результата при контроле за счет использования деревьев решений и нечеткой базы правил «если-то». В ряде исследований уже были выявлены положительные аспекты контекстуальных моделей, которые обычно основаны на двух компонентах: математическом аппарате для моделирования зависимостей, обеспечивающем основу для детерминистского подхода к решению задач. Второй компонент включает механизм адаптации для решения задач в изменяющихся условиях. Для этого компонента авторы выбрали реализации в виде онтологий и баз правил «если-то», в том числе нечетких. Такой метод интеграции позволяет повысить гибкость применения модели и точность в ограниченных случаях (недостаток данных, невозможность построения адекватной модели). Текущее исследование показало наглядный пример снижения трудоемкости при формировании базы правил.

В [9] анализируется контекст в практике принятия решений с учетом мнений экспертов. Это процесс, при котором ситуация анализируется с учетом сложности проблемы, а мнения экспертов используются для подготовки информации для принятия решений. Цель – учесть специфику конкретного случая, выявить и ранжировать наиболее значимые факторы, оценить альтернативы и выбрать оптимальный вариант решения. Такой подход помогает учесть неопределенность: решения принимаются в условиях неопределенности, и мнения экспертов помогают оценить последствия альтернативных вариантов, а также выявить и учесть редкие и противоречивые мнения – это важно, так как при формальной обработке результатов экспертизы мнение одного, наиболее компетентного эксперта может оказаться правильным, но при формальной обработке данных оно может быть утрачено.

Для анализа контекста с учетом мнений экспертов используют методы экспертных оценок. Они включают сбор мнений – эксперты фиксируют свои заключения в специальном документе, где подробно описываются проведенные исследования и порядок действий, обработку мнений – результаты экспертного оценивания анализируются, например, оценивается согласованность мнений экспертов, выявляются зависимости между суждениями различных экспертов, а также сценарный анализ, позволяющий рассмотреть несколько вариантов и их последствия. Анализ контекста с учетом мнений экспертов может включать формирование экспертной группы (требования к экспертам, оценка их компетентности, выбор экспертов, размер групп), проведение экспертизы и учет результатов экспертизы путем построения обобщенной оценки объектов по индивидуальным оценкам экспертов, определение зависимости между оценками по различным показателям сравнения.

Отметим, что при анализе контекста с учетом мнений экспертов важно избегать субъективности – как индивидуальных, так и групповых мнений экспертов. Например, игнорирование мнений экспертов-диссидентов, использование методов усреднения (когда, о чем мы говорили выше, при формальной обработке данных наиболее компетентная оценка может быть утрачена).

Авторы анализируют влияние внутреннего контекста (специализация врача) и внешнего контекста на принятие клинических решений. На основе использования обратного обучения с подкреплением моделируется состояние восприятия во время оценки решения и вводится контекст как функциональное состояние. Введение внутреннего контекста приводит к подкреплению вознаграждением, в то время как добавление внешнего контекста позволяет увидеть внутреннюю ситуацию. Анализ стратегий долгосрочного и краткосрочного вознаграждения с учетом контекста показал изменения в функции вознаграждения, которые делают акцент на штрафах, а не на вознаграждении для специалистов (эндокринологов), в то же время проявляя снисхождение к неспециалистам. В целом результаты, полученные авторами, показывают, что введение большого количества контекстуальной информации может повысить значимость функций вознаграждения, отражающих человеческие характеристики и поведение, стоящие за принятием решений, с учетом условий вознаграждения и наказания. На это влияют как внутренние, так и внешние факторы. Авторы считают это важным шагом к оптимизации взаимодействия ИИ с человеком. В перспективе планируется демонстрация результатов моделирования поведения при принятии решений во время взаимодействия человека и ИИ для расширенной оптимизации обратной связи в режиме онлайн-обучения.

В [10] представлены методы интеллектуального анализа данных (ИАД) для классификации сложных объектов (на примере режимов эксплуатации нефтяных скважин). Это методы, которые выявляют скрытые закономерности в данных, с помощью которых можно построить модели для определения класса, к которому принадлежит новый объект. Такие методы основаны на математических моделях, алгоритмах машинного обучения и ИИ. Наиболее популярными методами ИАД для классификации сложных объектов являются:

- нейронные сети, обученные на примерах, для которых известны значения исходных данных и результаты. «Обученная» сеть способна классифицировать новые объекты, но правила классификации остаются неизвестными пользователю;
- деревья решений, которые создают иерархическую структуру правил «если-то», последовательно разбивая пространство признаков на области. Каждое разбиение выбирается для максимального уменьшения неоднородности;
- метод k -ближайших соседей, основанный на поиске ближайших объектов с известными значениями целевой переменной. Объекты относят к классу, которому принадлежит большинство из k его ближайших соседей в многомерном пространстве признаков;
- логистическая регрессия, которая оценивает вероятность принадлежности объекта к классу, применяя логистическую функцию к линейной комбинации признаков. Если полученная вероятность превышает 0,5, объект относят к положительному классу, иначе – к отрицательному.

Процесс ИАД для классификации сложных объектов включает понимание и формулировку задачи, подготовку данных, применение и оценку методов. Для реализации методов ИАД при классификации сложных объектов используют обычно специализированные инструменты или платформы интеллектуальной обработки данных. После построения модели и обнаружения закономерностей оценивают качество извлеченных данных и производительность модели. Для этого используют оценочные показатели, такие как точность, полнота, оценка F1, а также применяют кросс-проверку – точность классификации тестового множества сравнивают с точностью классификации обучающего множества. Если классификация тестового множества дает приблизительно такие же результаты по точности, считается, что модель прошла кросс-проверку.

В результате проведенных авторами исследований на основе методов *FSNN*, *FS-SVM* и сверточных нейронных сетей была разработана и протестирована система классификации режимов течения нефтегазового потока, способная надежно распознавать характерные режимы в различных условиях эксплуатации. Представлена архитектура разработанного программного комплекса поддержки принятия решений. Показана область применения разработанного ансамблевого подхода. Предложенное решение полностью соответствует требованиям математической корректности и ограничениям в виде сложности архитектуры нейронной сети. Проведенный сравнительный анализ эффективности различных методов подтвердил преимущество ансамблевых моделей в повышении точности классификации. По мнению авторов, результаты исследования открывают перспективы для внедрения разработанных алгоритмов в промышленные системы мониторинга и управления многофазными потоками, что способствует повышению надежности и эффективности технологических процессов.

В [11] предлагается гибридный алгоритм, позволяющий строить в реальном масштабе времени траектории на местности минимальной длины с одновременной оптимизацией ряда других критериев качества построенного пути. Авторы считают, что, несмотря на достаточно большое число разработанных моделей и алгоритмов управления подвижными объектами в условиях неопределенности, исследователи часто сталкиваются с рядом проблем, к числу которых относится трудность в обосновании качества результатов анализа, учитывающего специфику конкретной задачи. К числу перспективных тенденций относится разработка гибридных методов. В гибридных алгоритмах, объединяющих различные либо одинаковые алгоритмы, но с различными значениями свободных параметров, преимущества одного алгоритма могут компенсировать недостатки другого. Их отличительная особенность заключается в том, что перемещение подвижного объекта по траектории происходит практически одновременно с ее формированием в реальном времени. Моделирование построения траектории является достаточно сложной задачей, требующей учета многих факторов и применения методов многокритериальной оптимизации. Успешное решение этой задачи зависит от правильного выбора весовых коэффициентов для каждого параметра и разработки алгоритма, способного к адаптации к изменяющимся условиям и обеспечению высокой степени безопасности движения. Анализ результатов тестовых примеров позволил оценить эффективность разработанного алгоритма и выявить области для дальнейшего его улучшения.

В результате проведенных исследований было установлено, что предложенная методика пошагового проектирования траектории позволила повысить эффективность решения, что подтверждено результатами эксперимента. Анализ показал, что значительное влияние на улучшение характеристик оказало использование адаптивного опорного вектора, задающего предпочтительное направление перемещения объекта, методику построения траектории, а также подходы к расположению и ориентации объектов на местности локальной зоны видимости и регионов. Использование предложенной методики и

методов проектирования траектории с учетом упомянутых факторов позволяет упростить конфигурацию траектории и минимизировать ее общую длину, в результате чего снижаются вычислительные затраты и время прохождения по маршруту. Источником усовершенствования может быть более детальная проработка вопросов, связанных с формированием локальной зоны видимости и выбором (сменой) текущих исходных позиций, что ускорит процесс достижения подвижным объектом целевого состояния.

В [12] разработан алгоритм оптимизации траектории управления под контролем ограничений для моделей с ненаблюдаемыми переменными. Речь идет о процессе проектирования траектории, которая минимизирует или максимизирует заданную меру производительности при соблюдении набора ограничений, но при этом неизвестны некоторые параметры системы (например, начальное состояние). Целью здесь является поиск оптимального управления, которое обеспечивает достижение целевого значения на заданном горизонте планирования, учитывая ограничения на управляющие воздействия. Критерий оптимальности может быть различным: качество динамики процессов управления, надежность системы, энергопотребление и т. п. Основными подходами для решения задач оптимизации траектории для моделей с ненаблюдаемыми переменными являются адаптивное динамическое программирование с использованием нейронных сетей для аппроксимации функций ценности и политик управления, а также псевдоспектральный метод и алгоритмы на основе теории нечетких множеств.

Авторы предложили алгоритм работы в условиях управляющих ограничений для решения задачи LQ с конечным горизонтом для инвариантной по времени дискретной системы с матрицей динамики графа. LQ -задача оптимального управления (*Linear-Quadratic Optimal Control, LQ*) – это задача, в которой динамика системы описывается линейными дифференциальными уравнениями, а функция качества – квадратичной. Решение такой задачи – линейно-квадратичный регулятор (*LQR*) – контроллер с обратной связью, который минимизирует квадратичную функцию. Цель – найти управление, которое минимизирует заданную квадратичную функцию. Предлагаемый алгоритм находит последовательность управляющих воздействий в допустимом конусе на горизонте, минимизируя квадратичную функцию затрат на вход и выход вектора.

Авторы считают, что подход будет очень полезен при решении реальных задач управления в отсутствие данных. Матрица динамики определяет только закон передачи влияний между факторами модели. На примере демонстрируется, что алгоритм может быть использован для определения траектории управления, позволяющей двигать систему в заданном направлении развития при наличии ограничений на допустимые управляющие воздействия. В этом случае на вектор управляющих воздействий могут быть наложены ограничения в зависимости от имеющихся ресурсов у лица, принимающего решения. Важным преимуществом предлагаемого подхода является то, что траектория дискретного управления эффективно повторяет направление условного главного собственного вектора матрицы динамики с фиксированной конечной точкой с точностью 10^{-6} . Относительное отклонение в конечной точке не превышает 0,7029 %. Доказывается существование решения дискретной задачи оптимального управления при интегральных и управляющих ограничениях, как и достаточные условия сходимости итерационного процесса.

В [13] обсуждается одна из нерешенных проблем в теории графов – реконструкция топологии графов. В отсутствие временных рядов данных для графовой модели сложной системы решение этой задачи значительно усложняется. По стартовой матрице смежности получается условный спектр матрицы квадратичной формы, формируемой из передаточной функции модели управления. Если изменить этот спектр, то реконструируются веса графа из портрета матрицы смежности в допустимых границах. Авторы предложили алгоритм реконструкции, который учитывает важную особенность матрицы смежности графа – направление главного собственного вектора к целевой вершине. Когда графы имеют одинаковую топологию, но разные веса на дугах, то их спектры образуют в пространстве решений некоторый набор нечетких коллинеарных векторов. Линии этих векторов расходятся в пространстве векторов из-за их направленности к разным вершинам. За счет интеграции спектра графа и модели эффективного управления в задачу комбинаторной оптимизации показывается, как можно достичь полной реконструкции весов графа с приемлемой точностью.

В [14] исследуется формализованная методология разработки организационной структуры, направленной на развитие цифрового сознания у студентов университетов, и представлен пилотный проект, рассчитанный на один семестр. Во-первых, структура центра развития метакомпетентности, основанная на цифровых, социально-коммуникативных и когнитивных компетенциях и координируемая интегративным сектором, уменьшает фрагментацию и приводит деятельность в соответствие со стратегическими результатами обучения. Во-вторых, экспериментальная реализация продемонстрировала ощутимые улучшения в цифровых навыках, критическом мышлении. Командная работа в режиме

онлайн предполагает, что скоординированный подход даст ощутимые преимущества за короткий период. В-третьих, формализация с помощью институциональных правил способствует прозрачности, устойчивости и стратегическому внедрению. Наконец, модульность модели позволяет адаптировать ее к различным институциональным контекстам, при необходимости добавляя дополнительные области (например, предпринимательские навыки или грамотность в области искусственного интеллекта). В целом, когда метакомпетенции четко организованы с помощью специально созданной структуры и подтверждаются доказательствами с помощью смешанных методов, цифровое сознание становится измеримым образовательным результатом, а не абстрактным лозунгом.

В [15] отмечается, что разработки в области лидаров и других технологий дистанционного зондирования Земли существенно улучшили возможности по выявлению и исследованию археологических памятников, что позволило получить бесценную информацию об исторической деятельности человека. В работе предложен оригинальный быстрый алгоритм классификации и обнаружения археологических памятников с использованием *DTMs* и *YOLOv12*. Алгоритм основан на оригинальной схеме разбиения flash-блоков и критерии для отбрасывания flash-блоков. Уменьшение количества токенов снижает сложность механизма привлечения внимания. Предложенный алгоритм позволяет обнаруживать курганы, поселения в укрепленных/незащищенных поселениях и другие категории с более высоким качеством по точности и показателю *F1*, устраняя при этом основной недостаток, связанный с высокой вычислительной сложностью. Алгоритм был протестирован с использованием результатов дистанционного зондирования из набора данных на археологических памятниках бронзового века Южного Зауралья.

3 Многоагентные системы

Многоагентная система (МАС) – это система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами. Каждый агент – это отдельная программа или модуль, обладающий собственными задачами, возможностями для принятия решений и обмена информацией. Ключевыми свойствами МАС являются децентрализация управления, взаимодействие агентов путем обмена данными и результатами своей деятельности, а также автономность. Особенности структуры МАС – распределение ролей, коммуникационные протоколы и топологии взаимодействия. Рабочие процессы МАС включают несколько последовательных и взаимосвязанных этапов: восприятие окружающей среды, автономное принятие решений, коммуникацию и координацию через стандартизированные форматы сообщений или протоколы, выполнение задач, а также обратную связь и обучение. На рис. 3 представлены основные компоненты ИИ-агентов.

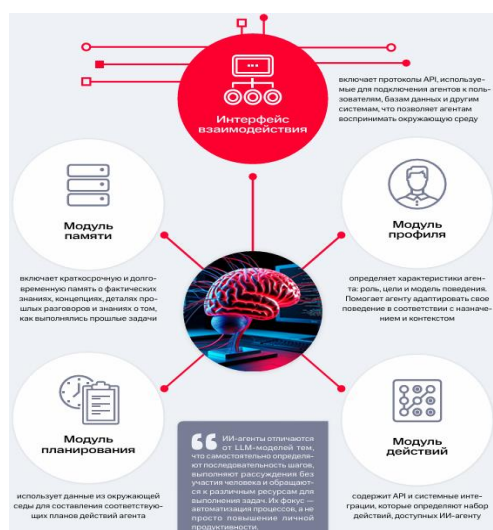


Рис. 3. Компоненты ИИ-агента

В 2023 г. генеративные модели были вершиной развития ИИ. Сейчас начался переход индустрии к новому поколению МАС, состоящих из ИИ-агентов. Пользователи могут объединять агентов в системы, которые автономно организуют сложные рабочие процессы, координируют действия между несколькими агентами, применяют логику к сложным проблемам и оценивают результаты своей работы. Принцип работы ИИ-агентов:

- задача поступает в систему через интерфейс или API;
- запрос делится на отдельные задачи с помощью агента-менеджера;
- задачи распределяются между агентами согласно их специализации;
- каждый агент использует интеллектуальные компоненты: модель (хранит знания и шаблоны работы), цель (понимает, какой результат должен быть достигнут), среда (учитывает внешние или внутренние ограничения) и другие;
- результаты синхронизируются: агенты обмениваются полученной информацией, сверяют промежуточные итоги;
- финальный ответ или результат объединяется и отправляется пользователю или следующему уровню обработки.

Примером МАС могут служить системы роевого интеллекта. Это область ИИ, изучающая коллективное поведение децентрализованных, самоорганизующихся систем. Такие системы обычно состоят из популяции простых агентов (например, муравьев, пчел, частиц), которые локально взаимодействуют друг с другом и со своей средой. Подобного рода системы находят широкое применение и используются в различных областях, например:

- в робототехнике с целью координации большого количества простых роботов для выполнения сложных задач, таких как поиск и спасение, мониторинг окружающей среды и строительство;
- в оптимизации, где метаэвристические алгоритмы используются для решения задач оптимизации в логистике, планировании, распределении ресурсов и инженерном проектировании;
- в логистике и на транспорте, где принципы роевого интеллекта помогают оптимизировать планирование маршрутов и управление движением.

Здесь широкое применение МАС объясняется следующими преимуществами подобного рода систем: масштабируемость и гибкость (система хорошо работает как при небольшом, так и при большом количестве агентов и адаптируется к различным типам задач); подходит для сложных, зашумленных пространств поиска, где традиционные методы испытывают трудности; параллелизм и адаптируемость (агенты работают параллельно, и обновление идет по мере обучения); децентрализация; в случае неисправности одного агента его работу могут взять на себя другие; система использует ресурсы наиболее целесообразным образом; автономия (требует минимального вмешательства человека и может принимать решения самостоятельно).

Отметим также и некоторые ограничения, связанные с применением МАС на основе роевого интеллекта:

- поиск хорошего решения может занять больше времени по сравнению с более целенаправленными методами, поскольку методы, основанные на роевом интеллекте, предполагают изучение широкого спектра возможностей;
- риск преждевременной сходимости, когда агенты могут остановиться на решении слишком рано, не изучив лучшие альтернативы, что может помешать обнаружению наилучшего возможного решения;
- чувствительность к настройке параметров алгоритма;
- конфликты и конкуренция между агентами МАС;
- трудности контроля и предсказуемости поведения роя, что может ограничить его применимость в определенных ситуациях.

В [16] представлен анализ современного состояния исследований в области разработки метаэвристических алгоритмов, инспирированных природой, включая метаэвристики роевого интеллекта. Предлагается их иерархическая классификация на основе следующих критериев: соответствие природной метафоре, структурный, поведенческий, поисковый, компонентный и оценочный признаки. Классификация метаэвристик предполагает систематическое отнесение каждой биоэвристики к одному и только одному классу в рамках системы взаимоисключающих и неперекрывающихся классов. Для каждой метаэвристики имеются конкретные задачи, с которыми она хорошо справляется, что важно для целенаправленного применения метаэвристики. Рассмотрен пример классификации метаэвристик. Отмечено, что наиболее информативным критерием классификации является поведенческий критерий, наиболее цитируемым классом метаэвристик являются алгоритмы роевого интеллекта, а наиболее цитируемой метаэвристикой – алгоритм роя частиц *PSO*. По сути, метаэвристика представляет собой математические преобразования, трансформирующие входной поток данных в выходные решения по правилам, основанным на имитации природных процессов, а также на вероятностном подходе к исследованию ситуаций и итерационном приближении к цели. Общая схема метаэвристики представлена на рис. 4.



Рис. 4. Общая схема метаэвристического алгоритма

Авторы представили современные подходы к бенчмаркингу метаэвристик: задачи дискретной и непрерывной оптимизации, а также оптимизационные инженерные задачи. Отмечена тенденция проводить сравнение производительности метаэвристик, используя статистическую проверку гипотез на бенчмарках. Систематизированы задачи, успешно решаемые метаэвристиками в таких областях, как инженерное проектирование, транспорт и логистика, обработка изображений и компьютерное зрение, компьютерные сети и коммуникации, энергетика и энергоменеджмент, анализ данных и машинное обучение, робототехника, медицинская диагностика. Наметилась тенденция к гибридизации метаэвристики в одном оптимизаторе. Однако требуются убедительные доказательства, что результаты компенсируют увеличение сложности по сравнению с отдельными алгоритмами. Отмечены задачи оптимизации, требующие дальнейших исследований: это динамическая и стохастическая оптимизация, многокритериальная, мультимодальная и многомерная оптимизация, меметическая оптимизация, в которых комбинируется множество поисковых алгоритмов; а также оптимизация и адаптация настроек параметров метаэвристик для достижения баланса между скоростью сходимости и диверсификацией пространства поиска решений.

В [17] авторы отмечают, что наиболее важными задачами принятия оптимальных решений с использованием метаэвристических алгоритмов считаются повышение точности и предотвращение преждевременной сходимости. Большинство исследований в этом направлении сосредоточено на разработке новых операторов, настройке параметров популяционной метаэвристики и гибридизации нескольких стратегий поиска решений. Гораздо меньше внимания уделяется инициализации – важной операции в популяционных алгоритмах, которая связана с созданием исходной популяции агентов. Предлагается новый алгоритм формирования начальной популяции агентов для работы метаэвристического алгоритма. При формировании начальной популяции решений используется подход Метрополиса – Гастингса.

Для демонстрации возможностей предлагаемого алгоритма он был встроен в базовый алгоритм дифференциальной эволюции. Экспериментальная проверка проводилась путем сравнения с такими известными методами, как случайная инициализация, обучение на основе методов оппозиции и хаоса, а также метода диагонального равномерного распределения. Сравнение проводилось на репрезентативном наборе мультимодальных, унимодальных и гибридных функций. Анализировались скорость сходимости алгоритмов и точность получаемых решений. В качестве показателей сравнения использовались среднее значение по лучшим решениям, медианное лучшее решение, стандартное отклонение от лучшего решения, количество вызовов функций, коэффициент успешности, коэффициент ускорения. Оказалось, что предлагаемый алгоритм работает быстрее, показывает лучшую сходимость и точность. Статистическая проверка результатов работы алгоритмов по критерию Фридмана подтвердила, что алгоритм обеспечивает лучший баланс скорости сходимости и точности решений.

В [18] получена эмпирическая оценка примитивов движения при многоагентном поиске оптимальной траектории с динамическими ограничениями. В работе анализируются различные множества движущих факторов при поиске пути агентом с использованием фреймворка *SIPP-IP*. Цель – найти компромисс между сложностью движущих элементов, качеством решений и производительностью вычислений. Результаты, полученные авторами, позволяют выявить четкие и предсказуемые отклонения в конструкции элементов управления движением. Это набор из базовых элементов ускорения и замедления маневров. Однако при этом ухудшается качество решений и увеличивается общее время в пути. Наоборот, представительный набор примитивов позволяет создавать траектории более высокого качества с меньшими затратами на решение. Однако это улучшение уравнивается значительным увеличением вычислительной нагрузки, снижением вероятности достижения успеха в заданные сроки. Промежуточный набор примитивов эффективно уравнивает эти крайности, предлагая практический компромисс.

В результате сравнения со структурой *Priority-Based Search (PSB)* был сделан вывод о том, что в крупномасштабных и сложных средах *PSB* неизменно превосходит все варианты *PBS* с *SIPP-IP*, обеспечивая масштабируемость, более высокие показатели успешности и меньшее время выполнения. Это говорит о том, что в сценариях с большим количеством агентов или обширными картами более эффективной и действенной стратегией является переход от первоначального поиска пути к динамическому внедрению с помощью оптимизации последующей обработки. Авторы считают, что не существует единого «наилучшего» подхода для всех задач многоагентного поиска путей с динамическими ограничениями. Выбор метода зависит от контекста. Для приложений, работающих на небольших или менее перегруженных картах, где первостепенное значение имеет быстрый поиск решения, предпочтителен подход, основанный на примитивах, с использованием упрощенного набора данных. Для крупномасштабных задач оптимизации платформа, основанная на *PSB*, предлагает более масштабируемое решение. В конечном счете выбор конкретного семейства примитивов в рамках подхода *PBS* с использованием *SIPP-IP* позволяет оптимизировать баланс между качеством плана и вычислительными затратами для удовлетворения конкретных требований приложения. В будущем планируется изучить адаптивный примитивный отбор и гибридные методы, сочетающие в себе сильные стороны как поисковой, так и оптимизационной парадигм.

В [19] представлена модель динамики общественного мнения, разработанная специально для небольших социальных групп, состоящих из множества взаимодействующих агентов. Центральное место в модели занимает один стратегический игрок, который оказывает влияние исключительно на одного назначенного агента. Перед игроком стоит двоякая задача: 1) привести мнение группы к заранее определенным целевым значениям в определенные периоды времени; 2) минимизировать комплексную функцию затрат. Эти затраты явно включают расходы на контроль, связанные с вмешательствами, затраты на валидацию, понесенные во время оценки, и штрафные санкции, количественно определяющие ущерб, с помощью анализа мнений агентов и их целей. Игрок осуществляет стратегические вмешательства только в нерабочее время, в то время как агенты постоянно влияют друг на друга через сетевую структуру. Задача решается с помощью уравнения Эйлера; математический подход и теоретический вывод доказывают условия достижения консенсуса. Численное моделирование показывает, что в конечный момент игрок успешно проверяет, сходятся ли мнения агентов в состоянии, близком к консенсусу, одновременно приближаясь к целевым мнениям. Эта стратегия согласования приводит к значительной минимизации общих понесенных затрат.

4 Мягкие вычисления

Мягкие вычисления – это методология использования неточных и математически строго не обоснованных методов и алгоритмов при решении задач, для которых не существует строгих подходов, позволяющих получить точный результат за приемлемое время. Область мягких вычислений включает такие технологии, как машинное обучение, нечеткую логику и эволюционные алгоритмы. В отличие от обычных, «жестких», вычислений, которые требуют точности и единственности решения, мягкие вычисления допускают заданную погрешность и неопределенность для конкретной задачи. Задачи, решаемые методами мягких вычислений, возникают в области робастного управления на транспорте, в биологии, медицине, гуманитарных науках.

Некоторые преимущества мягких вычислений:

- методы мягких вычислений могут справиться с неопределенностью, неточностью и шумом в данных, что делает их подходящими для решения реальных задач;
- методы мягких вычислений могут обеспечить приблизительные решения сложных задач, которые трудно или невозможно точно решить;
- методы мягких вычислений, такие как нечеткая логика и нейронные сети, могут эффективно решать нелинейные задачи;
- методы мягких вычислений разработаны для имитации человекоподобного рассуждения, которое часто более эффективно при решении сложных проблем;
- методы мягких вычислений могут обеспечивать решение сложных задач в режиме реального времени.

Отметим, что мягкие вычисления в некотором смысле устраняют противоречия между когнитивным и коннекционистским подходами в ИИ (рис. 5).



Рис. 5. Мягкие вычисления

В [20] представлен метод для решения проблемы массового обслуживания приложений. Он основан на интеграции биоинспирированного алгоритма оптимизации и нечеткого управления. Разработанное программное приложение было протестировано на примере дискретной модели распределения заявок. В процессе тестирования разработанного программного приложения производилась сравнительная оценка качества получаемых решений с использованием блока нечеткого управления и без него. Полученные результаты подтверждают, что эффективность алгоритма с контроллером выше, чем без него. В то же время качество получаемых решений во многом зависит от выбора типа биоинспирированного алгоритма и правильности настройки его параметров. В будущем планируется провести сравнительную оценку эффективности использования других типов биоинспирированных алгоритмов, в том числе для решения динамических нелинейных моделей рассматриваемой задачи. Планируется усовершенствование интерфейса программного приложения с целью облегчения манипулирования лингвистическими переменными для задания необходимой модели поведения (возможен графический интерфейс), а также добавление модуля обучения контроллера на основе нейронной сети, использующего полученную в качестве обучающей выборки статистическую информацию о взаимосвязи между выбором параметров и эффективностью алгоритма.

В [21] разрабатывается агентно-ориентированный алгоритм для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности. Авторы отмечают, что актуальность рассматриваемой проблемы возрастает по мере расширения элементной базы современных полупроводниковых электронных устройств и совершенствования технологий их изготовления. Растущее число элементов проектируемых электронных устройств привело к необходимости разработки новых алгоритмов для эффективного решения задач большой размерности. Классические численные методы успешно используются для решения задач малой размерности, но они не обеспечивают оптимального решения при увеличении размерности задачи. Одним из новых подходов к решению крупномасштабных СЛАУ является распараллеливание вычислительного процесса, которое позволяет максимально эффективно использовать существующие вычислительные ресурсы. Подходы, основанные на мягких вычислениях, успешно используются для эффективной организации распределенного вычислительного процесса. Агентно-ориентированный подход – это инструмент, позволяющий гибко распределять доступные вычислительные ресурсы и повышать качество решений. Другим многообещающим подходом является использование методов оптимизации, основанных на эволюционных вычислениях. Авторы считают оптимальным гибридный подход к решению крупномасштабных СЛАУ, основанный на интеграции эволюционных алгоритмов, методов оптимизации по Парето и агентно-ориентированного подхода к вычислениям. Предлагается использовать архитектуру программной подсистемы, основанную на сервис-ориентированном подходе. Разработана структура многоуровневой программной подсистемы, основанной на агентно-ориентированном подходе, выполнена программная реализация и проведена серия вычислительных экспериментов, подтвердивших эффективность предложенного подхода.

В [22] рассматривается задача оптимального управления процессом каталитического крекинга вакуумного газойля. Авторы исследуют эффективность модифицированного алгоритма оптимизации роя частиц (*PSO*), улучшенного с помощью направленного сглаживания и рамочных ограничений, для решения сложных задач оптимизации. Механизм рандомизированного направленного сглаживания

был включен в алгоритм *PSO* для обеспечения гладкости решения при сохранении разнообразия и эффективности мягких вычислений. Предложенный подход был применен для решения задачи оптимального управления процессом вакуумного крекинга газойля. Вычислительные эксперименты показали, что механизм сглаживания эффективно сбалансировал результаты исследования и качество решения, в то время как управляемый направленный подход предотвратил преждевременную сходимость. Примечательно, что алгоритм сохранил выполнимость за счет ограничений по блокам без ущерба для скорости сходимости. Однако исследование показало, что реализация полученных решений усложняется из-за увеличения колебаний температурного профиля. Поэтому будущая работа будет сосредоточена на автоматизации выбора предела сглаживания в качестве одного из параметров алгоритма и изучении дополнительных критериев эффективности.

5 Интеллектуальные информационные технологии в области естественных, экономических и социальных наук

Интеллектуальные информационные технологии (ИИТ) – это информационные технологии, которые помогают человеку ускорить анализ политической, экономической, социальной и технической ситуации, а также синтез управленческих решений. Возможности ИИТ постоянно расширяются за счет наличия баз знаний, отражающих опыт конкретных людей, групп, человечества в целом, в решении задач, которые считались прерогативой интеллекта человека; наличия моделей мышления на основе знаний (логических выводов, аргументации, анализа, распознавания и классификации ситуаций); способности формировать решения на основе неполных данных. ИИТ формируются при создании информационных систем и информационных технологий для повышения эффективности принятия решений в условиях, связанных с возникновением проблемных ситуаций. Современные ИИТ весьма разнообразны:

- *по коммуникативным способностям:*
 - интеллектуальные базы данных;
 - системы естественно-языкового интерфейса;
 - гипертекстовые поисковые системы;
 - системы контекстной помощи;
 - системы когнитивной графики;
- *по типу решаемых задач:*
 - экспертные системы;
 - классифицирующие системы для распознавания ситуаций;
 - доопределяющие системы для решения задач с не полностью определенными данными и знаниями;
 - трансформирующие динамические экспертные системам, в которых предполагается преобразование знаний в процессе решения задач;
 - многоагентные системы;
- *по способности к самообучению:*
 - индуктивные системы, основанные на методах автоматической классификации ситуаций из реальной практики или на методах обучения на примерах;
 - нейронные сети;
 - системы, основанные на прецедентах;
 - информационные хранилища.

Также ИИТ можно классифицировать по критерию используемых методов на жесткие, мягкие и гибридные.

Однако имеются определенные вызовы и ограничения, связанные с развитием ИИ, на основе которого часто используют ИИТ. В частности, речь идет об этических и социальных угрозах (например, кибербезопасность и мошенничество, манипулятивный контент, автономные атаки, эмоциональная зависимость от ИИ-персонажей), о рисках замещения рабочих мест, а также о сложностях понимания того, как алгоритмы принимают решения (что особенно проблематично в таких областях, как медицина или судопроизводство), о проблеме авторских прав на контент, созданный ИИ.

В [23] представлена технология раннего выявления информационных угроз психологической безопасности обучающихся образовательных организаций федеральной территории «Сириус», основанная на моделях и методах ИИ. В работе отмечается, что раннее выявление психологических рас-

стройств и воздействия вредной информации на обучающихся имеет решающее значение для предотвращения неблагоприятных исходов. Автор представил интегрированную систему, управляемую ИИ, для упреждающего обнаружения угроз в образовательной среде Центра высокопроизводительного научного образования «Сириус». Система непрерывно отслеживает мультимодальные данные, включая физиологические сигналы от носимых устройств, речь и выражения лица, социальные сети и взаимодействия, поведенческие модели в ультраметрическом пространстве и текстовый контент, чтобы идентифицировать ранние признаки стресса или вредоносного информационного воздействия.

Автор формализовал задачу обнаружения угроз и использовал следующие модули ИИ: классификатор стресса, использующий физиологические сигналы, модели глубокого обучения для распознавания эмоций по голосу и лицу, анализ социальных графов, модель распространения информации в стиле эпидемии, тонко настроенные модели глубокого обучения для мониторинга контента и ансамблевый *Ada*-классификатор, который объединяет эти входные данные. Модули построены на математических моделях для каждого компонента. Первоначальные результаты основывались на тестах с имитированными данными и продемонстрировали возможность значительно повысить психологическую и информационную безопасность обучающихся. По мнению автора, комплексный подход обеспечивает высокую общую точность при выявлении ситуаций, связанных с риском, превосходя конкурирующие подходы.

В [24] представлен гибридный подход с использованием методов ИИ для задач создания программных систем. Авторы справедливо отмечают, что разработка новых программных систем сталкивается с неоднозначностью и неопределенностью терминов, используемых в высказываниях на естественном языке для описания потребностей заказчика. Это приводит к несоответствию программной системы ее изначальной спецификации и требует многократных итераций по доработке. В свою очередь, генеративный ИИ является средством, которое способно интерпретировать неоднозначные и неопределенные термины, выдавая ответы в виде программного кода с высокой релевантностью поставленной задаче. Это должно снизить количество итераций по доработке и получать на ранних этапах рабочие прототипы систем. Однако применимость генеративного ИИ ограничена типовыми задачами.

В задачах создания новых программных средств генеративный ИИ не способен напрямую выдавать требуемый результат. Для решения поставленной задачи с привлечением потенциала генеративного ИИ необходимо, чтобы последний использовался не как создатель программного кода целиком, а как помощник при реализации отдельных проектных решений. Авторы предлагают гибридный подход, использующий генеративный ИИ как вспомогательное средство. Гибридный подход основан на методе формализации требований заказчика на естественном языке и поэтапном синтезе на их основе программной системы. Программная система представляется гибридным подходом как единство методов определения структур хранения данных, методов формализации логики обработки и методов определения логики взаимодействия с пользователем. Генеративный ИИ используется на различных этапах процедуры синтеза программной системы как средство для генерации альтернатив при устранении неопределенности терминов, используемых в высказываниях на естественном языке для описания потребностей заказчика (пользователя).

В [25] предлагается биологически правдоподобная популяционная модель для кодирования временных интервалов. Это модель, которая использует принципы работы биологических систем (например, ансамблей регулярно активирующихся нейронов) для кодирования различных временных интервалов. Преимущества популяционных моделей известны: возможность исследовать сложные взаимодействия в природе, прогнозировать изменения в численности и структуре популяций, оценивать риск исчезновения видов, понимание распространения болезней. Однако у популяционных моделей имеются определенные ограничения: невозможность учета особенностей отдельных индивидов, точного отражения реальных экологических систем, несоответствия между реальными ситуациями и возможными режимами поведения моделей, некоторые модели требуют дополнительных данных для проведения вычислительных экспериментов, что связано с повышением сложности модели.

Такие модели разрабатываются в разных областях, например в исследованиях, посвященных работе мозга, или в математическом моделировании биологических процессов. Их основные характеристики включают соблюдение закона Вебера, т. е. увеличение вариабельности с увеличением продолжительности запоминаемого интервала, а также эффект центральной тенденции (смещение в сторону средней оценки), забывание и возврат к гомеостатическим значениям в отсутствие подкрепляющих стимулов. Предложенная модель отражает ключевые свойства биологических систем, оставаясь при этом простой и поддающейся аналитическому анализу. Кроме того, модель значительно расширяет

теорию скалярных ожиданий и может быть полезна в робототехнике и приложениях искусственного интеллекта.

В [26] авторы представили подход к подбору условий синтеза для получения материалов из металлоорганических каркасов с желаемыми свойствами. Такие материалы широко популярны благодаря своей универсальности, чувствительности к параметрам синтеза. Условия обычно включают выбор методов синтеза, подбор компонентов, контроль параметров, а также постсинтетическую модификацию структуры. Это позволяет создавать материалы с разными размерами пор, формой и функциональными группами, что важно для различных областей применения. Синтез металлоорганических каркасов включает самосборку ионов металлов и органических линкеров в контролируемых условиях. Некоторые подходы: сольвотермальный или гидротермальный синтез, синтез в несмешивающихся растворителях, использование ионизирующего излучения. Выбор стратегии синтеза зависит от типа формируемого каркаса.

Предлагаемый авторами метод позволяет оптимизировать синтез, сокращая время, ресурсы и воздействие производства на окружающую среду. В качестве подтверждения концепции исследование сосредоточено на золь-водном синтезе UiO-66, демонстрируя потенциал метода для практического применения. Этот подход универсален и может быть адаптирован к другим способам синтеза и материальным системам. Авторы отмечают, что анализ разработанных моделей позволяет сделать вывод о возможности использования предложенного подхода к управлению параметрами для дальнейших исследований и практического применения, что обеспечит надежность и точность полученных результатов. Результаты экспериментов не только подтверждают адекватность выбранного подхода, но и открывают возможности для его дальнейшей оптимизации и адаптации к другим задачам. Этот подход может быть применен к смежным задачам при синтезе материалов с заданными свойствами. Например, его можно использовать для оптимизации ключевых параметров химического синтеза, прогнозирования физических и химических свойств новых материалов на основе их структуры и состава или для мониторинга производственных процессов и оперативного реагирования на отклонения от стандартов качества. Подход может быть оптимизирован для задач имитационного моделирования и прогнозирования химических реакций, что ускоряет процесс разработки новых материалов. Дальнейшие исследования авторов направлены на применение нейро-нечетких технологий в области синтеза материалов с заданными свойствами, на использование алгоритмов машинного обучения для ускорения химических исследований, а также гибридных архитектур при управлении микрожидкостным синтезом.

В [27] обсуждался вопрос о применении ситуационного управления для построения адаптивной онтологической среды интеллектуального обучения на основе интегрированных экспертных систем. Это совокупность взаимосвязанных разнородных моделей, процедур, информационных и программных объектов, которые описывают методы построения моделей обучаемых и моделей обучения с учетом использования системы онтологий. Целью такой среды является персонализация обучения путем создания адаптивных учебных программ, которые могут быть настроены под индивидуальные потребности и интересы каждого обучающегося. Это позволяет предоставлять персонализированные рекомендации и учебные материалы, соответствующие уровню знаний и интересам обучающихся. Однако при внедрении адаптивной среды могут возникнуть определенные вызовы, связанные со сложностью настройки, совместимостью адаптивных устройств, работающих на разных платформах, требованиями к качеству связи и к скорости соединения, временем для обучения и адаптации к предпочтениям пользователей, стоимостью, а также конфиденциальностью, защитой данных и юридическими аспектами.

Для автоматизированного управления процессами интеллектуального обучения с использованием обучающих ЭС/веб-ЭС авторы предложили, программно реализовали и экспериментально исследовали гибридный подход, предусматривающий взаимосвязь ситуационного управления системами, моделей представления и обработки знаний в ЭС, а также методов онтологического инжиниринга. По мнению авторов, это позволит расширить возможности системы и повысить доверие к результатам обучения. Модель онтологии представления знаний отличается гибкими интеграционными возможностями, связывающими элементы разнородных моделей обучаемых, моделей обучения, типовых задач интеллектуального обучения.

В [28] рассматривается модифицированная нейросеть *ResNet50* для бинарной классификации вредных визуальных раздражителей, подход к управлению набором данных и тестирование. Предлагаемый подход демонстрирует преимущество при обнаружении вредоносного визуального контента, что подтверждается высокой точностью и отзывчивостью данных, полученных в ходе тестирования. Благодаря интеграции методов обнаружения аномалий с современными архитектурами глубокого обучения, такими как *ResNet50*, а также использованию методов интерпретации, таких как *Grad CAM*,

платформа предлагает надежное и прозрачное решение возникающих проблем в области когнитивной кибербезопасности.

Авторы считают, что согласованность с человеческим суждением, особенно в эмоционально чувствительных случаях, подчеркивает практическую значимость модели для приложений, критически важных для безопасности. Для обеспечения воспроизводимости и поддержки дальнейших исследований в этой области используются аннотированный набор данных, а также обученная модель, которые публикуются в открытом доступе для некоммерческого академического использования. В будущей работе планируется расширение набора данных с включением в него разнообразной в демографическом и культурном отношении базы участников. Требуется также разработка адаптивных механизмов для улучшения обобщения среди разнородных групп населения. Эти направления помогут расширить применимость метода в реальных сценариях и повысить его потенциал для снижения психологических и информационных рисков в автоматизированных средах.

В [29] рассматривается генерация признаков в задаче предсказания оценки выраженности психологических особенностей пользователей социальной сети. Это процесс, при котором из данных, доступных в социальной сети, извлекают признаки, которые, по мнению исследователей, отражают психологические характеристики пользователя. Цель – построить предсказательные модели, которые сопоставляют результаты психологических тестов (например, «Большая пятерка», 16-факторный личностный тест Р. Кеттелла) с особенностями поведения в социальной сети. В настоящее время для генерации признаков используют, например, автоматизированные подходы, методы машинного обучения, анализ структуры эго-сетей. Для генерации признаков используют количественные, бинарные признаки и фиксированные ответы пользователей. Следует иметь в виду некоторые ограничения методов генерации признаков: переобучение, мультиколлинеарность, пропущенные данные, смешение типов, шумные признаки, а также сложность интерпретации, длительность вычислений и ограничения объема данных.

Исследование направлено на повышение метрик качества предсказания оценки выраженности психологических особенностей пользователей социальных сетей моделями машинного обучения за счет формирования новых признаков путем преобразования их из существующих с помощью методов многомерного анализа и ручного преобразования данных. В качестве начальных признаков выступают извлеченные данные со страниц пользователей в социальной сети, а в качестве таргета обучения – результаты прохождения пользователями теста «Большая пятерка». В работе использовались две модели машинного обучения: *CatBoost* и *RandomForestRegressor*, которые сравнивались между собой после обучения на различных признаках: изначальных и сгенерированных. Результаты показали, что синтетическая генерация признаков на основе имеющихся в среднем улучшает результат на 34,17 % по *MAE* и 22,24 % по *RMSE*.

В [30] рассматривается профайлинг карьеры: прогнозирование на основе искусственного интеллекта с использованием цифровых данных из социальных сетей. Это технология, которая позволяет прогнозировать успешность человека в профессии на основе анализа поведения, интересов и других факторов, полученных из интернета. Цель – построить профиль успешного кандидата на трудоустройство, определить, какими навыками он должен обладать, чтобы быть эффективным, и соотнести соискателей с этим образом. Технология использует алгоритмы машинного обучения, которые анализируют данные об имеющихся сотрудниках (показатели производительности, успешность завершения проектов, скорость карьерного роста и т. д.). На основе выявленных паттернов ИИ формирует комплексный портрет идеального кандидата, который включает не только технические навыки, но и поведенческие индикаторы, характеристики предыдущего опыта и другие факторы. Когда на вакансию поступают новые отклики, ИИ-профайлер анализирует данные каждого кандидата (из резюме, сопроводительного письма, анкет) и сопоставляет их с созданным эталонным профилем. Каждому кандидату присваивается балл соответствия, например «95 % совпадения с профилем успешного сотрудника». Некоторые технологии, которые используются в профайлинге карьеры на основе ИИ: обработка естественного языка, алгоритмы машинного обучения, глубокие нейронные сети и предиктивная аналитика. Однако следует иметь в виду некоторые минусы, связанные с использованием профайлинга: риск предвзятости, недостаток гибкости, проблемы с интерпретацией данных, необходимость постоянного обновления, этические вопросы, ограниченность в оценке мягких навыков. Важно осознавать, что даже самые продвинутые техники профайлинга не дают 100 % гарантии точности прогнозов.

Авторы предлагают модификацию автоматизированного прогнозирования профессионального типа личности по модели *RIASEC*, основанной на анализе цифровых следов из социальных сетей, для повышения его точности и практической применимости. В работе реализуется двухуровневая архитектура предсказания. Она позволяет одновременно решать задачу идентификации доминирующего типа

(Тор-1) и восстановления тройки наиболее выраженных типов (Тор-3) с учетом возможных повторений рангов. Предложенный подход включает предварительную унификацию тематик сообществ, учет дисбаланса классов, использование ансамблевых методов машинного обучения. Полученные результаты могут быть использованы в практических задачах карьерного консультирования.

В [31] рассматривается объединение зависимых источников информации в теории доказательств. В теории доказательств объединение зависимых источников информации, например доказательств, полученных из разных источников, заключается в рассмотрении всей системы доказательств в качестве единого целого. Это предполагает анализ совокупности доказательств и образующихся внутри системы информационных и логических связей. Цель – установить обстоятельства, имеющие значение для правильного разрешения дела, на основе доказательств, полученных из различных источников. При этом одно доказательство может служить источником нескольких фактов, а доказательство-факт может возникать на основании нескольких доказательств-сведений. Основной способ проверки доказательств – получение других доказательств, расширение их совокупности. Это обеспечивает установление источников проверяемого доказательства и возможность сопоставления доказательств между собой. Каждое новое доказательство в этом смысле служит и средством проверки уже имеющихся доказательств, и само проверяется ими.

Оценка доказательств, полученных из объединенных зависимых источников, включает анализ и синтез содержания и формы доказательства, а также вывод об относимости, допустимости и достоверности каждого доказательства и достаточности в целом их совокупности для принятия процессуального решения. Следует иметь в виду некоторые проблемы, которые могут возникнуть при объединении источников в теории доказательств: искажение и неполнота отражений, невозможность использования новых источников информации, недопустимость доказательств.

Автор представил семейство операторов агрегирования конъюнктивной информации в рамках теории доказательств, основанной на использовании связей и t -норм. Такие операторы позволяют моделировать зависимость источников информации и агрегировать множество источников. Показано, что введенные операторы будут в определенной степени удовлетворять общим требованиям и свойствам, предъявляемым к правилам сочетания в теории доказательств. Рассматривается новый тип конъюнктивного объединения для совместно согласующихся массивов доказательств. Выбор той или иной t -нормы или связки в таком конъюнктивном правиле может быть основан на решении задачи многокритериального выбора в отношении нескольких функционалов качества агрегации.

В [32] представлена система компьютерного зрения, разработанная для подсчета количества зерен в початках кукурузы на основе нескольких изображений, сделанных под разными углами. Система компьютерного зрения на основе нескольких изображений – это система, которая обрабатывает визуальные данные, полученные от нескольких датчиков (камер, датчиков) или существующих наборов изображений, и решает задачи распознавания, анализа или реконструкции объектов на основе этих данных. Цель такого рода системы – позволить машинам интерпретировать и принимать решения на основе визуальных данных, идентифицировать объекты, обнаруживать закономерности и автоматизировать процессы.

Для реализации систем компьютерного зрения на основе нескольких изображений используются, например, модели глубокого обучения на основе сверточных нейронных сетей, алгоритмы машинного обучения, а также методы семантической сегментации – классифицируют каждый пиксель в изображении, что полезно в таких приложениях, как медицинская визуализация, где требуется точная идентификация тканей или аномалий. Имеются определенные ограничения систем компьютерного зрения, связанные с объемом данных (требуется большое количество размеченных данных), с техническими ограничениями (требуется большие вычислительные ресурсы, модели могут ошибаться в сложных условиях при плохом освещении, перекрытии объектов, необычных ракурсах), проблемы с интерпретацией, этические и социальные проблемы.

Авторы отмечают, что в результате исследования была разработана система для подсчета зерен кукурузы в початках с использованием изображений, сделанных под тремя разными углами. Был проведен анализ данных и сравнение моделей, что привело к выбору линейной регрессии с регуляризацией $L2$. При использовании выбранной модели была достигнута средняя погрешность менее 5 % с использованием метода перекрестной валидации «без исключения». Разработанные решения продемонстрировали свою эффективность при внедрении в промышленную практику в *SeedMetrics* (Бразилия).

6 Искусственный интеллект в информационной безопасности и квантовая информатика

ИИ в информационной безопасности (ИБ) – это использование технологий ИИ для автоматизации процессов выявления и анализа киберугроз, а также реагирования на них. ИИ помогает защищать данные, сети, приложения и устройства от вредоносных действий, а также предупреждать утечки конфиденциальной информации. Основными направлениями применения ИИ в ИБ сейчас являются следующие:

- обнаружение и предотвращение угроз. ИИ-системы анализируют огромные массивы данных в реальном времени, выявляют подозрительные активности задолго до того, как они перерастают в полномасштабные атаки;
- анализ уязвимостей. ИИ-решения автоматизируют этот процесс, проверяют инфраструктуру и приложения в режиме нон-стоп, сортируют найденные уязвимости по степени риска и определяют приоритеты их устранения;
- реагирование на инциденты. ИИ-системы ускоряют процесс реагирования: автоматически собирают и анализируют сведения о нарушении, изолируют зараженные системы и предлагают пути устранения последствий;
- поведенческий анализ пользователей. ИИ-системы создают цифровые портреты поведения сотрудников, устанавливая их рабочие привычки. Отклонение от нормы – вход в систему в необычное время, доступ к нетипичным ресурсам или аномальный объем скачиваемых данных – может указывать на взлом учетной записи или внутреннюю угрозу;
- прогнозирование и предотвращение атак. Анализируя информацию о прошлых атаках и текущей обстановке, ИИ предсказывает вероятные сценарии будущих нападений.

Для реализации ИИ в ИБ используются, например, машинное обучение, глубокое обучение и генеративный ИИ.

Следует иметь в виду, что использование ИИ в ИБ имеет определенные ограничения: ложные срабатывания и шум в данных, зависимость от качества обучающих данных, уязвимости самих ИИ-систем, высокая стоимость внедрения и поддержки.

Секция «Искусственный интеллект в информационной безопасности и квантовая информатика» объединила доклады, посвященные применению методов ИИ, анализа данных и новых вычислительных подходов в задачах обеспечения безопасности информационных систем. В работах представлялись как фундаментальные аспекты построения моделей и алгоритмов ИИ для защиты информации, так и практические методы защиты, обнаружения нарушений и поддержки аналитической деятельности специалистов. В частности, рассматривались вопросы повышения устойчивости интеллектуальных систем к внешним воздействиям, обнаружения аномалий и интерпретации событий безопасности. Были представлены результаты применения глубоких нейронных сетей для бинарной классификации вредоносных визуальных стимулов, показано использование квантовоподобных моделей для анализа процессов распространения эмоциональных состояний в социальных сетях, рассмотрены подходы к шифрованию медицинских изображений, а также обсуждались алгебраические методы построения криптографических систем.

В [33] был рассмотрен подход к защите систем распознавания изображений от состязательных атак типа *FGSM* (*Fast Gradient Sign Method*), основанный на комбинировании различных методов защиты. *FGSM*-атака представляет собой одну из наиболее распространенных состязательных атак. Она основана на добавлении малозаметных возмущений к входным данным с целью обмана модели машинного обучения и вызова ошибок в процессе распознавания изображений. Для повышения точности распознавания в условиях воздействия *FGSM*-атак в работе были исследованы следующие методы защиты: зашумление, сжатие и нейронная очистка изображений. Комбинирование методов защиты предполагает нахождение оптимальных параметров, характеризующих эти методы, при которых точность распознавания становится максимальной.

Оценка эффективности рассматриваемых методов защиты была выполнена на датасете *CIFAR-10* (*Canadian Institute For Advanced Research*). Это датасет для классификации цветных изображений, содержащий 60 000 снимков размером 32×32 пикселя, разделенных на 10 классов по 6000 изображений в каждом. Выбор этого датасета обусловлен его широким применением в задачах классификации изображений.

Для распознавания изображений использовалась сверточная нейронная сеть, представленная на рис. 6.

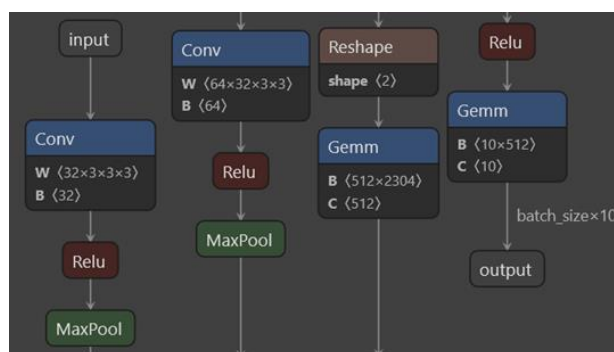


Рис. 6. Архитектура сверточной нейронной сети

Результаты экспериментов показали, что комбинирование указанных методов защиты позволяет достигнуть максимальной точности распознавания изображений в условиях воздействия на них *FGSM*-атак. Наиболее высокие показатели достигаются при использовании *JPEG*-сжатия с уровнем 20, гауссовским шумом с отклонением 0,2 и средним размером фильтрации (*Medium*). Эти параметры обеспечивают наилучший баланс между сжатием, фильтрацией и добавлением шума, сохраняя высокую эффективность при относительно низких уровнях атак ($\epsilon \leq 0,04$), а для большого коэффициента атаки ($\epsilon \geq 0,04$) лучше всего подходят параметры *JPEG*-сжатия с уровнем 10, гауссовским шумом с отклонением 0,2 и средним размером фильтрации (*Medium*). Методы с малым размером фильтрации (*Small*) также обеспечивают хорошие результаты, но уступают *Medium*. Применение большого размера фильтрации (*Large*) существенно снижает эффективность защиты, демонстрируя крайне низкие значения даже при минимальных уровнях атаки.

Полученные выводы могут быть полезны для разработки более надежных систем компьютерного зрения, способных противостоять современным угрозам в области машинного обучения. Предложенный подход продемонстрировал перспективность использования гибридных стратегий защиты для обеспечения безопасности нейросетевых моделей в реальных приложениях.

В [34] основное внимание было уделено разработке онтологически ориентированных методов интерпретации событий системы обнаружения вторжений *Suricata* с использованием больших языковых моделей (*LLM*). Так как системы обнаружения вторжений генерируют большие объемы оповещений безопасности, то важной задачей для аналитиков кибербезопасности является эффективная интерпретация этих событий. Хотя последние достижения в области больших языковых моделей предлагают многообещающие возможности для автоматизированного объяснения сложных оповещений, их выходные данные часто не содержат знаний, специфичных для предметной области, и могут содержать фактические неточности. В работе представлен подход к поиску, который использует граф знаний, обогащенный онтологиями кибербезопасности для обеспечения надежных и объяснимых интерпретаций оповещений *Suricata*. Сначала создается граф знаний на основе онтологии, который связывает данные оповещений *Suricata* с фреймворком *MITRE ATT&CK*. Затем производится обучение гетерогенной графовой нейронной сети (*HGNN*) для генерации контекстно богатых вложений. Затем конвейер генерации дополненного поиска (*RAG*) предоставляет локальному *LLM* соответствующий контекст, тем самым повышая качество и точность генерируемых объяснений. Экспериментальная оценка на наборе данных из 30 000 оповещений *Suricata* показывает, что представленный подход значительно повышает точность объяснений и снижает частоту галлюцинаций по сравнению со стандартными методами. Предлагаемая система устраняет разрыв между низкоуровневыми событиями систем обнаружения вторжений и высокоуровневыми методами противодействия, тем самым продвигая развитие объяснимого искусственного интеллекта в области сетевой безопасности.

В [35] обсуждалась проблема быстрого обнаружения сбоев в штатном режиме работы крупных ИТ-инфраструктур. Выводы о наличии сбоя делаются на основе анализа косвенных признаков. Необходимо выявить неисправность, возникшую в текущей ИТ-системе (т. е. обнаружить так называемый функциональный сбой безопасности, когда датчики внутрисистемного мониторинга наблюдаемой ИТ-системы еще не сигнализируют о возникших проблемах, но некоторые сервисы уже стали недоступны). Факт сбоя может быть зафиксирован на основе фактических данных, содержащихся в текстовых сообщениях пользователей. Эти косвенные признаки, интегрированные с историческими данными о ранее зафиксированных сбоях и их характере, могут быть использованы для «обучения» принятию обоснованных решений в текущей нештатной ситуации. В работе рассмотрен текущий уровень возможностей

описываемых промышленных систем – так называемых детекторов сбоев (ДС). На основе практических примеров использования ДС были проанализированы результаты и проблемы применения ДС в сервисах мониторинга, предоставляемых на базе российской национальной ИТ-инфраструктуры. Представлена модель интеллектуального анализа текстовых данных, позволяющая выявлять контексты, характеризующие конкретный инцидент, в процессе «обучения» информации о ранее зафиксированных сбоях. Предлагаемый подход позволяет выявлять небинарные (контекстно зависимые) причинно-следственные связи, скрытые в записанных текстовых данных.

Отдельную группу составили исследования, связанные с фундаментальными вычислительными моделями. В частности, в работе [36] рассматривалось использование квантовых резервуарных вычислений для моделирования нелинейной динамики сложных систем. Подход ориентирован на высокоразмерные процессы и демонстрирует перспективность комбинации квантовых идей и методов машинного обучения.

В [37] представлена методика анализа *Dockerfile* с применением методов искусственного интеллекта. В работе формализован процесс безопасной контейнеризации и описана пошаговая процедура снижения числа потенциально опасных конфигурационных решений. На основе экспериментальных данных продемонстрировано сокращение числа уязвимых компонент в итоговых образах контейнеров.

В [38] предложена архитектура интеллектуального ассистента для расследования киберинцидентов. Особенностью подхода является многоуровневое объединение алгоритмов генеративных моделей, онтологически структурированной информации, механизмов векторного поиска и встроенных средств защиты самой системы ИИ. Предложенная архитектура обеспечивает автоматизированное формирование рекомендаций на основе анализа доступных данных, поддерживает имитацию логики расследования и содержит механизмы фильтрации входных запросов, контроля корректности выходных данных и ведения журналов. Демонстрируется возможность интеграции ассистента в различные организационные контуры и решения задач аналитической поддержки специалистов. Основные архитектурные элементы ассистента и их взаимодействие представлены на рис. 7.

В [39] рассмотрена среда обучения агентов с подкреплением для автономной киберзащиты, демонстрирующая возможности формирования защитного поведения без прямого участия оператора.

Остальные доклады секции дополняли общую тематику исследования и применения технологий ИИ в информационной безопасности. В них рассматривались вопросы создания комплексных систем биометрической аутентификации на основе анализа лица, речи и тепловых изображений, разработки методов обнаружения уязвимого исходного кода в *IoT*-системах с использованием языковых моделей, а также подходы к построению квантово устойчивых схем защиты трафика и гибридных моделей обнаружения атак.

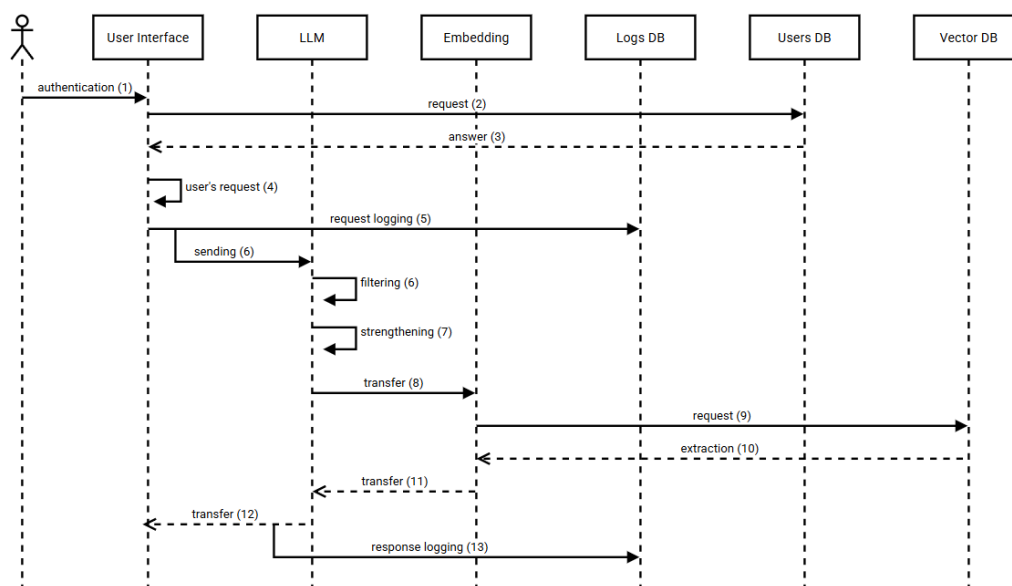


Рис. 7. Диаграмма взаимодействия элементов ИИ-ассистента

Представленные в секции результаты свидетельствуют о значительном росте интереса к интеграции методов искусственного интеллекта в процедуры контроля, мониторинга и расследования инцидентов. Отмечается смещение исследований в сторону построения интерпретируемых, адаптивных и устойчивых систем, способных функционировать в условиях высокой динамики угроз и разнообразия источников информации. Секция показала, что объединение методов ИИ, моделей вычислительной безопасности и прикладных инструментов анализа становится ключевым направлением развития современной информационной безопасности.

7 Промышленная интеллектуализация

Интеллектуализация в промышленности – это процесс внедрения ИИ и цифровых технологий в производственные отрасли. Сущность интеллектуализации – переход от механического использования информации к интеллектуальному, творческому управлению производством. Интеллектуализация трансформирует промышленность, делая ее более автономной и эффективной. Это не просто тренд, а необходимость в условиях глобальной цифровизации и роста конкуренции: компании, внедряющие технологии, получают стратегическое преимущество. Основными целями интеллектуализации в промышленности являются:

- повышение эффективности – за счет автоматизации процессов, аналитики данных в реальном времени;
- оптимизация качества продукции – за счет анализа больших объемов данных ИИ выявляет дефекты, отклонения и помогает совершенствовать производственные линии;
- контроль энергопотребления – интеллектуальные системы снижают издержки за счет автоматической оптимизации использования ресурсов;
- оптимизация производственных и логистических цепочек – ИИ помогает прогнозировать спрос, управлять запасами и оптимизировать транспортировку продукции.

В процессе интеллектуализации промышленности используются следующие технологии:

- предиктивное обслуживание – подход, при котором ИИ анализирует данные с датчиков и других источников, чтобы заранее определить возможные поломки и запланировать необходимые работы;
- генеративные нейросети – используются для автоматизации этапов проектирования новых изделий и узлов оборудования;
- облачные вычисления – позволяют быстро применять в производстве большие объемы данных или вычислительные мощности, а также собирать большой объем данных о производительности оборудования и качестве выпускаемой продукции;
- продвинутая робототехника – современные промышленные роботы (умные машины) работают автономно и могут взаимодействовать с производственными системами.

Необходимо отметить определенные проблемы и вызовы, с которыми сталкивается внедрение ИИ в промышленности:

- дефицит специалистов – не хватает кадров по работе с ИИ и анализом данных;
- кибербезопасность – рост цифровизации требует усиленной защиты промышленных сетей от атак;
- отсутствие готовых решений. Создать интеллектуальную систему, которая будет эффективна на любом предприятии, технически невозможно, так как каждое производство имеет свою уникальную специфику;
- недостаток данных. Для обучения моделей необходимы большие объемы эталонных данных, которые будут использоваться системой для определения отклонений;
- сложный процесс внедрения. Создание ИИ-решений требует разметки данных и интерпретации информации, а для обучения модели может потребоваться специальное оборудование с большими вычислительными мощностями;
- юридические вопросы. Необходимо определить, кто несет ответственность за ошибки, допущенные ИИ. В случае возникновения аварийных ситуаций или сбоев в работе оборудования, вызванных некорректными решениями, предложенными ИИ, нужно четко установить, кто за это отвечает;
- страх сокращения рабочих мест. Однако здесь речь идет об упрощении простых процессов, в которых не требуются профессиональные навыки, поэтому время специалистов будет освобождаться для решения более важных задач.

Традиционно на конференции большая часть работ в этой секции была посвящена прикладным технологиям ИИ, в том числе в транспортной сфере [41–50].

В работе [43] предложена разработка «ложного» класса, которая позволила отсеять ложные выбросы при работе систем распознавания. Сначала базовая модель обучается на данных, размеченных только нужными классами. Затем авторы систематически собирали ошибки модели. Эти конкретные некорректные обнаружения автоматически размечаются специальной меткой «ошибка». Основными вкладами этой работы являются:

- новый итеративный фреймворк *Learning to reject*, в котором модель обнаружения объектов явно обучается распознавать свои собственные ошибки. Это достигается путем систематического сбора ложных срабатываний модели, отнесения их к выделенному классу «ошибок» и использования в качестве обучающих данных на последующем этапе доработки;
- четкий и понятный механизм отклонения. Вместо того чтобы полагаться на неоднозначные доверительные пороги или сложные модели неопределенности, метод вводит отдельный класс «ошибка». Это обеспечивает прямой, надежный и эффективный с точки зрения вычислений способ для модели воздерживаться от прогнозирования выборок, не имеющих распределения, или выборок, имеющих сложное распределение.

Эксперименты авторов показывают, что подход *Learning to reject* значительно повышает надежность модели, в первую очередь увеличивая точность обнаружения на зашумленных данных с 56 до 92 %, тем самым устраняя критическую слабость стандартных моделей класса *object detection*.

Предложенный подход был продемонстрирован на реальной выборке распознавания номеров вагонов (рис. 8).



Рис. 8. Примеры изображений с ложным классом

(слева – при использовании *Learning to reject*, справа – при использовании классической (базовой) модели: 0 – полезные данные, 4 – ложный класс)

Результирующие метрики на зашумленной выборке представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты метода *Learning to Reject* [1] на зашумленной выборке

Модель	F1-score	Precision	Recall	IoU
Базовая	61,6 %	56,5 %	94,0 %	66,8 %
<i>Learning to Reject</i> [1]	93,3 %	92,3 %	95,6 %	88,4 %

Другой научной разработкой, направленной на железнодорожную автоматизацию и продемонстрированной на ПТИ'25, является система бесконтактного измерения геометрических параметров колес подвижного состава, направленная на повышение безопасности и надежности транспортных систем [44]. В ходе исследования авторами была разработана и усовершенствована оптико-электронная система мониторинга геометрических параметров колесных пар и рельсового пути, адаптированная для работы в сложных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта.

Удалось повысить точность и надежность измерений за счет импульсного режима работы лазера с термостабилизацией, обеспечивающего устойчивость к внешней засветке, усовершенствованных алгоритмов фильтрации, эффективно подавляющих паразитные отражения и шумы, и оптической

схемы, формирующей равномерную световую линию с высокой пространственной разрешающей способностью.

В [47] предложен метод гибридного преобразования данных телеметрии, объединяющий цифровую модель инфраструктуры станции и логическую интерпретацию данных. Модель позволяет преобразовать низкоуровневую информацию путем генерации событий, связанных с технологическими процессами. Логическая интерпретация представляет собой набор формальных правил, описывающих генерацию контекстно зависимых выводов на основе существующих данных. Разработанный подход обеспечивает формирование унифицированной аналитической модели, устраняя проблему неполноты и противоречивости исходной информации. Также предложенное решение было основано на применении реактивного подхода, благодаря которому данные представляются в виде хронологически упорядоченного потока. Это позволяет эффективно выявлять взаимосвязи между операциями и минимизировать затраты при масштабировании системы.

На рис. 9 представлен схематичный пример применения правил для логической интерпретации данных, отражающий подход авторов.



Рис. 9 Применение правил для логической интерпретации данных

Приведем пояснения к данному подходу. Пусть поток событий $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, где каждое событие s_i имеет тип, дополнительные свойства и метку времени t_i . Тогда для логической интерпретации используется набор правил генерации: $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$, где каждое правило r_j задается кортежем: $r_j = \{\varphi_j(S), e_j, \tau_j\}$, в котором $\varphi_j(S)$ – предикат (условие активации), зависящий от подмножества S ; e_j – новое событие, генерируемое при выполнении $\varphi_j(S)$; τ_j – функция времени, вычисляющая метку t_e для e_j на основе событий, активировавших $\varphi_j(S)$.

Для каждого правила r_j можно выстроить для дополнения к данным, выполнив следующие шаги:

- найти триггерные события – подмножество $S_\varphi \subseteq S$, удовлетворяющее φ_j ;
- проверить отсутствие дубликатов сгенерированных событий e_j ;
- добавить новые события e_j в поток: $S \leftarrow S \cup \{e_j\}$, где $t_{e_j} = \tau_j(S_\varphi)$.

Идея применения реактивного подхода заключается в представлении первичных данных в виде потока последовательных событий, формирующихся по временной метке. По сути, преобразование данных заключается в анализе временных рядов и на основе логических правил декларативного подхода в формировании из одного множества событий другого, дополняя тем самым модель данных.

Реализованные авторами алгоритмы продемонстрировали возможность адаптивного расширения функциональности аналитических инструментов без значительной модификации базовой структуры. Было обработано свыше 10 миллионов записей перемещения вагонов. При анализе среднего простоя на станции разработанный авторами статьи метод выявил 22 % аномалий. Их отсечение привело к увеличению корреляции простоя, снижению флуктуации и увеличению согласованности данных.

В [52] авторы рассматривают другую важную индустриальную проблему, отчасти также связанную с железнодорожным транспортом, – проблему семантической геоинформационной совместимости, которая заключается в обеспечении скоординированного взаимодействия специалистов для решения задач, требующих совместного использования георесурсов, при условии, что они адекватно понимают семантику этих георесурсов. Отмечается, что для обеспечения семантической геоинформативности необходимо разработать инструменты, чтобы последовательное понимание геоданных осуществлялось на основе сравнительного анализа существующих метасхем баз геоданных с учетом многофакторного взаимодействия пользователей и семантики, встроенной в пространственные онтологии

и/или геотезаурусы и классификаторы. Обсуждается функциональная схема семантического геовзаимодействия, а также информационные процессы, которые отражены в интегрированной системе пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Помимо железнодорожного транспорта, на ПТИ внимание разработчиков было направлено также на автотранспортную интеллектуализацию [45, 46].

Так, в [45] авторы акцентируют проблему оценки функциональной безопасности высокоавтоматизированных транспортных средств с применением методов искусственного интеллекта. В этой статье авторы анализируют различные методы искусственного интеллекта, применимые для оценки безопасности, включая их собственный метод, основанный на байесовских сетях. Они также сравнивают эти методы с современным экспертным подходом, используемым специалистами по функциональной безопасности, и делают выводы относительно приемлемости каждого метода.

При реализации сети авторами использовали классификации степени тяжести по различным стандартам (табл. 2).

Таблица 2

Виды классификации тяжести вреда

IEC 61508	ISO 26262	ISO 13849	Описание
C0 «Несущественные»	S0 «Нет травмы»	S1 «Легкие травмы» (гарантируется полное выздоровление)	Помощь врачей не требуется
C1 «Малозначительные»	S1 «Легкая травма»		Требуется помощь врачей, но выздоровление практически гарантировано
C2 «Критические»	S2 «Тяжелая травма»	S2 «Тяжелые» (полное выздоровление не гарантируется)	Возможна инвалидизация
	S3 «Критическая травма»		Возможна смерть одного человека
C3 «Катастрофические»			Возможна смерть многих людей

В общем виде для расчета метрики оценки функциональной безопасности авторы использовали следующую формулу:

$$P(col = c | catr = k) = \sum_i P(col = c | int = i) \cdot P(int = i | catr = k),$$

где $P(col = c | int = i)$ – условная вероятность col при заданном значении int ;

$P(int = i | catr = k)$ – условная вероятность int при заданном значении $catr$.

Основываясь на полученных результатах, авторы сделали вывод о том, что экспертная оценка переоценивает степень тяжести вреда. Более опытный эксперт добился точности примерно в 25 % и продемонстрировал смещение в сторону повышения (т. е. смещение в сторону более высокой степени тяжести) в 62 % неверных оценок. Менее опытный эксперт добился точности примерно в 22 % и продемонстрировал смещение в сторону повышения в 53% случаев. *ChatGPT* и *Gemini*, проверенные авторами в экспериментальной части, в основном демонстрировали смещение в сторону увеличения в 57 и 58 % случаев соответственно, в то время как *Mistral* демонстрировал смещение в сторону уменьшения в 60 % случаев. Разработанная байесовская сеть при этом достигла наивысшей точности прогнозирования – 55 %. Однако она недооценила серьезность 73 % неправильных оценок.

Другая работа авторов [46] также направлена на развитие интеллектуализации систем обоснования функциональной безопасности в области автотранспортных систем. В работе исследуются процессы разработки, относящиеся к «гибким» моделям жизненного цикла преимущественно программных систем, когда при неполных требованиях создаются первые версии программного обеспечения, которые валидируются с заказчиком и дорабатываются в итеративной манере. Архитектура аппаратной части при этом слабо связана с архитектурой программного обеспечения, благодаря использованию универсальных вычислительных платформ. Авторы демонстрируют подход, при котором использование архитектурных шаблонов и шаблонов обоснования безопасности позволяет получать архитектуру и обоснование безопасности системы параллельно, без промежуточного шага в виде анализа безопасности. Это снижает риски ошибок и потенциально позволит сэкономить усилия и снизить риск неудачи при «гибкой» разработке автомобильных систем.

8 Финансовая математика

Это направление на конференции 2025 года получило развитие в работах [53–57].

Так, в [53] авторы обнаружили, что множество возможных векторов стратегических позиций хедж-фондов является границей выпуклого многогранника и описывается теоремой:

а) для всех $n \geq 2$ множество \mathcal{A}_n всех альфа-векторов является поверхностью выпуклого многогранника \mathcal{P}_n размерности $n - 1$;

б) многогранник \mathcal{P}_n из пункта (а) имеет $\binom{n}{k+2} (2^{k+2} - 2)$ граней размерности k для всех $0 \leq k \leq n - 2$.

Авторы определили диапазон прибыльности стратегии в терминах вектора доходности активов. В работе выведены формулы прибыли и убытка при некоторых разумных предположениях об исполнении стратегии. Доказано существование операции (точного спада) для ряда векторов позиций стратегии, которая делает оборот стратегии равным заданному значению. Авторы определяют алгоритмическую торговую стратегию, делают предположения об альфа-исполнении и выводят леммы об альфа-доходности. В статье также доказываются теоремы о множестве альфа-векторов и множестве значений, возвращаемых альфа-векторами, соответственно. Так, следующая теорема и ее доказательство показывают существование и предоставляют метод (операция точного уменьшения) для модификации последовательности векторов позиции стратегии для достижения заданного значения оборота:

«Пусть альфа-векторы $\vec{a}(d)$ и $\vec{a}(d - 1)$ линейно независимы, и оборот от $\vec{a}(d - 1)$ к $\vec{a}(d)$ равен t . Пусть число $t \in [0, 2]$. Тогда существуют числа $x_1 \geq 0$ и x_2 такие, что вектор $x_1 \vec{a}(d) + x_2 \vec{a}(d - 1)$ является альфа-вектором, и его оборот к $\vec{a}(d - 1)$ равен t ».

Авторами проведены два численных эксперимента на реальных альфа-системах, которые практически идентичны тем, которые используются в промышленности. В первом эксперименте показана эмпирическая плотность распределения доходности, во втором – показано сравнение точного затухания и обычно используемого экспоненциального затухания.

В [54] авторами предложено решение проблемы прогнозирования цен на электроэнергию путем поиска скачков в спотовых ценах. Для выявления и оценки регионов скачков предлагаются последовательные и ретроспективные методы. Авторы применили параметрический подход, основанный на временных изменениях, для выявления случаев резких скачков и оценки их продолжительности и величины в предположении процесса авторегрессии AR(1) логарифмических значений спотовых цен с отклонениями от тренда, с различными параметрами в нормальном режиме и режиме резких скачков. В качестве иллюстрации предложенные методы продемонстрированы для выявления и анализа скачков цен на электроэнергию в открытых источниках данных о спотовом рынке *Nord Pool*, включая спотовые цены на электроэнергию в Дании и соседних с ней странах на день вперед.

Полученные результаты демонстрируют потенциал сочетания статистического анализа точек изменений с инструментами машинного обучения для наблюдения за рынком с высоким разрешением и оценки рисков. Будущие исследования авторов будут сосредоточены на многомерном расширении модели для совместного анализа взаимосвязанных рынков, а также на интеграции потоков данных в режиме реального времени для онлайн-обнаружения всплесков.

Как и во многих других областях, был затронут вопрос использования *LLM* в финансовой сфере. В работе [55] представлены результаты проведения экзаменов в финансовой сфере на шести *LLM*: *GigaChat 2 Max*, *DeepSeek-R1*, *DeepSeek-V3*, *Llama 4 Maverick*, *GPT-4o-mini* и *Qwen3 235B*. Лучшими моделями стали *DeepSeek-R1* и *Llama 4 Maverick*.

Помимо *LLM*, была рассмотрена задача машинного обучения в сфере случайного инвестирования, которая отражена в работе [56], а также приведен пример, иллюстрирующий верность приведенных положений.

Другое исследование [57], связанное с финансовой математикой, не только открывает новый взгляд на понимание нелинейных взаимодействий на финансовых рынках, но и обеспечивает количественную и практическую теоретическую основу для активного управления рисками. В данном исследовании построена нелинейная динамическая модель, основанная на критериях осторожности Грейнджера и глобальной оптимизации для определения параметров. Анализ стабильности проводится для выявления сложных нелинейных взаимодействий между финансовыми рынками Китая, выявляющих общую нестабильность точек равновесия системы.

Чтобы выявить нелинейную эволюционную структуру фондового, валютного и валютно-обменного рынков, авторы используют три *data-driven*-модели, основанные на системах дифференциаль-

ных уравнений. Использование нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка эффективно отражает взаимозависимости между финансовыми показателями, обеспечивая относительно точное соответствие наблюдаемым данным. Полученные результаты подчеркивают присущие финансовому рынку нелинейные и интерактивные характеристики более высокого порядка.

Проведенный анализ устойчивости показывает, что при текущих годовых данных и расчетных параметрах ни одна из выявленных точек равновесия не удовлетворяет условиям локальной асимптотической устойчивости. Это указывает на то, что в нынешней финансовой системе отсутствуют внутренние стабилизирующие механизмы в ее естественном состоянии, а точки равновесия, как правило, не демонстрируют локальной асимптотической стабильности. Это подчеркивает необходимость вмешательства внешней политики.

Авторы предложили ввести в существующую модель явные переменные денежно-кредитной политики. Включив инструменты денежно-кредитной политики, такие как процентные ставки и требования к резервированию, в качестве явных параметров в динамические уравнения, модель может прогнозировать влияние мер денежно-кредитной политики на системную стабильность.

9 Искусственные нейронные сети, машинное обучение и их применение в индустрии

Немалая часть работ конференции ИТТ'25 традиционно посвящена машинному обучению и его внедрению в промышленной сфере [58–72].

Важную проблему, связанную с интерпретируемостью результатов в области анализа выживаемости, подняли авторы в работе [58]. Для этого предложено интегрировать машинное обучение на основе концептов (*Concept-Based Machine Learning, CBL*), использующее экспертные оценки при классификации и регрессии.

Суть *CBL* состоит в том, чтобы посчитать вероятность того, что патчи изображения принадлежат одному и тому же кластеру, определяющему концепт. Концепт по сути своей является оценкой вероятности того, принадлежит ли набор объектов описанию входного вектор-признака или нет. Главное отличие *CBL* применительно к анализу выживаемости – это то, что концепты представлены интервальными значениями, характеризующими время наступления интересующего события.

Предлагаемый авторами метод объединяет вложения данных и вычисляет вероятностные концептуальные представления для улучшения прогнозов выживания. Такой подход повышает как точность, так и интерпретируемость, предлагая мощный инструмент для анализа данных о времени до события в критических областях.

Другой работой на ИТТ'25 того же авторского коллектива по повышению интерпретируемости является гибридизация искусственных нейронных сетей и деревьев решений [59]. Предлагается новая гибридная архитектура, которая объединяет конкретные деревья решений, оптимизирующие произвольные дифференцируемые функции потерь, с нейронными сетями (рис. 10). Нейронная сеть выполняет двойную функцию: генерирует дифференцируемые функции потерь для обучения дерева решений и повышает точность прогнозирования модели.

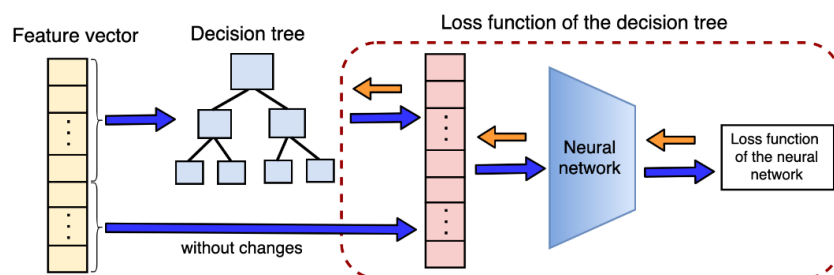


Рис. 10. Архитектура предлагаемой гибридной системы

Помимо теоретических изысканий в области машинного обучения, на ИТТ'25 были представлены и прикладные работы.

В [62] авторы предлагают автоматически определять степень спелости по изображениям помидоров на основе многозадачной сверточной нейронной сети *YOLOv11* с внедренным модулем самоконтроля *Swin-Transformer*. Благодаря данной разработке создается возможность поддержки принятия решений для точной классификации томатов по спелости и сбора урожая, а также подтверждает эффективность модели при автоматизированной уборке томатов.

Также внимание привлекает работа с использованием *LLM*-запросов для реализации сегментаций изображений [66]. Чтобы преодолеть ограничения обработки визуальной информации, в данном исследовании представлена новая система мультимодальной сегментации, которая систематически объединяет разнородные источники информации, включая как визуальные, так и текстовые средства. Предлагаемая авторами система принимает в качестве входных данных целевое изображение вместе с одним или несколькими запросами, которые могут быть текстовыми, визуальными или сочетанием обоих.

Процесс обработки состоит из трех основных этапов:

- эффективная модель сегментирует все объекты на изображении без предварительного знания их классов;
- исходные маски уточняются с применением специализированных моделей, которые используют предоставленный пользователем запрос;
- уточненные маски объединяются с предсказаниями, не зависящими от класса, для получения окончательного результата сегментации.

Результаты работы показали как точностную, так и временную эффективность по сравнению с известными алгоритмами.

Гибридизацию *LLM* с другими методами предложили также в [69]. В данной статье рассматривается применение дополненного интеллекта в системах поддержки принятия решений. Авторами предлагается интегрированный подход, сочетающий диалоговые, генерирующие и оценочные методы ИИ. Подход характеризуется синергетической интеграцией методов, основанных на данных и моделях, наряду с новым применением современных больших языковых моделей в качестве основы для взаимодействия человека и искусственного интеллекта в процессах принятия решений. Чтобы продемонстрировать практическую реализацию, этот подход был оценен с помощью тематического исследования планирования совещаний, иллюстрирующего его эффективность в реальных сценариях.

Практическое применение для поддержки разработки программного обеспечения предложили в [71]. Структурированные подсказки, включающие специализацию разработчика, тестовые примеры, формат ответов и сложность задачи, значительно повышают корректность кода и надежность выполнения, что продемонстрировано с помощью тестов *HumanEval* и *CoNaLa*, оцененных с помощью показателей *CodeBLEU*, *pass@1* и *pass@5*. Этот метод эффективно объединяет ожидания разработчиков и результаты, полученные на основе моделей, улучшая разработку программного обеспечения с помощью искусственного интеллекта. Авторами показано, что разработанное решение продвигает разработку программного обеспечения с использованием искусственного интеллекта, позволяя генерировать точный, эффективный и зависящий от контекста код. Используя контекстное расширение, интегрированную среду разработки (*Integrated Development Environment, IDE*) и помощников по программированию с использованием искусственного интеллекта, можно адаптировать запросы в соответствии с потребностями разработчиков, демонстрируя перспективность в таких областях, как разработка программного обеспечения, машинное обучение, кибербезопасность и управление базами данных, где структурированные запросы обеспечивают высокое качество результатов.

10 Интеллектуальные медицинские системы

Интеллектуальные медицинские системы (ИМС) – это системы, которые используют технологии ИИ для решения медицинских задач различного уровня. Они моделируют процесс мышления врача применительно к решению конкретной задачи, формируют выводы на основе знаний и способны объяснить полученное решение. Особенности ИМС являются работа со знаниями, обработка нечетких представлений, формирование правдоподобных рассуждений, порождение гипотез, обеспечение вывода на логических решателях и прецедентах на основе тождества или сходства, объяснение принятых решений. К ИМС принято относить экспертные системы, системы поддержки принятия решений и системы анализа медицинских изображений на основе компьютерного зрения.

В настоящее время в ИМС используются нейронные сети (обучаются распознавать паттерны и аномалии на изображениях, таких как рентгеновские снимки и снимки, полученные посредством компьютерной томографии), алгоритмы машинного обучения (анализируют генетический профиль пациента, историю предыдущего лечения, коморбидные состояния и даже особенности образа жизни для прогнозирования эффективности различных препаратов, технологии компьютерного зрения (применяются при процедурах гастроскопии: алгоритм на базе ИИ подсвечивает врачу области с возможными отклонениями и дает рекомендации дополнительно сфотографировать и исследовать выделенные области). Основными сферами применения ИМС являются медицинская визуализация (анализ рентгеновских снимков, МРТ, КТ), ранняя диагностика рака, генетическая диагностика (анализ генетических

данных для выявления наследственных заболеваний), персонализированная медицина (ИИ помогает врачам подбирать терапию и дозировки с учетом индивидуальных особенностей), цифровые медицинские ассистенты и чат-боты.

Использование ИМС в медицине требует создания надежной нормативно-правовой базы, этических стандартов и механизмов защиты данных. Например, в России есть национальный стандарт ГОСТ Р 59921.0–2022 «Системы искусственного интеллекта в клинической медицине. Основные положения».

При внедрении ИМС следует иметь в виду определенные вызовы:

- этические вопросы и конфиденциальность данных. В процессе обучения алгоритмов используются огромные массивы медицинских записей, включая результаты анализов, истории болезней и даже генетическую информацию. Это создает риск утечки данных, а также возможность неправомерного использования информации пациентами или третьими лицами;

- недостаток стандартизации и регуляторная неопределенность. Различные страны и регионы имеют свои собственные подходы к сертификации и лицензированию новшеств. Это затрудняет международную кооперацию и обмен опытом между медучреждениями;

- ограниченная доступность данных и проблема предвзятости. Для успешного функционирования ИИ требуется большое количество качественных данных. Однако в некоторых регионах мира доступ к таким данным ограничен из-за недостаточного финансирования исследований или низкого уровня цифровизации здравоохранения;

- технические сложности и необходимость постоянного обновления. Современные системы ИИ требуют значительных вычислительных ресурсов в совокупности со сложной инфраструктурой. Многие поликлиники и больницы просто не обладают необходимыми техническими возможностями для внедрения таких решений;

- неопределенное будущее рабочих мест. Внедрение ИИ вызывает опасения среди медицинского персонала относительно будущего своих рабочих мест. Хотя многие эксперты утверждают, что ИИ не заменит врачей полностью, но он способен автоматизировать некоторые рутинные задачи, такие как анализ изображений или обработка данных;

- затраты на обучение персонала и оплату труда профильных специалистов. Включают обучение медперсонала работе с ИИ-системами, интерпретацию результатов и валидацию решений на основе рекомендаций ИИ, оплату труда профильных специалистов.

В [72] разработан ансамблевый метод машинного обучения, обеспечивающий построение интерпретируемых прогностических моделей, который апробирован на примере прогнозирования внутригоспитальной летальности у больных инфарктом миокарда. Проведено ретроспективное исследование по данным 4673 электронных историй болезни пациентов, которым выполнялось коронарное вмешательство. Было выделено две группы лиц, первую из которых составили 318 (6,8 %) больных, умерших в стационаре, вторую – 4355 (93,2 %) пациентов с благоприятным исходом лечения. Пул потенциальных предикторов был сформирован с помощью методов математической статистики. Для разработки прогностических моделей использовали многофакторную логистическую регрессию, случайный лес, стохастический градиентный бустинг и некоторые другие алгоритмы. Точность моделей оценивали по метрикам качества (AUC , чувствительность, специфичность). Метод обобщает результаты прогноза модифицированных деревьев решений, выделяет факторы риска и ранжирует их по вероятности развития неблагоприятного события, что позволяет разрабатывать модели с высоким прогностическим потенциалом ($AUC = 0,897$), которые сопоставимы с моделями *XGboost* и *CatBoost*. Вместе с тем этот метод позволяет давать клиническую интерпретацию генерируемых заключений, в том числе за счет оценки степени влияния факторов риска на вероятность развития внутригоспитальной летальности. Метод может стать надежным прогностическим инструментом для разработки интерпретируемых моделей машинного обучения в клинической медицине.

В [73] разработана экспертная система для поддержки решений врача ультразвуковой диагностики в объективизации оценки наблюдаемого изображения при остром аппендиците (ОА) у детей. База знаний системы реализована на продукционных правилах. Экспертные знания получены в процессе интервью с двумя высококвалифицированными врачами-специалистами в сонографии. Экспертная система ориентирована на дифференциальную диагностику между острым аппендицитом и другой абдоминальной патологией с последующей диагностикой различных форм аппендицита. Результаты тестирования прототипа системы на реальных данных 100 пациентов: для диагностики ОА/не ОА чувствительность 91,36 %, специфичность 68,42 %; классификация между флегмоной и другими формами

ОА – чувствительность 83,72 %, специфичность 64,52 %, а между флегмонозной и гангренозной формами – чувствительность 92,31 %, специфичность – 68,75 %. Однако и высококвалифицированный специалист не всегда может выявить признаки деструктивных форм ОА, что было отмечено в двух случаях. Необходимость разработки компьютерной системы определяется высокой значимостью своевременного распознавания опасных осложнений острого аппендицита, являющегося одной из наиболее частых причин хирургического вмешательства в детском возрасте. Следствием несвоевременного оказания медицинской помощи может быть переход катарального аппендицита в деструктивную форму (флегмонозную, гангренозную, гангренозно-перфоративную). Завершающим этапом этого марша может быть осложнение в форме перитонита, представляющего угрозу жизни пациента. Сонография является основным инструментальным методом для пациентов детского возраста с подозрением на острый аппендицит. Однако заключение врача на основе проведенного ультразвукового исследования брюшной полости зависит от его знаний и опыта. Этим определяется целесообразность применения компьютерной системы для распознавания различных вариантов аппендицита по данным сонографии.

В [74] предложена новая архитектура гибридной интеллектуальной системы (ГИС) (рис. 11).

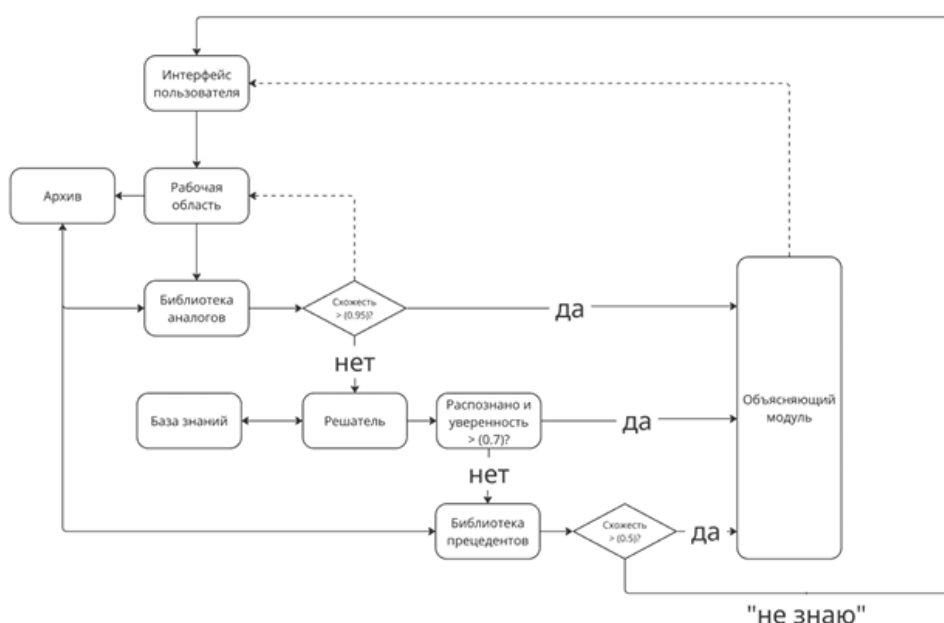


Рис. 11. Архитектура ГИС

В представленной системе решается задача диагностики стадий прогрессирующей мышечной дистрофии Дюшенна. Следует также отметить, что в отличие от большинства диагностических систем в настоящей постановке предусмотрена реализация ответа «не знаю» в условиях полной неопределенности между стадиями (невозможности с достаточной уверенностью установить переход от одной стадии к соседней). Тестирование системы проведено на реальных данных 18 больных с редким наследственным заболеванием – прогрессирующей мышечной дистрофией Дюшенна. В процессе компьютерной диагностики была показана высокая распознающая способность ГИС. Уровень правильных ответов стадий заболевания был 88,9 %, при одном неправильно распознанном случае и одном – не распознанном (ответ «не знаю»).

В отличие от традиционной последовательности первоначального анализа поступающих данных в базе знаний, рассматриваемый случай сначала поступает для сопоставления в библиотеку аналогов. В случае обнаружения высокого сходства нового объекта с аналогичными случаями (на основе заданной метрики) гипотеза принимается и решение выдается пользователю. В отсутствие достаточного сходства, требование которого установлено в системе, решение задачи передается в экспертную систему для последующей обработки с использованием правил базы знаний. В этом случае точность идентификации нераспознанного в библиотеке аналогов случая может быть повышена вследствие большего учета нечеткости, неопределенности и неполноты в исходных данных. Следствием неудовлетворительного распознавания на этом этапе является обращение к библиотеке прецедентов (атипичных случаев). Предлагаемый вариант каскадной процедуры распознавания объекта обеспечивает

более высокую эффективность работы системы. Это особенно важно для заболеваний, характеризующихся полиморфностью клинической картины и прогрессивным течением патологического процесса. Реализация данного подхода осуществлена в прототипе ГИС для диагностики стадий болезни Дюшенна. В работе приведены результаты тестирования системы.

Обращает на себя внимание многоцелевой подход авторов к проектированию нового класса гибридных интеллектуальных систем в области медицинской диагностики. В основу построения базы знаний интеллектуальной системы положена гибридная модель доказательного классификатора, основанная на объединении нечеткой логической регрессии, обладающей свойствами интерпретируемости, с технологией комбинирования свидетельств Демпстера – Шеффера, позволяющей объединять результаты работы классификатора, полученные от нескольких источников информации, и интегрировать знания специалистов в рамках единой гибридной системы. С целью повышения эффективности и производительности доказательного классификатора предлагается механизм калибровки признаковой шкалы лог-регрессионной модели. Приводятся примеры калибровки лог-модели, описывающей результаты 6-минутного теста при постановке диагноза хронической сердечной недостаточности. В качестве механизма принятия решений в гибридной системе используется технология комбинирования независимых свидетельств Демпстера – Шеффера. С целью корректного применения технологии Шеффера для слияния информации вводится формальное определение независимости свидетельств и предлагается критерий для обеспечения данного условия.

Достоинствами предложенного подхода является возможность учесть при проектировании гибридной МИС три основные особенности медицинской предметной области: нечеткость информации, интерпретируемость данных, интегрированность. Предлагаемая в статье модель гибридного доказательного классификатора позволяет отразить все три соответствующих фундаментальных концепта обработки информации: нечеткостный, интерпретационный и интеграционный.

В [75] была представлена значительно модифицированная и валидированная экспертная система поддержки принятия врачебных решений «ГенДиЭС» при дифференциальной диагностике лизосомных болезней накопления на долабораторном этапе обследования пациента. Структурированные и формализованные экспертные знания были представлены в форме матрицы «болезни – признаки», где клинические (нозологические) формы заболевания сгруппированы по четырем возрастным группам, в каждой из которых указаны экспертные оценки модальности, манифестации и выраженности признаков. Для выдвижения, подтверждения и ранжирования диагностических гипотез был разработан алгоритм принятия решений, который включает ряд шагов, позволяющих эффективно формировать ограниченный ряд диагностических гипотез. В алгоритме принятия решений системы предусмотрена обработка в условиях не только неполных данных пациентов, но и в случаях так называемой условной избыточности, т. е. ситуации, когда врач отмечает признаки, которые отсутствуют в эталонных описаниях. Критерием успешной работы системы было определено вхождение подтвержденного диагноза в ранжированный дифференциальный ряд из 5 гипотез, предлагаемых системой. Для сравнения следует отметить, что в аналогичных интеллектуальных системах для поддержки принятия решений в клинической генетике выдается от 3 до 10 диагнозов или полный список. В ходе проверки точности системы на разных выборках (тестовая, валидационная, верификационная) была продемонстрирована воспроизводимость результатов, что свидетельствует о перспективе применения системы в медико-генетических центрах и специализированных стационарах.

В [76] рассматривается проблема объяснения результатов прогнозирования с помощью моделей машинного обучения, разработки методов фенотипирования факторов риска и прогнозирования внутрибольничной смертности у пациентов с инфарктом миокарда с подъемом сегмента *ST* после чрескожного коронарного вмешательства. Для прогнозирования были определены факторы риска и сформированы их фенотипы, что обеспечивает не только прозрачность принятия решений, но и повышает качество прогнозирования. Были предложены два метода выделения факторов риска и формирования их фенотипов: минимизация энтропии и поиск разделяющей кривой на основе максимизации *AUC*. Эти методы были применены к набору данных из 4673 электронных медицинских карт пациентов с инфарктом миокарда *ST* и прогнозированием после экстренного коронарного вмешательства. Были определены фенотипы факторов риска, и на их основе были разработаны прогнозные модели. Результаты показали, что модель прогнозирования многофакторной логической регрессии (*MLR*) с фенотипами, идентифицированными методом минимизации энтропии в качестве предикторов, уступает по точности прогнозирования модели *MLR* с непрерывным предикторами (*AUC* – 0,885 против 0,902, *p*-значение = 0,036). Модель *MLR*, основанная на фенотипах, сформированных методом разделительных линий,

обеспечила более качественный прогноз ($AUC - 0,915$ против $0,902$ и $0,885$, p -значение = $0,029$ и p -значение $< 0,000001$ соответственно).

В [77] отмечается, что задача создания машинно-исполняемых документов является важнейшей задачей во всех отраслях промышленности и социальной сфере, медицина не является исключением. В настоящее время клинические рекомендации, выпущенные Министерством здравоохранения Российской Федерации, представлены в текстовом виде, что не позволяет программным системам автоматически обрабатывать их и разрабатывать системы поддержки принятия клинических решений. Более того, в их нынешнем виде эти тексты содержат многочисленные несоответствия и неточности (в соответствии определенной) информации, что еще больше усложняет их использование. Единственным жизнеспособным решением этой проблемы является создание этих документов в машинно-исполняемом формате. Однако это создает противоречие: представление, удобное для специалистов, не является машинно-исполняемым, и, наоборот, машинно-исполняемое представление неудобно и непонятно для практикующих врачей.

Для решения этой проблемы предлагается двойственное взаимосвязанное представление, основанное на онтологических структурах. Структурированный компонент позволяет создавать текст нового документа в более строгой форме, более точно формулировать каждое правило-рекомендацию, определять и классифицировать патологии, устанавливать соответствующие причинно-следственные связи. Формализованная часть представляет документ в формате, готовом для использования программными системами, и включает причинно-следственные связи, условия применения рекомендаций, а также классификацию стадий заболевания, симптоматических проявлений и вариантов лечения. Знания, полученные на этом языке, должны использоваться системами поддержки принятия клинических решений для генерации гипотез с целью поддержки или проверки решений. Работа в этом направлении продолжается и предусматривает автоматическое преобразование текстовых представлений в структурированные и формализованные форматы с использованием больших языковых моделей. Разработанные инструменты структурирования и перевод их в машиночитаемые графики знаний являются, на взгляд авторов, примером перспективного поколения гибридно-интеллектуальных сред со сбалансированным сосуществованием человеческого и искусственного интеллекта.

В [78] представлен подход, который объединяет машинное обучение на основе концепций (*CBL*) с анализом выживаемости, решая уникальные проблемы, связанные с цензурированными и зависящими от времени данными. Авторы отмечают, что анализ выживаемости – это важнейшая основа для моделирования данных о времени событий, которая может найти применение в медицине. Используя высокоуровневые концепции, полученные из необработанных объектов, предлагаемый метод повышает точность прогнозирования и интерпретируемость при моделировании выживаемости. Ключевым вкладом работы является переформулирование концептуальной структуры обучения для адаптации к анализу выживаемости. В частности, расширена традиционная модель *CBL*, которая позволяет прогнозировать функции выживания с учетом точных наблюдений. Интеграция оценки Каплана – Мейера в систему *CBL* позволила вычислять предварительные и условные вероятности выживания, обеспечивая надежную обработку времени событий и показателей цензурирования. Кроме того, использование методов встраивания и кластеризации обеспечило механизм для преодоления разрыва между необработанными входными данными и концепциями высокого уровня, что позволило осмысленно интерпретировать прогнозы.

Предлагаемый подход обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими моделями выживания. Он обеспечивает интерпретируемость, выражая прогнозы в терминах высокоуровневых концепций. Способность метода обрабатывать данные, подвергнутые цензуре, обеспечивает его применимость к сценариям реального мира, где время события часто остается ненаблюдаемым. Вероятностная структура позволяет вычислять вероятности выживания в различные моменты времени, обеспечивая всестороннее представление о прогнозируемых результатах. Остаются возможности для дальнейших исследований. В будущем поиск может быть сосредоточен на совершенствовании процесса кластеризации, чтобы лучше уловить взаимосвязи между вложениями и концепциями. Кроме того, расширение модели для обработки динамических или изменяющихся во времени данных повысило бы ее применимость к лонгитюдным исследованиям. Изучение альтернативных методов оценки вероятности выживания или подходов, основанных на глубоком обучении, также может повысить эффективность прогнозирования. Устраняя разрыв между исходными характеристиками и концепциями высокого уровня, предложенный метод открывает новые возможности для совершенствования моделирования выживаемости в различных прикладных областях.

В [79] используется распределение Вейбулла для построения параметрической модели выживания. Авторы представили *WeibSurvGBM*, модель параметрического анализа выживаемости, которая эффективно сочетает теоретические основы распределения Вейбулла с системой повышения градиента *XGBoost*. Экспериментальные результаты демонстрируют, что *WeibSurvGBM* превосходит общепринятые методы, такие как леса для выживания в условиях рандомизации и машина для повышения градиента Кокса, в большинстве тестовых наборов данных. Особого внимания заслуживают его высокие показатели на сложных наборах медицинских данных (СПИД, рак молочной железы, *WPBC*), где он улучшает индекс *C* на 1,1–16,7 % по сравнению с конкурирующими методами. Перспективно исследовать предложенную модель на других параметрических распределениях вероятностей: логарифмически нормальное, Гомперца, гамма-распределения.

Кроме того, важно комбинировать модели с различными распределениями вероятностей от времени до события, чтобы получить модель, основанную на ансамбле. Также интересно рассмотреть сочетание распределения вероятностей с обучаемыми параметрами. Другим направлением дальнейших исследований является разработка гибридных параметрических/непараметрических подходов, которые могли бы объединить преимущества параметрической и непараметрической моделей. Непараметрические модели могут быть более эффективными, когда неизвестно подходящее теоретическое распределение, а параметрические модели могут быть более эффективными, когда время выживания соответствует теоретическому распределению. Комбинация указанных моделей с подающим обучением параметром из их смеси может привести к новым результатам.

В [80] рассмотрены вопросы прогнозирования психического стресса в реальном времени с использованием объяснимых нейронных сетей. Авторы представили комплексный подход к прогнозированию психического стресса в режиме реального времени путем интеграции мультимодальных данных физиологических датчиков с технологиями *XAI*. Используя набор данных *WESAD*, они разработали оптимизированную модель *ANN*, что позволило снизить сложность модели на 50 % при сохранении точности измерения напряжений на 96,27 %. Это улучшение согласуется с предыдущими работами. Метод *Random Forest* продемонстрировал точность 98,53 %, по данным *WESAD*, что делает его пригодным для использования.

Результаты работы в контексте исследовательской программы *XAI* по выявлению стресса вносят разнообразие в предлагаемый подход, потенциально позволяющий выявить тонкие закономерности в физиологических данных, которые могут быть упущены из виду при использовании методов, основанных на дереве решений. В будущем планируется дальнейшая интеграция дополнительных методов *XAI*, таких как локально интерпретируемые модели (*LIME*), чтобы повысить как интерпретируемость, так и эффективность систем определения стресса. Планируется разработка пользовательского приложения для прогнозирования уровня стресса с использованием разработанной модели, обеспечивающей мониторинг стресса в режиме реального времени и обратную связь с пользователями.

Заключение

В обзоре выполнен анализ докладов, представленных на конференции *ITIT'25*. Рассмотрены основные направления теоретических и прикладных исследований в области интеллектуальных систем и технологий. Стремительная цифровая трансформация в различных секторах индустрии, включая транспорт, привела к распространению больших, сложных и неопределенных данных, что создает серьезные трудности для принятия разумных решений. В то время как искусственный интеллект позволяет системам обучаться на основе данных, адаптироваться к изменениям и делать прогнозы, традиционные подходы часто сталкиваются с неопределенностью, расплывчатостью и субъективностью, присутствующими в реальном сценарии. Отличительной чертой докладов в 2025 г. стало большое разнообразие способов применения современных информационных и интеллектуальных технологий в различных областях промышленности, медицины, социальной сферы, естественных наук. Традиционно большую часть докладов составили исследования, посвященные применению ИИ и машинного обучения в технических задачах. Значительная часть докладов *ITIT'25* касалась использования нейросетевых технологий по таким направлениям, как логические основы искусственного интеллекта, интеллектуальные системы поддержки принятия решений, многоагентные системы, мягкие вычисления, интеллектуальные информационные технологии в области естественных, экономических и социальных наук, искусственный интеллект в информационной безопасности и квантовая информатика, промышленная интеллектуализация в Индустрии 5.0, финансовая математика, искусственные нейронные сети, машинное обучение и их применение в Индустрии 5.0, интеллектуальные медицинские системы. По каждому из

направлений выполнен анализ наиболее интересных докладов для популяризации результатов исследований в области прикладного искусственного интеллекта среди русскоязычной аудитории.

Принятые к публикации доклады будут опубликованы в сборниках трудов конференции *IITI'25*:

Lecture Notes in Networks and Systems. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook). – <https://doi.org/10.1007/978-3-032-13615-2>;

Lecture Notes in Networks and Systems. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook). – <https://doi.org/10.1007/978-3-032-13612-1>.

Список литературы/References

1 **Ilicheva, V.** Analysis of a Logical Approach for Modeling Transport Systems Extended by Built-in Arithmetic / V. Ilicheva, A. Guda // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 732–741. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

2 **Mikheyenkova, M.** On the Role of Argumentation in Trustworthy Decision-Making Systems / M. Mikheyenkova // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 741–750. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

3 **Eremeev, A. P.** Boolean and metric extensions of Allen's interval logic / A. P. Eremeev, G. S. Plesnewicz // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 708–721. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

4 **Bochkov, A.** On the “Reasonableness” Criterion for Artificial Intelligence / A. Bochkov // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 697–708. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

5 **Yurushkin, M.** Minimal String Search under Regular Constraints / M. Yurushkin, I. Slynko, S. Bachurin // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 721–732. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

6 **Gribova, V.** Decision Support through Reasoning by Analogy Based on a Hybrid Case Retrieval Approach / V. Gribova, R. Kovalev, V. Timchenko // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 227–239. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

7 **Gerasimenko, E.** Integrated Multi-Criteria Linguistic Group Decision-Making Algorithm for Mass Evacuation Scenarios / E. Gerasimenko, V. Kureichik, G. B. Allende // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 266–280. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

8 **Romanov, A.** A Context-Based Approach to Fuzzy Type-2 Membership Functions Parametrizing in Control Applications / A. Romanov, A. Filippov, L. Kamaletdinova // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 201–213. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

9 **Ireddy, S. A. T.** Analysis of Internal and External Context in Clinical Decision Scenarios with Expert Feedback / A. T. S. Ireddy, S. Kovalchuk // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 301–316. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

10 Data Mining Methods for Classifying Complex Objects on Example of Oil Well Production Flow Regimes / I. Mikhaylov, I. Fominykh, M. Fomina, K. Sidorov // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 167–176. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

11 Hybrid Algorithm for Forming a Route Configuration Taking into Account Uncertainty in Terrain Information / M. Beskhmel'nov, A. Vyatkin, Y. Dobrikov, O. Lebedev // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 248–266. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

12 **Tselykh, A.** A Finite-Horizon Open-Loop LQ-Control Problem with Unknown Dynamics Under Constraints / A. Tselykh, V. Vasilev, L. Tselykh // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 188–201. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

13 **Tselykh, A.** Reconstruction of Weights of a Directed Weighted Signed Graph Via a Conditional Principal Eigenvector / A. Tselykh, V. Vasilev, L. Tselykh // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 176–188. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

14 **Akperov, I.** Integrated Organizational Design for Enhancing Digital Consciousness Through Meta competency Development / I. Akperov, B. Martynov // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 239–248. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

15 Remote Sensing Detection an Archaeological Site of Bronze Age Using Digital Terrain Models and YOLO Models Based on a Transformer Architecture / A. Vokhmintcev, V. Abbazov, M. Khater [et al.] // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 2. – P. 280–292. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

16 **Rodzin, S.** Metaheuristic Algorithms : Current State and Applications in Optimization Problems / S. Rodzin, A. Alexandrov, I. Olgeizer // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 438–455. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

17 Optimization Algorithm for Finding Initial Solutions in Population Metaheuristics / S. Rodzin, A. Chernova, I. Olgeizer, S. Kovalev // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 455–467. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

18 **Zavarzin, N.** Empirical Evaluation of Motion Primitives in Multi-Agent Path Finding with Kinodynamic Constraints / N. Zavarzin, K. Yakovlev // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 467–481. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

19 **Gao, J.** Cost Optimization Problem for Opinion Dynamics at Terminal Moment in a Multi-Agent Social Group / J. Gao // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 431–438. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

20 **Veselov, G.** Development of a Hybrid Method for Solving the Problem of Queuing Applications / G. Veselov, L. Gladkov, W. M. Lezca // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 546–559. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

21 **Bereza, D.** Development of an Agent-based Algorithm for Solving Systems of Linear Algebraic Equations of Large Dimension / D. Bereza, L. Gladkov, N. Gladkova // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 559–573. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

22 **Sakharov, M.** Optimal Control of Vacuum Gas Oil Catalytic Cracking / M. Sakharov, K. Koledina // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 535–546. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

23 **Gnidko, K.** Technology for Early Detection of Threats to the Information and Psychological Security of Students at Educational Institutions in the Sirius Federal Territory Based on Artificial Intelligence Models and Methods / K. Gnidko // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 421–432. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

24 **Kucherov, S.** Hybrid Approach Using Artificial Intelligence for Software Systems Development Tasks / S. Kucherov, Y. Rogozov, A. Sviridov // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 411–421. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

25 **Zhilyakova, L.** Computational Model of Interval Timing in Active Intelligent Agents / L. Zhilyakova // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 497–507. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

26 Neuro-Fuzzy Modeling for Synthesis Optimization: A Pathway to Advanced Porous Materials / A. Alexandrov, E. Kolomenskaya, V. Butova, M. Butakova // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 457–473. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

27 **Rybina, G.** Situational Control Application to Construct Adaptive Ontological Environment for Intelligent Tutoring Based on Integrated Expert Systems / G. Rybina, A. Grigoryev // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 580–592. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

28 **Gnidko, K.** Fine-Tuned ResNet50 for Binary Classification of Harmful Visual Stimuli: Dataset Curation and Performance Benchmarking / K. Gnidko, D. Lisov // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 341–352. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

29 **Gavrilenko, O.** Feature Engineering in the Task of Predicting the Psychological Traits Online Social Network Users / O. Gavrilenko, V. Oliseenko, M. Abramov // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 432–443. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

30 **Ivashchenko, A.** Career Proling: AI-based Prediction Using Digital Traces from Online Social Networks / A. Ivashchenko, T. Tulupyeva // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 621–631. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

31 **Lepskiy, A.** Combining Dependent Sources of Information within the Framework of Evidence Theory / A. Lepskiy // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 473–485. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

32 Automated Corn Kernel Counting from Multiple Views / M. Yurushkin, A. Gornostal, P. Babich [et al.] // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 26–36. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

33 **Kotenko, I.** Combining Methods to Protect Image Recognition Systems from Adversarial FGSM Attacks / I. Kotenko, I. Saenko, V. Sadovnikov // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 283–294. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

34 **Abramenko, G.** Ontology-Guided Heterogeneous Graph Retrieval for Large-Language-Model Interpretation of Suricata Events / G. Abramenko, I. Kotenko // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 261–273. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

35 Possibilities to Detect a Crash in a Large IT Infrastructure by Indirect Indicators / A. Grusho, D. Smirnov, E. Timonina, M. Zabezhailo // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 317–329. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

36 **Li, X.** Quantum Reservoir Computing for Modeling Nonlinear Complex Dynamics / X. Li, C. Huo, C. Zhao // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 294–305. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

37 **Sharikov, P.** Methodology for Analyzing Dockerfiles for Vulnerabilities Using AI / P. Sharikov, A. Chechulin // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 273–283. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

38 **Gorda, M.** Architecture of a Decision-Support Assistant for Cybersecurity Incident Investigation / M. Gorda, A. Chechulin // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 305–317. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

39 A Reinforcement Learning-Based Agent Training Environment for Autonomous Cybersecurity Protection / A. Balaira Reyes, A. Tselykh, Y. Varakin, T. Gadzhiev // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 362–374. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

40 **Gnidko, K.** Quantum-Like Phenomena in the Spread of Collective Emotions in Social Networks: Model, Experiment, and Dataset / K. Gnidko, I. Vasilenko // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 352–362. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

41 **Boluchenko, V.** Digital Platform for Intelligent Tracking of International Road Transport using Blockchain Technology and Electronic Navigation Seals / V. Boluchenko, O. Kudryavtsev, V. Skiba // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 223–234. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

42 Neural Network Model for Adaptive Control of Permanent Magnet Synchronous Motor / A. Chepiga, A. Chebotarev, V. Kandalov [et al.] // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 184–197. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

43 Learning to Reject: Using an Error Class for More Reliable Object Detection / A. Puzerenko, A. Sukhanov, P. Borovlev, A. Khatlamadzhyan // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 140–159. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

44 Automated Non-Contact Measurement of Geometric Parameters of Wheels for Safe Movement of Rolling Stock / A. S. Adadurov, I. Yu. Savelev, P. I. Tsomae, K. G. Arinushkina // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 65–77. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

45 **Kulinich, I.** Artificial Intelligence-Based Methods for Evaluation of Severity Parameter for Hazard Analysis and Risk Assessment of Highly Automated Vehicle / I. Kulinich, O. Kirovskii, A. Korolev // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 212–22. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

46 The Use of LLM in Selecting the Architectural Patterns for Safety Critical Automotive Systems / M. Tikhomirov, O. Kirovskii, G. Kruglov [et al.] // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 93–103. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

47 Transformation the Mathematical Model of Telemetry Data to Reconstruct the Wagon History Movements in the Station for the Purpose of Idle Analytics / D. V. Fedorin, D. S. Polyanichenko, S. Y. Grishaev, A. I. Dolgiy // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 30–43. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

48 Automation and Intellectualization of Management Train and Shunting Movements at the Marshalling Yard / S. K. Nastenko, D. S. Polyanichenko, M. A. Butakova, S. Y. Grishaev // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 43–53. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

49 **Khashev, A.** Models of Urban Transport Infrastructure Development under Systemic Constraints / A. Khashev, N. Kovaleva, T. E. Mamaev // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 197–212. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

50 **Bulavin, Y.** Neural Network-Based Control of Train Dynamics for Railway Road Digital Twins / Y. Bulavin, O. Ignatieva, V. Vereskun // *International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25)*. – 2025. – Vol. 1. – P. 246–261. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

51 Synergetic Approach to the Development of Autonomous Smart Grid Systems / G. Veselov, D. Elkin, S. Sklyarov [et al.] // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 3–14. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

52 **Dulin, S.** Intellectualizing Geodata Access based on Semantic Geointeroperability / S. Dulin, D. Nikishin, A. Ryabtsev // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 172–184. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

53 **Kuliga, A. V.** Geometrical Properties and Exact Decay of Long-Short Algorithmic Trading Strategies / A. V. Kuliga, I. N. Shurnikov // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 681–696. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

54 **Baron, M.** Detection of Temporary Disorders with Application to Electricity Pricing / M. Baron, S. Malov // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 634–646. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

55 **Vyatkin, A.** Comparison of LLMs on Financial Professional Tests / A. Vyatkin, V. Oliseenko, R. Morozov // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 655–667. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

56 **Danilova, N.** Statistical Machine Learning in Risk Management for Random Investing / N. Danilova, G. Beliaevsky, E. Kamchatnaya // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 646–655. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

57 Interaction Modeling and System Stability Analysis in Financial Markets / X. Zhang, W. Tan, M. Yu [et al.] // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 623–634. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

58 A Probabilistic Concept-Based Learning Method within the Framework of Survival Analysis / L. Utkin, S. Kirpichenko, A. Konstantinov [et al.] // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 96–108. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

59 **Konstantinov, A.** Neural Network as a Loss Function for Constructing Decision Tree / A. Konstantinov, L. Utkin, N. Verbova // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 108–121. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

60 **Petrovski, A.** Machine Learning-Based Intelligent Measurement in Industrial Digital Twins / A. Petrovski, G. Abramenko, I. Kotenko // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 14–26. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

61 **Zhang, S.** PnP-dPPM : Accelerating Plug-and-Play Methods with Degenerate Proximal Point Methods / S. Zhang, H. Yang, H. Wang // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 54–64. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

62 **Wang, Q.** Multi-Task Deep Convolutional Neural Network Based on YOLOv11 for Tomato Fruit Ripening Detection / Q. Wang, G. Fu, Z. Li // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 144–155. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

63 Hybrid and Hierarchical Explainable AI Based on Kolmogorov-Arnold Networks / A. Averkin, Y. Trofimov, A. Lebedev, A. Ilin // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 36–44. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

64 **Mikhailov, D.** Lion Optimizer: the Impact of Hyperparameter Selection on the Quality of Model Training / D. Mikhailov, M. Abramov // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 44–53. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

65 **Puchkov, A.** CNN-LSTM Autoencoder for Anomaly Detection in Phosphate Ore Thermal Processing Data / A. Puchkov, A. Sokolov, M. Vorotilova // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 131–144. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

66 **Avshalumov, M.** Towards Fast Image Segmentation Based on Visual-Language Prompts / M. Avshalumov, D. Yudin // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 64–76. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

67 **Kolodenkova, A.** Problems of Recognizing a Potential Intruder by Body Movements and Face and Ways of Solving Them / A. Kolodenkova, M. Bochkarev // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 88–96. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

68 **Vakhitov, R.** Object-Centric World Models Meet Monte Carlo Tree Search / R. Vakhitov, L. Ugadiarov, A. Panov // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 481–492. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

69 LLM-Powered Hybrid Decision Support : Foundation Techniques, General Architecture and Methodology / A. Smirnov, A. Ponomarev, N. Shilov [et al.] // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 597–614. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

70 **Sakharov, M.** A New Assessment Framework for LLM-Generated Optimization Methods / M. Sakharov // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 585–597. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

71 **Vitko, M.** Structuring and Optimization of Personalized Context for Large Language Models in Software Developer's Support / M. Vitko, S. Kovalchuk // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 573–585. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

72 An Interpretable Predictive Model of In-Hospital Mortality in Patients with Myocardial Infarction Based on Risk Factor Phenotypes / K. Shakhgelyan, G. Grenkin, B. Geltser, N. Kuksin // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 317–329. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

73 **Bogatikova, M.** Prototype of an Expert System for the Diagnosis of Destructive Forms of Acute Appendicitis in Children / M. Bogatikova, A. Belyaeva, B. Kobrinskii // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 350–358. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

74 **Kobrinskii, B. A.** Hybrid Approach to Designing Medical Intelligent Systems Based on Combining Fuzzy Models and Heterogeneous Information Fusion Methods / B. A. Kobrinskii, S. Kovalev, V. S. Chekanova // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 329–339. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

75 **Blagosklonov, N. A.** Medical Expert Diagnostic Decision Support System : Results and Validation / N. A. Blagosklonov // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 417–431. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

76 An Interpretable Predictive Model of In-Hospital Mortality in Patients with Myocardial Infarction Based on Risk Factor Phenotypes / K. Shakhgelyan, G. Grenkin, B. Geltser, N. Kuksin // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 317–329. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

77 **Gribova, V. V.** Machine-Executable Representation of Clinical Treatment Guidelines / V. V. Gribova, E. A. Shalfeeva // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 386–397. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

78 A Probabilistic Concept-Based Learning Method within the Framework of Survival Analysis / L. V. Utkin, S. R. Kirpichenko, A. V. Konstantinov [et al.] // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 96–108. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

79 **Efremenko, V. A.** The Weibull Distribution as a Parametric Survival Model Incorporated into the Second-Order Gradient Boosting / V. A. Efremenko, A. V. Konstantinov, L. V. Utkin // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 1. – P. 21–30. – ISBN 978-3-032-13615-2 (eBook).

80 Real Time Mental Stress Prediction Using Explainable Artificial Neural Network with Network Pruning / M. W. Raed, H. M. Jadallah, I. Huseyinov [et al.] // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'25). – 2025. – Vol. 2. – P. 407–417. – ISBN 978-3-032-13612-1 (eBook).

*S. M. Kovalev, I. V. Kotenko, S. I. Rodzin, A. N. Guda, A. V. Sukhanov,
M. A. Butakova, S. Yu. Grishaev*

ANALYTICAL REVIEW OF PROCEEDINGS OF IITI'25 CONFERENCE

Abstract. The review provides a brief summary of the collection of the most interesting reports of the 9th International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'25), which was held from November 4–7, 2025, on the territory of the Federal Center "Sirius" in Russia. The conference was organized by Sirius University of Science and Technology, the Rostov State Transport University and the Scientific Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport with the support of the Russian Association of Artificial Intelligence.

The aim of the conference is to accelerate the human-centered transformation in Industry 5.0 through AI-based innovation, facilitating the introduction of practical, safe and sustainable

technologies that prioritize the interests of people and progress. The reports present interdisciplinary research combining AI in industry, human-machine interface, robotic systems, intelligent transport systems, soft computing, machine learning, multi-agent systems with empirical verification in real industrial conditions.

Keywords: intelligent information technologies, artificial intelligence in Industry 5.0, robotic systems, automation in transport, machine learning, soft computing, bioinspired algorithms, intelligent agents.

For citation: Analytical review of proceedings of IITI'25 conference / S. M. Kovalev, I. V. Kotenko, S. I. Rodzin [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025 – No. 4. – P. 108–150. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_108.

Сведения об авторах

Ковалев Сергей Михайлович

Ростовский филиал
АО «Научно-исследовательский и
проектно-конструкторский
институт информатизации, автоматизации
и связи на железнодорожном транспорте»
(Ростовский филиал АО «НИИАС»),
научный руководитель.

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматика и телемеханика
на железнодорожном транспорте»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ksm.1954@yandex.ru

Котенко Игорь Витальевич

Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр
Российской академии наук,
главный научный сотрудник,

Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет
информационных технологий,
механики и оптики,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ivkote@comsec.spb.ru

Родзин Сергей Иванович

Южный федеральный университет (ЮФУ),
Институт компьютерных технологий
и информационной безопасности,
кандидат технических наук, доцент.

Ростовский филиал АО
«Научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации
и связи на железнодорожном транспорте»
(Ростовский филиал АО «НИИАС»),
ведущий научный сотрудник,
e-mail: srodzin@sfedu.ru

Information about the authors

Kovalev Sergey Mikhailovich

Rostov branch of JSC “Scientific Research
and Design Institute of Information,
Automation and Communications in Railway
Transport” (Rostov branch of JSC NIAS),
Scientific Supervisor.

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Automation and Telemechanics
in Railway Transport”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ksm.1954@yandex.ru

Kotenko Igor Vitalievich

Federal Research Center of the Russian
Academy of Sciences,
Chief Researcher,

Saint Petersburg National Research
University of Information Technologies,
Mechanics and Optics,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ivkote@comsec.spb.ru

Rodzin Sergey Ivanovich

Southern Federal University (SFedU),
Institute of Computer Technology
and Information Security,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor.

Rostov branch of JSC “Scientific Research
and Design Institute of Information,
Automation and Communications in Railway
Transport” (Rostov branch of JSC NIAS),
Leading Researcher,
e-mail: srodzin@sfedu.ru

Гуда Александр Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), проректор по научной работе, доктор технических наук, профессор, e-mail: guda@rgups.ru

Суханов Андрей Валерьевич

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

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

Бутакова Мария Александровна

Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (Ростовский филиал АО «НИИАС»), главный научный сотрудник.

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Информатика», доктор технических наук, профессор, e-mail: m.butakova@vniias.ru

Гришаев Сергей Юрьевич

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

Guda Alexander Nikolaevich

Rostov State Transport University (RSTU), Vice-Rector for Scientific Work, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: guda@rgups.ru

Sukhanov Andrey Valeryevich

Rostov branch of JSC “Scientific Research and Design Institute of Information, Automation and Communications in Railway Transport” (Rostov branch of JSC NIIS), Deputy Head of the Department of Intelligent Information Technologies of the Digital Station.

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Computer Science and Automated Control Systems”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, email: a.suhanov@vniias.ru

Butakova Maria Alexandrovna

Rostov branch of JSC “Scientific Research and Design Institute of Information, Automation and Communications in Railway Transport” (Rostov branch of JSC NIIS), Chief Researcher.

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Computer Sciences”, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: m.butakova@vniias.ru

Grishaev Sergey Yurievich

Rostov branch of JSC “Scientific Research and Design Institute of Information, Automation and Communications in Railway Transport” (Rostov branch of JSC NIIS), Director, Candidate of Engineering Sciences, e-mail: s.grishaev@vniias.ru

В. Г. Новиков, А. И. Сафронов, М. А. Бесчастный

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА ПОСРЕДСТВОМ АДАПТАЦИИ ВРЕМЕНИ ЗАКРЫТИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПЕРЕЕЗДА

Аннотация. Рост объемов перевозок обуславливает необходимость повышения эффективности функционирования систем управления и обеспечения безопасности движения поездов. Повышению уровня безопасности движения поездов, а также пропускной способности транспортных путей способствует применение принципов и методов, реализуемых системами управления и обеспечения безопасности движения поездов, использующими цифровой радиоканал передачи данных. Одним из таких методов, среди множества известных на сегодняшний день, является адаптивное закрытие железнодорожного переезда посредством изменения протяженности участка извещения участников движения о приближении поезда к переезду, позволяющее обеспечивать безопасное движение автотранспорта через железнодорожный переезд при минимально допустимом времени извещения о приближении поезда.

Ключевые слова: системы обеспечения безопасности движения поездов, системы управления, железнодорожный переезд, пропускная способность, адаптивное закрытие переезда, цифровой радиоканал передачи данных, автоматическая переездная сигнализация.

Для цитирования: Новиков, В. Г. Повышение пропускной способности участков движения автотранспорта посредством адаптации времени закрытия регулируемого железнодорожного переезда / В. Г. Новиков, А. И. Сафронов, М. А. Бесчастный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 151–160. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_151.

Введение

Повышение уровня безопасности движения транспортных средств (ТС) через железнодорожные переезды и улучшение пропускной способности автотранспорта формирует актуальность поиска гибких решений, одним из которых является адаптация времени закрытия регулируемого железнодорожного переезда.

Кроме того, актуальность исследований данного направления подтверждается, в частности, формированием проектных заявок ОАО «РЖД», размещаемых на витрине проектов РУТ (МИИТ), с целью дальнейшей детальной проработки предложенных к рассмотрению проблемных ситуаций обучающимися, а также задач, связанных с необходимостью использования современных подходов к проектированию крупных промышленных систем.

Основная часть

Следует отметить, что улучшению показателей безопасности движения поездов, а также повышению пропускной способности участков движения ТС, содержащих железнодорожные переезды, способствует интенсификация внедрения новых принципов управления движением ТС, новых технологий и средств управления железнодорожной инфраструктурой, принципов и методов, реализуемых с применением интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [1–4].

Интеллектуализация алгоритмов управления, применение цифрового радиоканала передачи данных, интеграция «умных» устройств и автоматизированных систем управления движением ТС [5–10] в совокупности позволят повысить уровень безопасности движения поездов, а также ТС, пересекающих железнодорожные пути. Вместе с тем разработка комплексного подхода к решению обозначенной проблемы в перспективе окажет влияние и на уровень безопасности пешеходов, а также лиц, использующих для передвижения средства индивидуальной мобильности [11], пересекающих железнодорожные переезды.

В работе рассматривается разработка принципов, закладываемых в интеллектуальную систему управления и обеспечения безопасности движения поездов (ИСУиОБДП). Эта система предназначена для обеспечения безопасного процесса движения железнодорожного подвижного состава за счет примененных в ней современных технологий, автоматизированного поиска, принятия к реализации мак-

симально эффективных сценариев управления поездами и объектами железнодорожной инфраструктуры, а также беспроводных технологий передачи данных. Внедрение ИСУиОБДП способствует повышению пропускной способности участка движения автотранспорта посредством адаптации времени закрытия железнодорожного переезда, что несомненно является актуальной задачей [12–14].

Железнодорожные переезды первично классифицируются следующим образом: переезды общего пользования; переезды необщего пользования; регулируемые переезды; нерегулируемые переезды; охраняемые переезды; неохраняемые переезды [15].

Дополнительно следует отметить, что общее/необщее использование железнодорожных переездов зависит от ограничений, вводимых организациями, ответственными за содержание и эксплуатацию этих переездов.

Вторичная классификация железнодорожных переездов основывается на априорной оценке интенсивности движения автотранспорта и поездов через них в установленную единицу времени.

Соответствие железнодорожного переезда одной из отмеченных выше категорий определяет набор требований к обустройству, техническому обслуживанию, в том числе круглосуточному, регламентируют проведение ремонтных работ. Вместе с тем повышение гарантий функциональной безопасности объектов железнодорожной инфраструктуры, связанное с исключением разрушительных воздействий от заезда автотранспорта на железнодорожные пути по приближении поезда, основывается на применении противотаранных шлагбаумов.

В своей работе авторы сосредоточились на рассмотрении регулируемых железнодорожных переездов.

Расчет времени хода поезда до момента достижения регулируемого железнодорожного переезда

Адаптация времени закрытия переезда при изменении (уменьшении) длины участка оповещения о приближении поезда к переезду предназначена главным образом для обеспечения должного уровня безопасности движения ТС через регулируемый железнодорожный переезд при минимально допустимом времени извещения о приближении поезда в соответствии с параметрами его движения.

Система принимает решение о закрытии переезда на основании полученных данных от поездного устройства, находящегося в зоне извещения, о приближении поезда к регулируемому железнодорожному переезду и начинает в режиме реального времени рассчитывать момент времени достижения поездом переезда.

Рассматриваемая система производит вычисление (прогнозирование) времени достижения поездом переезда. Расчетное время при этом уменьшается на величину времени передачи команды на закрытие переезда (1 с).

Корректировка исходных данных, необходимых для проведения расчета, производится при каждом приеме сообщений от поездного устройства.

Расстояние до переезда (L_{Π}) определяется посредством вычисления математического модуля разности между координатой головы поезда ($k_{ГП}$) и координатой оси переезда ($k_{ОП}$) [16]. Полученная величина далее уменьшается на следующие величины:

- максимальную погрешность измерения навигационной координаты Δ_{GPS} (30 м);
- путь ($L_{\Delta t}$), проходимый поездом за время цикла обмена данными (Δt), принимается равным 1 с при движении поезда с ускорением (a_y) до достижения им предельного значения по допустимой скорости ($V_{доп}$);
- путь ($L_{ОБР}$), проходимый поездом за время вычислений, производимых в системе ($T_{ОБР}$) (величина ожидания отклика составляет около 0,5–2 с, что уточняется в процессе реализации расчета);
- ширина одной автодорожной полосы (L_D) по умолчанию принимаемой равной 4 метра.

С учетом вышеизложенного величина оставшегося пути до переезда (L'_{Π}) определяется по формуле:

$$L'_{\Pi} = |k_{ГП} - k_{ОП}| - \Delta_{GPS} - L_{\Delta t} - L_{ОБР} - L_D, \quad (1)$$

где $L_{\Delta t} + L_{ОБР}$ достигают максимальных значений при движении поезда с допустимой скоростью и определяются как

$$L_{\Delta t} + L_{ОБР} = V_{доп} \cdot (T_{ОБР} + \Delta t). \quad (2)$$

Минимальное время, за которое поезд преодолевает расстояние до переезда, определяется с учетом начала движения поезда с ускорением до достижения им предела допустимой скорости движения ($V_{доп}$). Значения ускорения и предела допустимой скорости определяются параметрами самого

поезда, ограничениями скорости на конкретном участке железнодорожного сообщения и текущей оперативной поездной ситуацией.

Определим минимальное время (T_{MIN}), за которое поезд достигает переезда при заходе на участок оповещения о приближении поезда со скоростью V_{Φ} . Схема движения поезда по участку, на котором происходит оповещение о приближении его к переезду, представлена на рис. 1.

Для начала определим время, которое понадобится поезду для достижения предела допустимой скорости (T_a):

$$V_{ДОП} = V_{\Phi} + a_y \cdot T_a \Rightarrow T_a = \frac{V_{ДОП} - V_{\Phi}}{a_y}. \quad (3)$$

Расстояние, пройденное поездом до достижения значения предела допустимой скорости L_a , определяется по формуле:

$$L_a = V_{\Phi} \cdot T_a + \frac{a_y \cdot T_a^2}{2}. \quad (4)$$

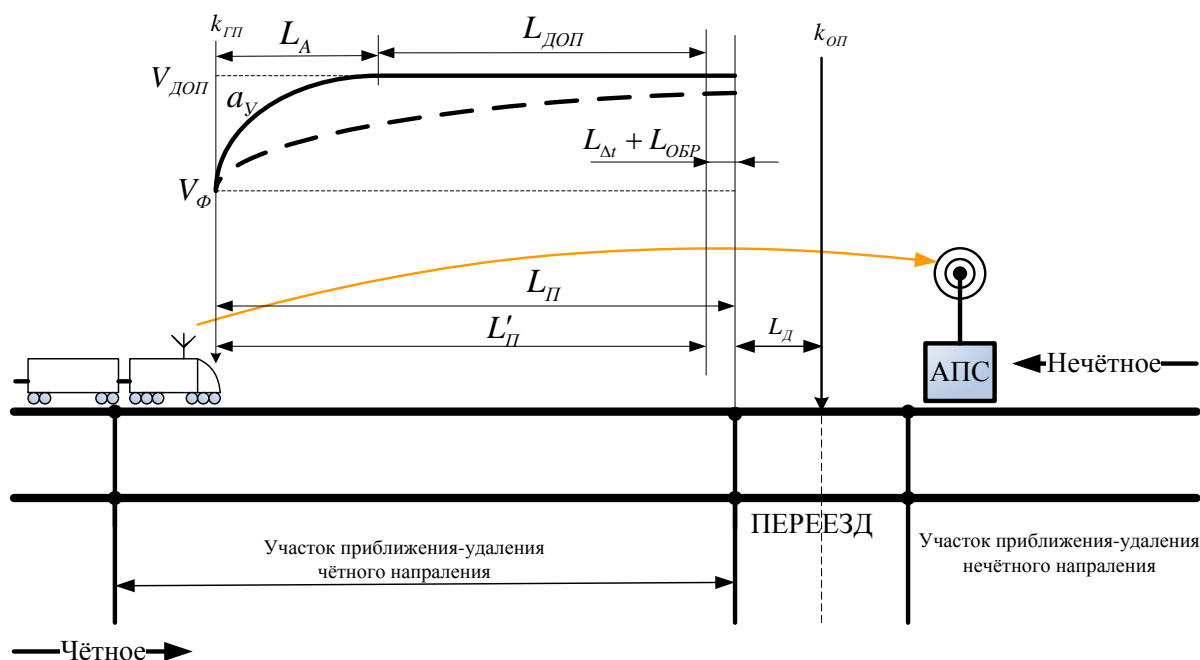


Рис. 1. Схема движения поезда по участку оповещения о приближении поезда к переезду

Путь, пройденный поездом при достижении им допустимой скорости при реализации равномерного движения ($L_{ДОП}$), определяется согласно соотношению (5):

$$L_{ДОП} = L'_{П} - L_a. \quad (5)$$

Для случаев, когда $L_{ДОП} > 0$, время движения поезда с максимальной скоростью ($T_{ДОП}$) составит:

$$T_{ДОП} = \frac{L_{ДОП}}{V_{ДОП}}. \quad (6)$$

Если $L_{ДОП} \leq 0$, то $T_{ДОП}$ приравнивается к нулю.

Минимальное время хода поезда до момента достижения им регулируемого железнодорожного переезда (T_{MIN}) составит:

$$T_{MIN} = T_a + T_{ДОП}. \quad (7)$$

Обобщая формулы (1–7), получим выражение (8) для случая $L_{ДОП} > 0$:

$$T_{MIN} = \frac{V_{ДОП} - V_{\Phi}}{a_y} + \frac{|k_{ГП} - k_{ОП}| - \Delta_{GPS} - (V_{ДОП} \cdot (T_{ОБР} + \Delta t)) - L_{Д} - \left(V_{\Phi} \cdot T_a + \frac{a_y \cdot T_a^2}{2} \right)}{V_{ДОП}} \Rightarrow T_{MIN} = \frac{V_{ДОП} - V_{\Phi}}{a_y} + \frac{|k_{ГП} - k_{ОП}| - \Delta_{GPS} - (V_{ДОП} \cdot (T_{ОБР} + \Delta t)) - L_{Д} - \left(\frac{V_{\Phi}^2 - V_{ДОП}^2}{2 \cdot a_y} \right)}{V_{ДОП}} \quad (8)$$

Для определения T_{MIN} при $L_{ДОП} \leq 0$ запишем уравнение движения поезда (9):

$$L'_{П} = V_{\Phi} \cdot T_{MIN} + \frac{a_y \cdot T_{MIN}^2}{2} \quad (9)$$

Решение квадратного уравнения (9) относительно T_{MIN} позволяет получить соотношение (10):

$$T_{MIN} = -\frac{V_{\Phi}}{a_y} + \sqrt{\left(\frac{V_{\Phi}}{a_y} \right)^2 - \frac{2 \cdot L'_{П}}{a_y}} \quad (10)$$

Момент времени достижения поездом регулируемого железнодорожного переезда $t_{П}$ может быть вычислен по формуле (11):

$$t_{П} = t_{мек} + T_{MIN} + T_{СР}, \quad (11)$$

где $t_{мек}$ – текущее время,

$T_{СР}$ – время срабатывания заградительных устройств переезда (заградительные светофоры, устройства заградительные поездные (УЗП), шлагбаумы).

По вычислении момента времени достижения поездом регулируемого железнодорожного переезда обрабатывается следующий сценарий:

- рассчитанный момент времени достижения поездом регулируемого железнодорожного переезда сравнивается с нормативным временем извещения о приближении поезда к переезду. Если рассчитанное время не превышает или равно нормативному значению, то переезд закрывается;
- если рассчитанный момент времени достижения поездом регулируемого железнодорожного переезда превышает нормативное значение времени, необходимого для извещения о приближении поезда к переезду, то переезд остается открытым;
- управление УЗП осуществляется штатным, установленным порядком: включение переездных светофоров, опускание шлагбаумов, перекрытие движения автотранспорта посредством УЗП.

Определим численно выигрыш времени, необходимого для закрытия регулируемого железнодорожного переезда при применении адаптивного закрытия переезда $\Delta_{ПЕР}$ в сравнении с переездом, использующим традиционные методы контроля приближения поезда (контроль занятости рельсовых цепей, метод счета осей). Согласно методическим указаниям по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте И-276-00 [17] рассматривается регулируемый железнодорожный переезд со следующими параметрами:

- длина $l_{ПЕР} = 30$ м,
- время извещения о приближении поезда $t_C = 38,6$ с,
- расчетная длина участка извещения $l^P = 1499$ м,
- допустимая скорость движения поезда 140 км/ч,
- перегон с электрической тяга $a_y = 0,8$ м/с².

При использовании формул (1)–(11) в электронных таблицах Microsoft Office Excel выполнены расчеты, сведенные в таблицу.

В качестве параметров расчетов использованы значения возможной фактической скорости движения поезда V_{Φ} , км/ч от 20 км/ч до 120 км/ч с шагом 5 км/ч. В результате расчета получены значения минимального времени хода поезда до момента достижения им регулируемого железнодорожного переезда (T_{MIN}), а также разность между значением величины T_{MIN} и значением времени хода поезда до момента достижения им регулируемого железнодорожного переезда при скорости 140 км/ч (T_{140}). Эта величина обозначена в таблице как $\Delta_{ПЕР}$, она означает сколько дополнительного времени можно предоставить автотранспорту для передвижения по переезду, сохраняя при этом безопасность движения, и является основным критерием повышения качества функционирования алгоритма адаптации времени закрытия переезда. В крайнем правом столбце таблицы приведено относительное значение

критерия повышения качества функционирования алгоритма адаптации времени закрытия переезда $\sigma_{ПЕР}$, которое определяется по формуле (12).

$$\sigma_{ПЕР} = \frac{(T_{140} - T_{MIN})}{T_{140}} \cdot 100 \% \quad (12)$$

Также в таблице представлено усредненное значение относительного значения критерия повышения качества функционирования алгоритма адаптации времени закрытия переезда $\sigma_{СР}$, которое рассчитывается, как сумма всех найденных значений $\sigma_{ПЕР}$, разделенных на их количество.

Относительная оценка повышения качества функционирования регулируемого железнодорожного переезда при применении адаптивного регулирования времени закрытия

$V_{\Phi}, \text{км/ч}$	$V_{ДОП}, \text{км/ч}$	T_{MIN}	$\Delta_{ПЕР}$	$\sigma_{ПЕР}$
20	140	56,7	18,1	47
25	140	55,8	17,2	45
30	140	54,9	16,3	43
35	140	54,1	15,5	41
40	140	53,2	14,6	38
45	140	52,3	13,7	36
50	140	51,4	12,8	34
55	140	50,6	12	32
60	140	49,7	11,1	29
65	140	48,8	10,2	27
70	140	48	9,4	25
75	140	47,1	8,5	23
80	140	46,2	7,6	20
85	140	45,4	6,8	18
90	140	44,5	5,9	16
95	140	43,6	5	13
100	140	42,8	4,2	11
105	140	41,9	3,3	9
110	140	41	2,4	7
115	140	40,2	1,6	5
120	140	39,3	0,7	2
				$\sigma_{СР} = 22\%$

График функциональной зависимости расчетного времени хода поезда до момента достижения регулируемого железнодорожного переезда при движении с допустимой скоростью в 140 км/ч от скорости начала движения по участку начала оповещения о приближении к регулируемому железнодорожному переезду представлен на рис. 2.

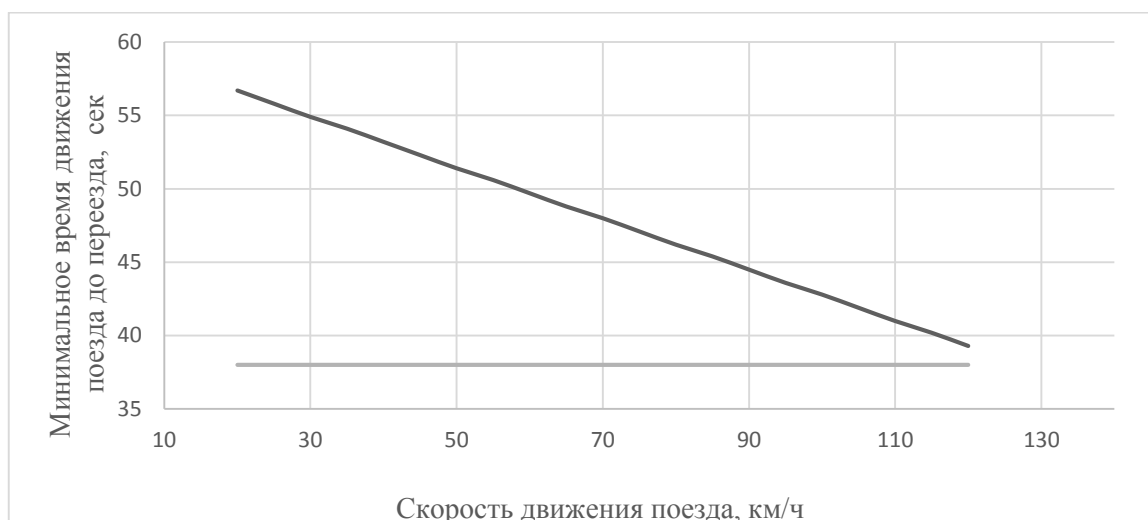


Рис. 2. Зависимость минимального времени хода поезда до переезда от его скорости

Из рис. 2 видно, что при скоростях от 20 до 120 км/ч минимальное время движения поезда до переезда (верхняя прямая) при применении адаптивного закрытия переезда превышает расчетное время для переезда, использующего традиционные методы контроля приближения поезда (нижняя прямая). То есть переезд при применении традиционных технологий будет закрыт значительно дольше, чем этого требует обеспечение безопасности движения автотранспорта и поезда. Результаты расчетов, приведенные в таблице, показывают, что расчетное время движения поезда при интеллектуальном адаптивном закрытии в среднем больше на 22 % при обеспечении безопасности движения автотранспорта через переезд.

Алгоритм адаптивного закрытия регулируемого железнодорожного переезда

При подходе к участку приближения локомотивное устройство передает на стационарное устройство по радиоканалу информацию о своей координате, скорости движения, и времени передачи сообщения.

Стационарное устройство, в свою очередь, используя принятые параметры, рассчитывает T_{MIN} – минимальное время, за которое поезд доедет до переезда с помощью формул (1)–(11), сравнивает его с рассчитанным временем извещения t_C для переезда, использующего традиционные методы контроля приближения поезда. Если $T_{MIN} > t_C$, то запускается счетчик времени и при $T_{MIN} + T_{СЧЕТ} \leq t_C$ ($T_{СЧЕТ}$ – время счетчика), запускается механизм закрытия переезда. Иллюстрация алгоритма представлена на рис. 3.

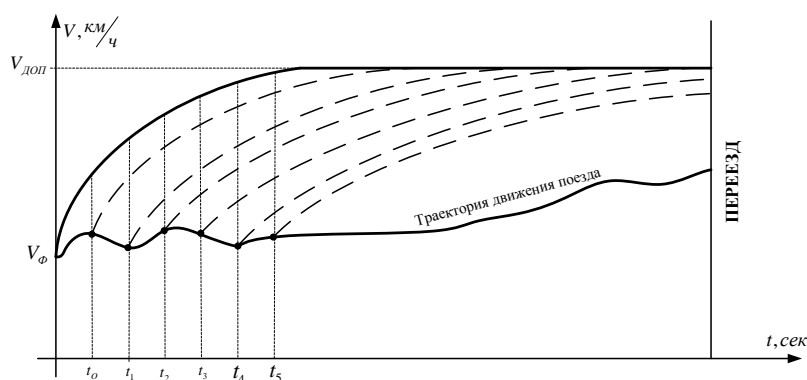


Рис. 3. Иллюстрация способа адаптивного закрытия переезда

После получения от локомотива следующего сообщения значение T_{MIN} пересчитывается для новых параметров, и в случае выполнения условия $T_{MIN} > t_C$ алгоритм, описанный выше, повторяется.

В настоящее время проводятся различные исследования и создаются разработки, которые направлены на совершенствование автоматической переездной сигнализации [18–20], однако данные

исследования направлены на совершенствование самих устройств АПС без их взаимодействия с бортовыми устройствами. В данной статье представлена методика повышения качества функционирования переезда за счет взаимодействия с бортовыми устройствами обеспечения безопасности по цифровому радиоканалу передачи данных.

Выводы

Представленные выше расчеты показывают, что время движения автотранспорта через регулируемый железнодорожный переезд может быть увеличено в среднем на 22 % при внедрении адаптации времени его закрытия с сохранением уровня безопасности движения автотранспорта.

Применение методики позволит повысить эффективность работы сценариев управления движением транспортными средствами, а также объектами железнодорожной инфраструктуры при ее совместном внедрении с ИТС.

Список литературы

1 **Розенберг, Е. Н.** Концепция развития интеллектуальных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов / Е. Н. Розенберг, В. Г. Новиков // Интеллектуальные транспортные системы : материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 года. – Москва : РУТ (МИИТ), 2025. – С. 376–383. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-376-383.

2 **Ермакова, А. Е.** Принципы построения и функционирования современных интеллектуальных систем управления автомобильным транспортом без участия оператора / А. Е. Ермакова, И. С. Иконников, А. И. Сафронов // Интеллектуальные транспортные системы : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. – Москва : РУТ (МИИТ), 2024. – С. 118–122. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-118-122.

3 **Патент № 2791353 C1 Российская Федерация, МПК B61L 27/04, B61L 27/60.** Интеллектуальный комплекс управления перевозочным процессом городской рельсовой транспортной системы (ГРТС) : № 2022113881 : заявл. 24.05.2022 : опубл. 07.03.2023 / Е. П. Балакина, Л. А. Баранов, А. В. Ершов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта». – EDN FUBFXG.

4 **Баранов, Л. А.** Особенности автоматизированного планирования движения поездов в интеллектуальных системах управления внеуличного городского транспорта в условиях интенсивного движения / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. – Москва : РУТ, 2022. – С. 59–70. – EDN GTPSTP.

References

1 **Rosenberg, E. N.** Concept of development of intelligent control systems and ensuring safety of train traffic / E. N. Rosenberg, V. G. Novikov // Intelligent transport systems : proceedings of the IV International scientific and practical conference, Moscow, May 22, 2025. – Moscow : RUT (MIIT), 2025. – P. 376–383. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-376-383.

2 **Ermakova, A. E.** Principles of construction and operation of modern intelligent control systems for road transport without operator participation / A. E. Ermakova, I. S. Ikonnikov, A. I. Safronov // Intelligent transport systems : proceedings of the III International scientific and practical conference, Moscow, May 30, 2024. – Moscow : RUT (MIIT), 2024. – P. 118–122. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-118-122.

3 **Patent No. 2791353 C1 Russian Federation, IPC B61L 27/04, B61L 27/60.** Intelligent complex for controlling the transportation process of the urban rail transport system (GRTS) : No. 2022113881 : declared 24.05.2022 : published 07.03.2023 / E. P. Balakina, L. A. Baranov, A. V. Ershov [et al.] ; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport". – EDN FUBFXG.

4 **Baranov, L. A.** Features of automated train movement planning in intelligent control systems for off-street urban transport under heavy traffic conditions / L. A. Baranov, V. G. Sidorenko, A. I. Safronov // Intelligent Transport Systems : proceedings of the International scientific and practical conference, Moscow, May 26, 2022. – Moscow : RUT, 2022. – P. 59–70. – EDN GTPSTP.

5 Комплексная технология интервального регулирования движения поездов / С. А. Кобзев, Е. Н. Розенберг [и др.]. – Москва : Т8 Издательские технологии, 2023. – 216 с. – ISBN 978-5-521-23792-0.

6 **Евтеев, Д. В.** Система интервального регулирования движения поездов с подвижными блок-участками / Д. В. Евтеев, В. Г. Новиков // Интеллектуальные транспортные системы : материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 года. – Москва : РУТ (МИИТ), 2025. – С. 526–531. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-526-531.

7 **Розенберг, Е. Н.** Применение технологии виртуальной сцепки на восточном полигоне / Е. Н. Розенберг, М. А. Дежков, В. Г. Новиков // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 8. – С. 7–11. – DOI 10.62994/AT.2025.8.8.002.

8 **Новиков, В. Г.** Повышение пропускной способности участков метрополитена за счет применения цифрового радиоканала и инфракрасного канала передачи данных / В. Г. Новиков, Л. Н. Логинова // Наука и техника транспорта. – 2023. – № 4. – С. 30–36. – ISSN 2074-9325.

9 **Новиков, В. Г.** Обеспечение безопасности движения поездов при координатном способе интервального регулирования / В. Г. Новиков // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Материалы XXXII международной конференции, посвященной памяти Владимира Васильевича Кульбы, заслуженного деятеля науки РФ, д-ра техн. наук, профессора, Москва, 13 ноября 2024 года. – Москва : ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. – 2024. – С. 369–379. – ISBN 978-5-91450-277-2.

10 **Новиков, В. Г.** Обеспечение безопасности движения поездов при координатном способе интервального регулирования / В. Г. Новиков // Проблемы управления безопасностью сложных систем : Материалы XXXII международной конференции, посвященной памяти Владимира Васильевича Кульбы, Заслуженного деятеля науки РФ, д-ра техн. наук, профессора, Москва, 13 ноября 2024 года. – Москва : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. – С. 369–379. – EDN IMULAZ.

11 **Михалевич, И. Ф.** Средства индивидуальной мобильности в системе субъекто-объектных отношений безопасности / И. Ф. Михалевич, И. А. Жеребятин // Интеллектуальные транспортные системы : материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 года. – Москва : РУТ

5 Integrated technology for interval control of train traffic / S. A. Kobzev, E. N. Rozenberg, V. A. Voronin [et al.]. – Moscow : T8 Publishing Technologies, 2023. – 216 p. – ISBN 978-5-521-23792-0.

6 **Evteev, D. V.** System for interval control of train traffic with movable block sections / D. V. Evteev, V. G. Novikov // Intelligent transport systems : proceedings of the IV International scientific and practical conference, Moscow, May 22, 2025. – Moscow : RUT (MIIT), 2025. – P. 526–531. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-526-531.

7 **Rosenberg, E. N.** Application of virtual coupling technology on the eastern testing ground / E. N. Rosenberg, M. A. Dezhkov, V. G. Novikov // Automation, communication, informatics. – 2025. – No. 8. – P. 7–11. – DOI 10.62994/AT.2025.8.8.002.

8 **Novikov, V. G.** Increasing the throughput of metro sections through the use of a digital radio channel and an infrared data transmission channel / V. G. Novikov, L. N. Loginova // Science and technology of transport. – 2023. – No. 4. – P. 30–36. – ISSN 2074-9325.

9 **Novikov, V. G.** Ensuring the safety of train traffic with the coordinate method of interval control / V. G. Novikov // Problems of safety management of complex systems : proceedings of the XXXII International conference dedicated to the memory of Vladimir Vasilyevich Kulba, honored scientist of the Russian Federation, Doctor of Engineering Sciences, professor, Moscow, November 13, 2024. – Moscow : V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. – 2024. – P. 369–379. – ISBN 978-5-91450-277-2.

10 **Novikov, V. G.** Ensuring train traffic safety with the coordinate method of interval regulation / V. G. Novikov // Problems of complex systems safety management : proceedings of the XXXII International conference dedicated to the memory of Vladimir Vasilyevich Kulba, honored scientist of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor, Moscow, November 13, 2024. – Moscow : V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2024. – P. 369–379. – EDN IMULAZ.

11 **Mikhalevich, I. F.** Individual mobility devices in the system of subject-object safety relations / I. F. Mikhalevich, I. A. Zherebyatin // Intelligent transport systems : proceedings of the IV International scientific and practical conference, Moscow, May 22, 2025. – Moscow : RUT (MIIT), 2025. – P. 660–666. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-660-666.

(МИИТ). – 2025. – С. 660–666. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-660-666.

12 **Лисюк, Я. В.** К вопросу об организации движения на железнодорожных переездах и разделении переездов на категории / Я. В. Лисюк, К. Е. Деменюк, Г. Г. Ахмедзянов // Молодой ученый. – 2022. – № 13(408). – С. 12–14. – ISSN 2072-0297.

13 **Галинуров, Р. З.** Повышение эффективности функционирования железнодорожного переезда : специальность 29.40.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Галинуров Ришат Зинфирович. – Екатеринбург, 2022. – 210 с.

14 **Третьяков, Г. М.** Интеллектуальный алгоритм автоматизированного управления переездной сигнализацией / Г. М. Третьяков, А. Е. Тарасова, Е. М. Тарасов // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 29–34. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_29.

15 Условия эксплуатации железнодорожных переездов. Утвержденные приказом Министерства транспорта РФ от 5 октября 2022 г. N 402 «Об утверждении Условий эксплуатации железнодорожных переездов» // Гарант. Информационно-правовое обеспечение. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406179331/> (дата обращения: 15.10.2025).

16 **Гуляев, Д. М.** Повышение пропускной способности железнодорожного переезда посредством адаптации времени закрытия / Д. М. Гуляев // Интеллектуальные транспортные системы : материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 года. – Москва : РУТ (МИИТ), 2025. – С. 512–516. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-512-516.

17 **I-276-00.** Методические указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. Расчет параметров работы переездной сигнализации. Утверждены Министерством путей сообщения РФ письмом № ЦШТех-11/58 от 05.11.2000 // Documentation. – URL: <https://scbist.com/scb/mu/I-276-00.pdf> (дата обращения: 15.10.2025).

18 **Кириллов, А. Н.** Автоматическая переездная сигнализация / А. Н. Кириллов // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 7. – С. 5–8. – DOI 10.62994/AT.2025.7.7.002.

19 **Кочетов, А. С.** Перспективные инновационные безопасные железнодорожные переезды с высокой пропускной способностью / А. С. Кочетов, Л. М. Липсиц // История и перспективы развития транспорта на севере России. – 2017. – № 1. – С. 100–104. – EDN YSTAVR.

12 **Lisyuk, Ya. V.** On the issue of organizing traffic at level crossings and dividing crossings into categories / Ya. V. Lisyuk, K. E. Demenyuk, G. G. Akhmedzyanov // Young scientist. – 2022. – No. 13 (408). – P. 12–14. – ISSN 2072-0297.

13 **Galinurov, R. Z.** Improving the efficiency of railway crossing operation : specialty 29.40.00 : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Galinurov Rishat Zinfirovich. – Yekaterinburg, 2022. – 210 p.

14 **Tretyakov, G. M.** Intelligent algorithm for automated control of level crossing signaling / G. M. Tretyakov, A. E. Tarasova, E. M. Tarasov // Electrical Engineering. – 2023. – No. 10. – P. 29–34. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_29.

15 Operating conditions of railway crossings. Approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated October 5, 2022 N 402 "On Approval of the Operating Conditions of Railway Crossings" // Garant. Information and legal support. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406179331/> (date of access: 15.10.2025).

16 **Gulyaev, D. M.** Increasing the capacity of a railway crossing by adapting the closing time / D. M. Gulyaev // Intelligent transport systems : proceedings of the IV International scientific and practical conference, Moscow, May 22, 2025. – Moscow : RUT (MIIT), 2025. – P. 512–516. – DOI 10.30932/9785002587582-2025-512-516.

17 **I-276-00.** Methodological guidelines for the design of automatic, telemechanics, and communication devices in railway transport. Calculation of operating parameters of level crossing signaling. Approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation by letter No. TsShTekh-11/58 dated 05.11.2000 // Documentation. – URL: <https://scbist.com/scb/mu/I-276-00.pdf> (date of access 15.10.2025).

18 **Kirillov, A. N.** Automatic crossing signalling / A. N. Kirillov // Automation, Communications, Informatics. – 2025. – No. 7. – P. 5–8. – DOI 10.62994/AT.2025.7.7.002.

19 **Kochetov, A. S.** Promising innovative safe railway crossings with high capacity / A. S. Kochetov, L. M. Lipsits // History and prospects of transport development in Northern Russia. – 2017. – No. 1. – P. 100–104. – EDN YSTAVR.

20 **Хорощенко, А. А.** Умная логистика – умный переезд / А. А. Хорощенко // Актуальные проблемы транспорта в XXI веке : труды III Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 27–28 марта 2024 года. – Новокузнецк : Сибирский государственный индустриальный университет, 2024. – С. 148–151. – EDN YDBEKI.

20 **Khoroshchenko, A. A.** Smart logistics – a smart crossing / A. A. Khoroshchenko // Actual problems of transport in the 21st century : proceedings of the III International scientific and practical conference, Novokuznetsk, March 27–28, 2024. – Novokuznetsk : Siberian State Industrial University, 2024. – P. 148–151. – EDN YDBEKI.

V. G. Novikov, A. I. Safronov, M. A. Beschastny

INCREASING THE CAPACITY OF MOTOR TRANSPORT SECTIONS BY ADAPTING THE CLOSING TIME OF A REGULATED RAILWAY CROSSING

Abstract. The growing volume of traffic necessitates the improvement of train control systems and safety measures. The application of the principles and methods implemented by the train control and safety systems using the digital radio data transmission channel contributes to the improvement of the train traffic safety level, as well as the capacity of the transport routes. One of such methods, among many known today, is the adaptive closure of the railway crossing by changing the length of the section of the traffic participants' notification of the train approach to the crossing, which allows to ensure the safe movement of motor vehicles through the railway crossing with the minimum allowable time of notification of the train approach.

Keywords: train traffic safety systems, control systems, railway crossings, capacity, adaptive closure of crossings, digital radio data transmission channel, automatic crossing signaling.

For citation: Novikov, V. G. Increasing the capacity of motor transport sections by adapting the closing time of a regulated railway crossing / V. G. Novikov, A. I. Safronov, M. A. Beschastny // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 151–160. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_151.

Сведения об авторах

Новиков Вячеслав Геннадьевич

Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации» и «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», кандидат технических наук, доцент, e-mail: 9268888805@mail.ru

Сафронов Антон Игоревич

Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации», кандидат технических наук, доцент, e-mail: safronov-ai@mail.ru

Бесчастный Михаил Александрович

Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации», кандидат технических наук, доцент, e-mail: schastlivyy.mikhail@gmail.com

Information about the authors

Novikov Vyacheslav Gennadievich

Russian University of Transport (MIIT), Chair “Information Management and Security” and “Automation, Telemechanics, and Communications in Railway Transport”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: 9268888805@mail.ru

Safronov Anton Igorevich

Russian University of Transport (MIIT), Chair “Information Management and Security”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: safronov-ai@mail.ru

Beschastny Mikhail Alexandrovich

Russian University of Transport (MIIT), Chair “Information Management and Security”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: schastlivyy.mikhail@gmail.com

Е. Н. Розенберг, В. С. Кузьмин, А. В. Озеров

ОБ УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПАСНЫХ ОТКАЗОВ В НЕОГРАНИЧЕННЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ С ЛОКОМОТИВНЫМ ПРИЕМНИКОМ В ШУНТОВОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Аннотация. Полноценное решение задачи определения пространственных координат единиц тягового подвижного состава основными устройствами безопасности на основе анализа сигналов автоматической локомотивной сигнализации в современных системах регулирования движения поездов на базе неограниченных рельсовых цепей невозможно без установления условий возникновения опасных отказов в шунтовом режиме работы. Это имеет важное прикладное значение, поскольку наряду с получением несоответствующей поездной ситуации приказа разрешения на движение основные устройства безопасности не будут иметь возможности уточнять пространственные координаты единицы тягового подвижного состава в границах рассматриваемой рельсовой цепи по сигналам, принимаемым из рельсовой линии. В статье на основе математического аппарата теории рельсовых цепей с использованием метода четырехполюсников получены основные расчетные выражения для определения величины поездного критерия по безопасности для шунтового режима работы. Получена характерная зависимость, позволяющая судить о протяженности опасной зоны при наихудших условиях для неограниченных рельсовых цепей с локомотивным приемником. Полученные результаты являются основой для формирования алгоритмов работы перспективной системы регулирования движения поездов без путевых приемников.

Ключевые слова: рельсовая цепь, основные устройства безопасности, локомотивный приемник, шунтовой режим работы, опасный отказ, ложная свободность, двойное шунтирование, пространственные координаты, позиционирование.

Для цитирования: Розенберг, Е. Н. Об условиях возникновения опасных отказов в неограниченных рельсовых цепях с локомотивным приемником в шунтовом режиме работы / Е. Н. Розенберг, В. С. Кузьмин, А. В. Озеров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 161–167. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_161.

Введение

Определение пространственных координат единиц тягового подвижного состава является одним из важнейших этапов при реализации ответственного технологического процесса регулирования движения поездов. Его осуществление в современных системах возложено как на напольную аппаратуру, так и на основные локомотивные устройства безопасности. При этом в настоящее время ведется разработка новых способов определения пространственных координат в границах эксплуатационной длины отдельной рельсовой цепи как на основе анализа изменения входного сопротивления рельсовой линии [1], так и с использованием бортовых средств регистрации силы тока, протекающего в первой колесной паре единицы тягового подвижного состава [2]. Следует отметить, что разработка новых методов связана с потребностью в обеспечении систем регулирования движением поездов точными сведениями о пространственных координатах единиц тягового подвижного состава, в том числе в условиях действия средств радиоэлектронной борьбы [3].

Параллельно с указанными выше способами развивается направление, в рамках которого предложено определять пространственные координаты единиц тягового подвижного состава на основе анализа уровня сигнала автоматической локомотивной сигнализации. При этом указанный анализ могут выполнять штатные микропроцессорные основные локомотивные устройства безопасности, а уточнение пространственных координат на значительном удалении от питающего конца рельсовой цепи при необходимости может быть реализовано на основе комплексирования с данными от датчика пути и скорости.

В рамках данного направления существенный интерес представляет решение задачи установления условий возникновения опасных отказов в шунтовом режиме работы, поскольку они способны приводить не только к получению более разрешающего сигнала, но и к искажению сведений о пространственных координатах. С учетом этого в качестве цели настоящей работы выбрана разработка

математического аппарата для анализа условий возникновения опасных отказов в шунтовом режиме работы неограниченных рельсовых цепей с локомотивным приемником.

Материалы и методы

Для определения условий возникновения опасных отказов используется математический аппарат теории рельсовых цепей на базе метода четырехполюсников. При этом рассматривается перспективная система регулирования движения поездов без путевых приемников. В качестве поездного критерия по безопасности рассматривается общепринятый критерий $k_{ЛШН}$ [4, 5], рассчитываемый по формуле (1):

$$k_{ЛШН} = \frac{|Z_{ЛПОШН}|}{N_A |Z_{ЛПО}|} \quad (1)$$

где $|Z_{ЛПОШН}|$ – модуль комплексного сопротивления передачи основной схемы замещения рельсовой цепи с локомотивным приемником в шунтовом режиме при неблагоприятных условиях;

$|Z_{ЛПО}|$ – модуль комплексного сопротивления передачи основной схемы замещения рельсовой цепи с локомотивным приемником в нормальном режиме работы при неблагоприятных условиях;

N_A – аппаратный коэффициент, учитывающий разброс параметров аппаратуры и колебания напряжения источника питания рассматриваемой рельсовой цепи.

Для расчета величин модулей указанных комплексных сопротивлений следует рассмотреть поездные ситуации, соответствующие нормальному (показана на рис. 1, а) и шунтовому режиму работы данной рельсовой цепи (рис. 1, б).

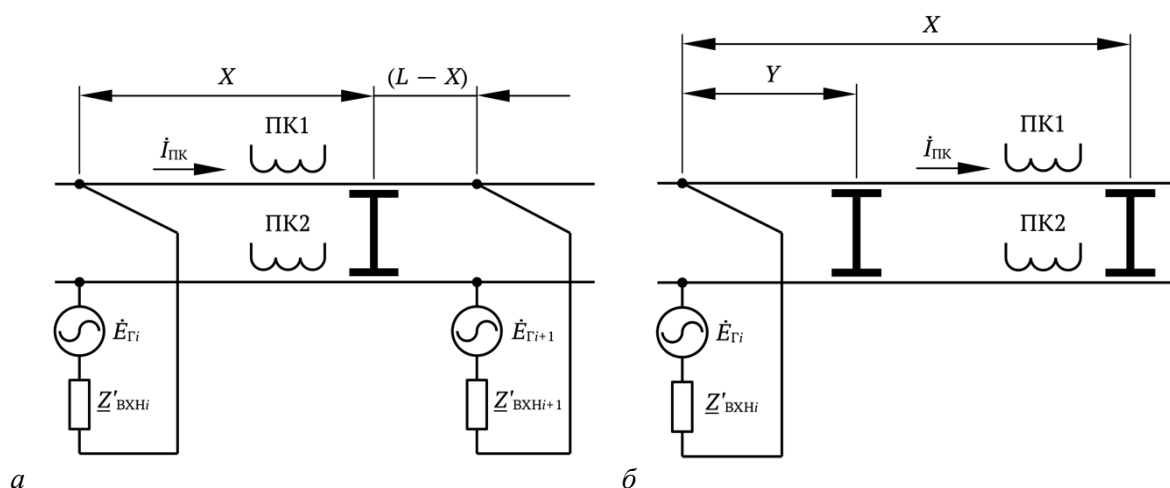


Рис. 1. Поездная ситуация:

а – в нормальном режиме работы рельсовой цепи;

б – в шунтовом режиме работы рельсовой цепи

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$\dot{E}_{Гi}$ – комплексное значение напряжения, эквивалентное питающему элементу рельсовой цепи i ;

$\dot{E}_{Гi+1}$ – комплексное значение напряжения, эквивалентное питающему элементу рельсовой цепи $i + 1$;

$Z'_{ВХi}$ – обратное (со стороны рельсовой линии) входное сопротивление аппаратуры питающего конца рельсовой цепи i ;

$Z'_{ВХi+1}$ – обратное (со стороны рельсовой линии) входное сопротивление аппаратуры питающего конца рельсовой цепи $i + 1$;

$\dot{I}_{ПК}$ – комплексный ток автоматической локомотивной сигнализации под приемными катушками рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

ПК1, ПК2 – приемные катушки рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

X – ордината рассматриваемой единицы тягового подвижного состава (поездного шунта) относительно точки подключения аппаратуры питающего конца рельсовой цепи;

Y – ордината единицы тягового подвижного состава (поездного шунта), являющейся переменным препятствием, относительно точки подключения аппаратуры питающего конца рельсовой цепи;

L – расстояние между точками подключения аппаратуры питающих концов смежных рельсовых цепей (конструктивная длина рельсовой цепи i).

Результаты и обсуждения

С учетом особенностей рассматриваемых поездных ситуаций были составлены схемы замещения (рис. 2). При этом для шунтового режима работы (рис. 2, б) схема составлена с учетом наихудших условий, указанных в [5]. На схемах рис. 2 дополнительно приняты следующие обозначения:

ЧП АПК РЦ i – четырехполюсник аппаратуры питающего конца рельсовой цепи i с локомотивным приемником с параметрами A_H, B_H, C_H, D_H ;

ЧП РЛ НРР X – четырехполюсник рельсовой линии между точками подключения аппаратуры питающего конца рассматриваемой рельсовой цепи и наложения поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

ЧП РЛ НРР $(L - X)$ – четырехполюсник рельсовой линии между точками наложения поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава и подключения аппаратуры питающего конца смежной рельсовой цепи;

ЧП РЛ ШРР – четырехполюсник рельсовой линии в шунтовом режиме работы;

Z_B – волновое сопротивление рельсовой линии (в т. ч. смежной);

γ – коэффициент распространения волны в линии;

$Z_{ш}$ – сопротивление поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

$Z'_{ш}$ – сопротивление поездного шунта единицы тягового подвижного состава, являющейся переменным препятствием (принято равным нормативному).

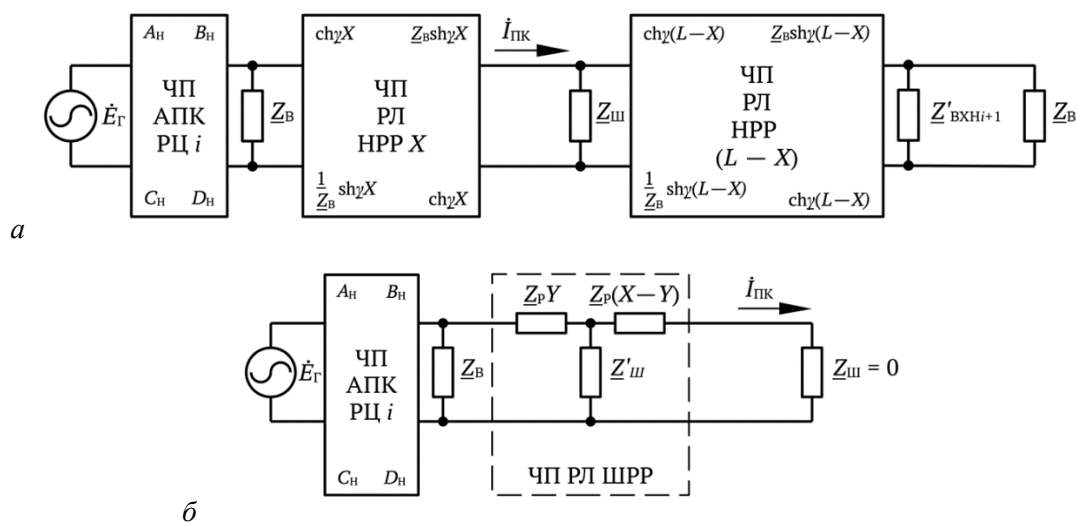


Рис. 2. Схемы замещения для рассматриваемых ситуаций:

а – в нормальном режиме работы; б – в шунтовом режиме работы

Для определения условий возникновения опасных отказов в рельсовых цепях с локомотивным приемником при наихудших условиях в шунтовом режиме работы на основе схем замещения, приведенных на рис. 2, а и б, были получены расчетные выражения для величин комплексных сопротивлений $Z_{ЛПО}$ (2) и $Z_{ЛПОшн}$ (3):

$$Z_{ЛПО} = \underline{B}_{АЛС НРР} + \underline{Z}'_{ВХН} \underline{D}_{АЛС НРР}, \quad (2)$$

где $\underline{B}_{АЛС НРР} = \underline{K}_1 \underline{K}_3 + \underline{B}_H \underline{K}_4$,

$$\underline{D}_{АЛС НРР} = \underline{K}_2 \underline{K}_3 + \underline{D}_H \underline{K}_4,$$

$$\underline{K}_1 = \underline{A}_H + \frac{\underline{B}_H}{\underline{Z}_B},$$

$$\underline{K}_2 = \underline{C}_H + \frac{\underline{D}_H}{\underline{Z}_B},$$

$$K_3 = Z_B \text{sh} \gamma X_{\text{ш}},$$

$$K_4 = \text{ch} \gamma X_{\text{ш}},$$

$$Z_{\text{ЛПОШН}} = B_{\text{АЛС ШРР}} + Z'_{\text{ВХН}} D_{\text{АЛС ШРР}}, \quad (3)$$

$$\text{где } B_{\text{АЛС ШРР}} = H_1 H_3 + B_{\text{Н}} H_4,$$

$$D_{\text{АЛС ШРР}} = H_2 H_3 + D_{\text{Н}} H_4,$$

$$H_1 = A_{\text{Н}} + \frac{B_{\text{Н}}}{Z_{\text{В}}},$$

$$H_2 = C_{\text{Н}} + \frac{D_{\text{Н}}}{Z_{\text{В}}},$$

$$H_3 = \left[1 + \frac{Z_{\text{Р}} Y}{Z'_{\text{ш}}} \right] Z_{\text{Р}} (X - Y) + Z_{\text{Р}} Y,$$

$$H_4 = 1 + \frac{Z_{\text{Р}} (X - Y)}{Z'_{\text{ш}}}.$$

Представленные выражения составлены с учетом следующих ограничений и допущений:

- рельсовая линия представляет собой однородную длинную линию;
- приемные катушки единицы тягового подвижного состава размещаются одинаково относительно осей соответствующих ходовых рельсов и имеют одинаковые электрические параметры.

С учетом полученных выражений было выполнено моделирование зависимости величины поездного критерия по безопасности $k_{\text{ЛШН}}$ от взаимного расположения в границах конструктивной длины в границах конструктивной длины ординат наложения поездных шунтов, являющихся переменным препятствием Y и рассматриваемой единицей тягового подвижного состава X (рис. 3). В рамках моделирования рассматривалась рельсовая цепь с несущей частотой 25 Гц с конструктивной длиной 2,6 км.

Согласно полученным результатам моделирования величина поездного критерия по безопасности $k_{\text{ЛШН}}$ для шунтового режима работы рельсовой цепи с локомотивным приемником по мере приближения к неподвижному локомотивному приемнику ординаты Y наложения поездного шунта, являющегося переменным препятствием, линейно убывает. С уменьшением ординаты наложения поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава величина $k_{\text{ЛШН}}$ снижается при неизменной ординате наложения шунта, являющегося переменным препятствием.

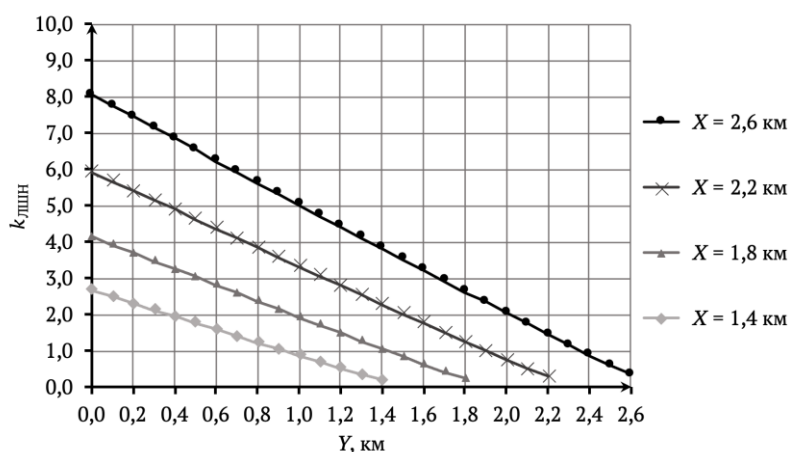


Рис. 3. Зависимость величины поездного критерия по безопасности $k_{\text{ЛШН}}$ от ординаты Y места наложения поездного шунта, являющегося переменным препятствием, при различных ординатах X местоположения рассматриваемой единицы тягового подвижного состава

При движении единицы тягового подвижного состава вдоль рельсовой линии и фиксированных значениях ординаты Y наложения поездного шунта, рассматриваемого как переменное препятствие, наблюдается постепенное снижение величины поездного критерия по безопасности $k_{\text{ЛШН}}$ для шунтового режима работы рельсовой цепи с локомотивным приемником (рис. 4).

Наибольший интерес представляют максимальная величина протяженности опасной зоны $L_{ОШ}$, возникающей за переменным препятствием в виде поездного шунта перед движущимся вдоль рельсовой линии локомотивным приемником, и соответствующая зависимость от ординаты Y места наложения поездного шунта, рассматриваемого как переменное препятствие (рис. 5). По результатам моделирования максимальная протяженность опасной зоны $L_{ОШ}$ составляет 765 м и достигается при наложении поездного шунта, являющегося переменным препятствием, на питающем конце соответствующей рельсовой цепи.

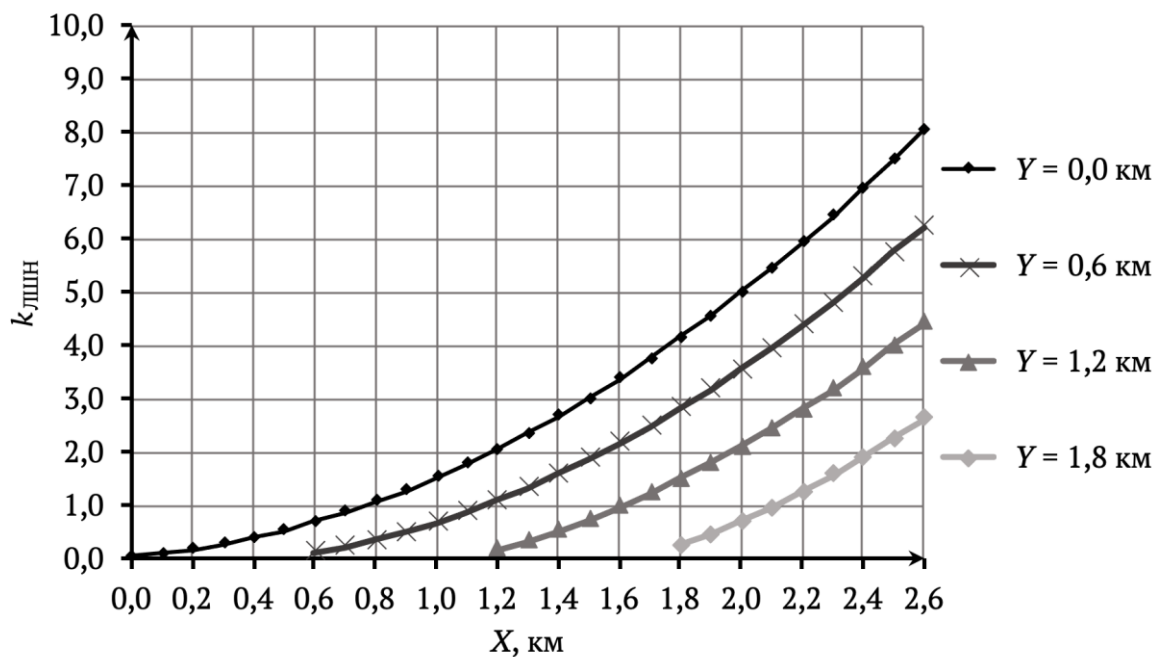


Рис. 4. Зависимость величины поездного критерия по безопасности $k_{лпшн}$ от ординаты X рассматриваемой единицы тягового подвижного состава при различных ординатах Y места наложения поездного шунта, являющегося переменным препятствием

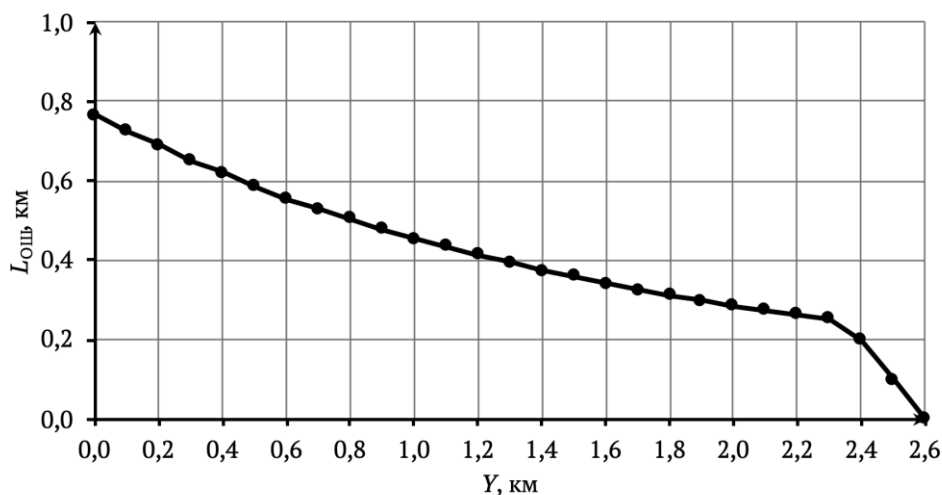


Рис. 5. Зависимость протяженности опасной зоны $L_{ОШ}$ от ординаты Y места наложения поездного шунта, рассматриваемого как переменное препятствие

Для парирования опасных отказов, связанных с движением единицы тягового подвижного состава в границах опасной зоны $L_{ОШ}$, возможно использовать данные о пройденном пути, получаемые из других источников, в частности от датчика угла поворота.

Заключение

В рамках статьи представлены результаты разработки математического аппарата для анализа условий возникновения опасных отказов в шунтовом режиме работы неограниченных рельсовых цепей с локомотивным приемником. Получены следующие основные результаты:

1 Результаты моделирования позволяют утверждать, что при наихудших условиях в неограниченных рельсовых цепях с локомотивным приемником имеет место эффект двойного шунтирования. При этом величины поездного критерия по безопасности $k_{\text{ЛШН}}$ и протяженности $L_{\text{ОШ}}$ опасной зоны существенно зависят от взаимного расположения поездных шунтов, соответствующих переменному препятствию и рассматриваемой единице тягового подвижного состава.

2 Наибольшая протяженность $L_{\text{ОШ}}$ опасной зоны достигается при наложении поездного шунта, соответствующего переменному препятствию, на питающем конце рассматриваемой рельсовой цепи и составляет 765 м. С увеличением ординаты наложения поездного шунта, соответствующего переменному препятствию, протяженность $L_{\text{ОШ}}$ опасной зоны сокращается.

3 Опасные отказы, связанные с возникновением эффекта двойного шунтирования, могут быть парированы за счет комплексирования данных, получаемых основными устройствами безопасности по результатам анализа сигналов автоматической локомотивной сигнализации, с данными от других источников, в частности от датчика угла поворота.

Полученные результаты являются основой для создания новых систем регулирования движения поездов без путевых приемников на базе современных микропроцессорных локомотивных устройств безопасности. Дополнительные исследования в данной области следует сосредоточить вокруг рассмотрения ситуации, когда поездной шунт, соответствующий переменному препятствию, располагается в зоне дополнительного шунтирования со стороны питающего конца рассматриваемой рельсовой цепи.

Список литературы

- 1 **Соколов, М. М.** Использование входного сопротивления путевого участка для позиционирования подвижной единицы / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 9. – С. 15–17. – DOI 10.62994/AT.2025.9.9.001.
- 2 **Соколов, С. В.** Решение задачи автономного высокоточного позиционирования железнодорожных подвижных единиц на основе измерения рельсовых токов / С. В. Соколов, Д. В. Швалов // Автоматика на транспорте. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 201–209. – DOI 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209.
- 3 Определение местоположения поезда в условиях работы систем РЭБ / О. Ю. Куприенко, В. В. Батраев, С. В. Маршов, С. В. Ипатов // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 7. – С. 36–39. – ISSN 0044-4448.
- 4 **Брылеев, А. М.** Электрические рельсовые цепи / А. М. Брылеев, Н. Ф. Котляренко. – 2-е изд. – Москва : Транспорт, 1970. – 256 с.
- 5 Об условиях возникновения опасных отказов в ограниченных рельсовых цепях с локомотивным приемником / В. С. Кузьмин, Л. И. Стряпкин, Р. Е. Володькин, А. О. Филиппочкина // Интеллектуальные транспортные системы : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 617–625. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-617-625.

References

- 1 **Sokolov, M. M.** Using the input resistance of a track section for positioning a moving unit / M. M. Sokolov, A. G. Khodkevich // Automation, communications, informatics. – 2025. – No. 9. – P. 15–17. – DOI 10.62994/AT.2025.9.9.001.
- 2 **Sokolov, S. V.** Solution of the problem of autonomous high-precision positioning of railway rolling units based on measuring track currents / S. V. Sokolov, D. V. Shvalov // Automation in transport. – 2025. – Vol. 11, No. 3. – P. 201–209. – DOI 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209.
- 3 Determining the location of a train under conditions of electronic warfare systems operation / O. Yu. Kuprienko, V. V. Batraev, S. V. Marshov, S. V. Ipatov // Railway transport. – 2025. – No. 7. – P. 36–39. – ISSN 0044-4448.
- 4 **Bryleev, A. M.** Electric track circuits / A. M. Bryleev, N. F. Kotlyarenko. – 2nd ed. – Moscow : Transport, 1970. – 256 p.
- 5 On the conditions for the occurrence of dangerous failures in limited track circuits with a locomotive receiver / V. S. Kuzmin, L. I. Stryapkin, R. E. Volodkin, A. O. Filippochkina // Intelligent transport systems : Proceedings of the III International scientific and practical conference, Moscow, May 30, 2024. – Moscow : Russian University of Transport (MIIT), 2024. – P. 617–625. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-617-625.

E. N. Rosenberg, V. S. Kuzmin, A. V. Ozerov

ON THE CONDITIONS FOR THE OCCURENCE OF HAZARDOUS FAILURES IN UNLIMITED TRACK CIRCUITS WITH A LOCOMOTIVE RECEIVER IN SHUNT MODE OPERATION

Abstract. A comprehensive solution to the problem of determining the spatial coordinates of traction rolling stock units by primary safety devices based on the analysis of automatic locomotive signaling signals in modern train control systems based on unlimited track circuits is impossible without establishing the conditions for the occurrence of hazardous failures in shunt mode. This is of significant practical importance, since, in addition to receiving a clearance order inappropriate for the train situation, primary safety devices will not be able to refine the spatial coordinates of a traction rolling stock unit within the boundaries of the track circuit in question using signals received from the track line. In this article, based on the mathematical apparatus of track circuit theory and the four-terminal method, basic calculation expressions are derived for determining the value of the train safety criterion for shunt mode. A characteristic dependence has been obtained that allows one to estimate the extent of the danger zone under worst-case conditions for unlimited track circuits with a locomotive receiver. The obtained results form the basis for developing operating algorithms for a prospective train control system without trackside receivers.

Keywords: track circuit, primary safety devices, locomotive receiver, shunt mode operation, dangerous failure, false vacancy, double shunting, spatial coordinates, positioning.

For citation: Rosenberg, E. N. On the conditions for the occurrence of hazardous failures in unlimited track circuits with a locomotive receiver in shunt mode operation / E. N. Rosenberg, V. S. Kuzmin, A. V. Ozerov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 161–167. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_4_161.

Сведения об авторах

Розенберг Ефим Наумович

АО «НИИАС»,
доктор технических наук, профессор,
первый заместитель генерального директора,
e-mail: info@vniias.ru

Кузьмин Владислав Сергеевич

АО «НИИАС»,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник Отдела научно-исследовательской
работы Центра интеллектуальных
и программных решений Научно-технического
комплекса интеллектуальных систем контроля
и управления,
e-mail: info@vniias.ru

Озеров Алексей Валерьевич

АО «НИИАС»,
начальник Международного управления –
начальник Центра управления
интеллектуальной собственностью,
e-mail: a.ozеров@vniias.ru

Information about the authors

Rosenberg Efim Naumovich

JSC “NIAS”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
First Deputy General Director,
e-mail: info@vniias.ru

Kuzmin Vladislav Sergeevich

JSC “NIAS”,
Candidate of Engineering Sciences,
Leading Researcher of the Research Department
of the Center for Intelligent and Software
Solutions of the Scientific and Technical
Complex of Intelligent Monitoring and Control
Systems,
e-mail: info@vniias.ru

Ozerov Alexey Valerievich

JSC “NIAS”,
Head of International Department, Head of
Intellectual Property Management Centre,
e-mail: a.ozеров@vniias.ru

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 629.4-592

DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_168

*В. А. Карпычев, А. В. Страхова, С. А. Егоренкова***КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ В ТОРМОЗНОМ ЦИЛИНДРЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА ПО УСЛОВИЮ БЕЗЪЮЗОВОГО ТОРМОЖЕНИЯ**

Аннотация. Представлено комплексное исследование, посвящённое обоснованию допустимого давления в тормозном цилиндре грузового вагона в зависимости от осевой нагрузки с учётом предотвращения юза колёсной пары при торможении. Рассмотрены три методических варианта определения предельного давления, отличающиеся подходами к учёту влияния скорости движения на расчётные значения коэффициентов сцепления колеса с рельсом и трения композиционных тормозных колодок. Особое внимание уделено влиянию коэффициента обезгрузки тележки на запас по сцеплению. Сравнительная оценка того, что подход с одновременным учётом коэффициента сцепления и коэффициента трения обеспечивает наилучший баланс между безопасностью торможения, устойчивостью против юза и эффективностью управления поездом в реальных эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: давление в тормозном цилиндре, безъюзовое торможение, коэффициент сцепления, коэффициент трения, граничные давления.

Для цитирования: Карпычев, В. А. Количественная оценка максимальных давлений в тормозном цилиндре в зависимости от осевой нагрузки грузового вагона по условию безъюзового торможения / В. А. Карпычев, А. В. Страхова, С. А. Егоренкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 168–178. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_168.

Введение

Обоснование давления в тормозном цилиндре в зависимости от осевой нагрузки грузового вагона является актуальной задачей для выбора параметров авторежима. При этом, как указывалось [1], на значения давления накладываются ограничения, исходя из различных условий. Таковыми являются условия:

- отсутствие юза;
- непревышение нормируемого тормозного пути;
- непревышение предельно допускаемой мощности, приходящейся на одну колодку при экстренном торможении.

В данной статье представлены результаты исследования количественных ограничений на выбор давления в тормозных цилиндрах в зависимости от осевой нагрузки из условия отсутствия юза колесной пары при торможении применительно к серийному грузовому вагону и композиционным колодкам.

Основная часть

Результаты аналитических исследований представлены в [1]. При этом получена зависимость давления в тормозных цилиндрах в зависимости от различных факторов, включая коэффициент сцепления колесной пары с рельсом, коэффициент трения колодок, диаметр тормозного цилиндра, передаточное число рычажной передачи, материал колодок, скорость движения единицы подвижного состава, осевую нагрузку и другие.

Условие отсутствия юза представлено в виде зависимости [2].

Расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок определяется по общеизвестной формуле [2].

Заметим, что:

$$T + Q = q * k_{ось}, \quad (1)$$

где T – тара вагона; Q – грузоподъёмность вагона; q – осевая нагрузка; $k_{ось}$ – количество осей вагона.

Учитывая (1), произведем замену в общеизвестной формуле расчетного коэффициента силы нажатия тормозных колодок:

$$\delta_p = \frac{mK_p}{q * k_{ось}} \quad (2)$$

В числителе данного выражения представлено нажатие колодок вагона в целом. В знаменателе имеет место величина количества осей вагона. Тогда получаем:

$$\frac{mK_p}{k_{ось}} = \frac{K_{p(ваг)}}{k_{ось}} = K_{p(ось)}, \quad (3)$$

где $K_{p(ось)}$ – расчетное нажатие колодок на ось.

В результате получаем:

$$\delta_p = \frac{k_{кол} K_p}{q}, \quad (4)$$

где $k_{кол}$ – количество колодок, действующих на колесную пару при торможении.

Таким образом, получаем, что расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок зависит от расчетного нажатия, действующего на ось и осевой нагрузки.

Авторежим регулирует давление в тормозном цилиндре в зависимости от осевой нагрузки вагона. Поэтому для заданной осевой нагрузки и давления расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок (δ_p) имеет конкретное значение. Другими словами, δ_p является величиной, регулируемой авторежимом. Расчетный коэффициент трения ($\varphi_{кр}$) зависит от типа колодок и скорости движения вагона. Расчетный допускаемый коэффициент сцепления колеса с рельсом, как было указано выше, зависит от осевой нагрузки и скорости вагона. Условием максимально допускаемых давлений в тормозном цилиндре является отсутствие юза.

Учитывая, что авторежим регулирует давление в тормозном цилиндре в зависимости от осевой нагрузки, а в равенстве имеются величины, зависящие от скорости, требуется исследование влияния скорости на характер изменения этих величин.

Составляющая коэффициента сцепления от скорости определяется выражением в [2]. Используя данную зависимость, был выполнен расчет для скоростей от 0 до 100 км/час. Результаты представлены на графике (рис. 1).

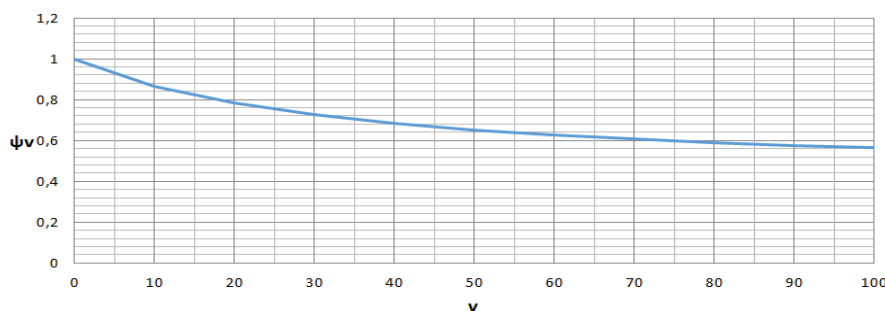


Рис. 1. Зависимость функции ψ_v от скорости подвижного состава

На графике видно, что функция нелинейная, убывающая. В области скоростей от 0 до 60 км/ч прослеживается резкое уменьшение значений, а далее в области скоростей 60–100 км/ч скорость убывания значений уменьшается. Таким образом, минимальное значение составляющей коэффициента сцепления реализуется при максимальной скорости.

Отсюда, для обоснования допускаемых давлений в тормозном цилиндре в зависимости от осевой нагрузки необходимо выполнить условие:

$$\psi_v \rightarrow \min . \quad (5)$$

Что соответствует максимальной принятой в расчетах скорости.

Составляющая коэффициента сцепления от осевой нагрузки определяется общеизвестным выражением [2].

На рис. 2 приведена зависимость составляющей коэффициента сцепления от осевой нагрузки. Представленная зависимость имеет линейный, убывающий характер. Чем больше осевая нагрузка, тем меньше значение составляющего коэффициента сцепления.

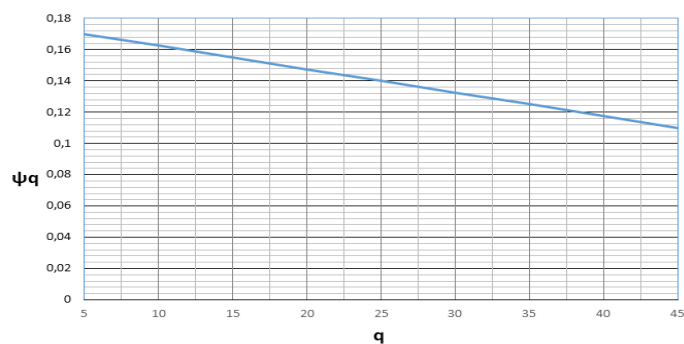


Рис. 2. Зависимость ψ_q от осевой нагрузки подвижного состава

Верхнее значение функции ψ_q от осевой нагрузки равно 0,1775, а нижнее – 0,11. Таким образом, функция для нагрузки 45 т/ось в 1,61 раз меньше, чем для порожнего вагона.

Выполнив количественный анализ составляющих величин в дальнейшем произведен расчет значений расчетного коэффициента сцепления в зависимости от осевой нагрузки и скорости движения. Результаты расчета представлены на рис. 3.

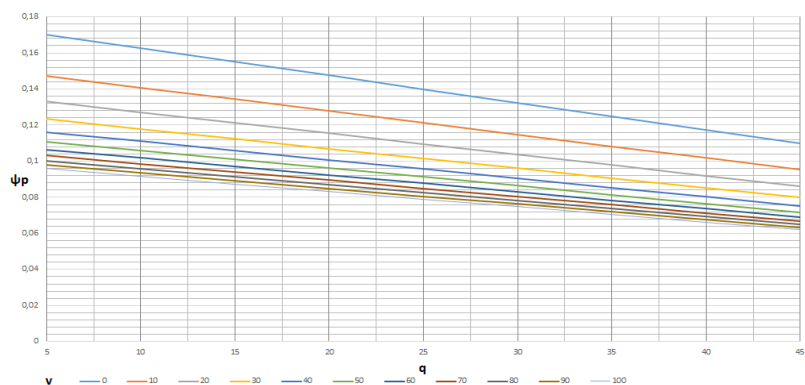


Рис. 3. Зависимости расчетного коэффициента сцепления от осевой нагрузки вагона и скорости его движения

Учитывая условие, следует, что для обоснования зависимости давления в тормозном цилиндре необходимо использовать зависимость для скорости 100 км/ч (рис. 3).

Расчетный коэффициент трения, как указано ранее, зависит от скорости движения и материала колодок, и определяется эмпирической формулой в ПТР [3]. Для проведения исследования принимаем композиционные колодки.

Результаты расчетов зависимости расчетного коэффициента трения от скорости представлены на графике (рис. 4).

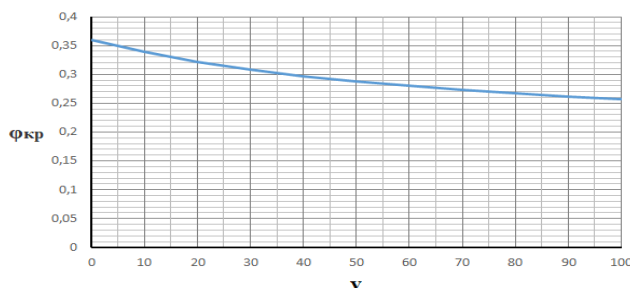


Рис. 4. Зависимость расчётного коэффициента трения от скорости

Заметим, что значение расчетного коэффициента трения с увеличением скорости постепенно уменьшается. Наибольшее значение равно 0,36, наименьшее – 0,26. Таким образом, уменьшение достигает 1,38 раза.

Таким образом, исследования показали, что наименьшее значение расчетного коэффициента сцепления имеет место при максимальной скорости. Вместе с этим наименьшее значение расчетного

коэффициента трения также реализуется для максимальной скорости, а при её уменьшении оно возрастает. Также следует учитывать, что авторежим регулирует давление только в зависимости от осевой нагрузки вагона. Отсюда: необходимым условием ограничения на давление в тормозном цилиндре является отсутствие юза во всем диапазоне рассматриваемых скоростей. Исходя из сказанного, на первом этапе (вариант 1) обоснования давления принят следующий алгоритм:

1 Из условия безюзового торможения максимальные давления в тормозном цилиндре определяются зависимостью [1].

2 В указанной зависимости используем минимальное значение ψ_v , принимаемое для 100 км/ч, в соответствии с условием (5).

3 Расчетный коэффициент трения определяем во всем диапазоне скоростей.

4 Осевую нагрузку изменяем от 5 т/ось до 45 т/ось. Повышенная осевая нагрузка принята для прослеживания тенденций изменения функции.

5 Коэффициент обезгрузки не учитывается ($f = 1$).

В качестве исходных приняты данные, представленные в таблице.

Исходные данные

№, п/п	Наименование величины	Обозначение	Единицы измерения	Значение
1	Передаточное число рычажной передачи	n	-	5,72
2	Коэффициент полезного действия тормозной рычажной передачи	$\eta_{грп}$	-	0,9
3	Коэффициент полезного действия тормозного цилиндра	$\eta_{ц}$	-	0,95
4	Диаметр тормозного цилиндра	$d_{ц}$	см	35,6
5	Число тормозных колодок	m	-	8
6	Математическая постоянная	π	-	3,14
7	Коэффициенты для определения расчетного нажатия колодки на колесо при установки композиционных колодок	a	-	1,22
		b	-	20
		d	-	1

На рис. 5 представлены зависимости максимальных давлений в тормозном цилиндре для принятых условий в зависимости от осевой нагрузки.

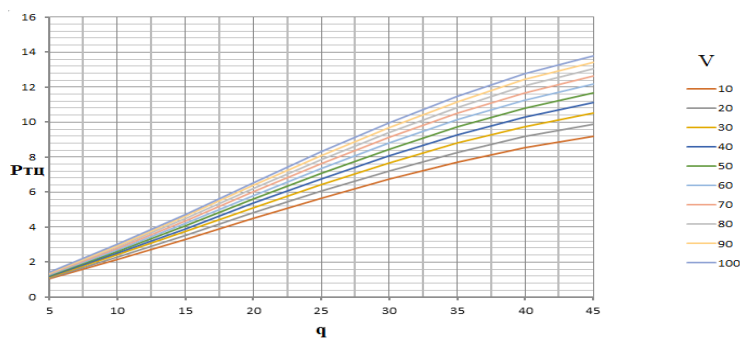


Рис. 5. Зависимости максимальных давлений в тормозном цилиндре из условия недопущения юза от осевой нагрузки для варианта 1

На графике (см. рис. 5) имеем семейство кривых, каждая из которых соответствует постоянной скорости и характеризует изменение давления от осевой нагрузки. При этом самая нижняя кривая соответствует давлению в тормозном цилиндре при минимальной, а верхняя – максимальной скорости движения вагона. В этом случае для заданной осевой нагрузки давление в тормозном цилиндре из условия недопущения юза для минимальной скорости ниже, чем для максимальной. Это обуславливается тем, что, принимая фиксированное значение составляющей величины расчетного коэффициента сцепления по скорости на уровне 100 км/ч, как минимальной, при уменьшении скорости возрастает значение расчетного коэффициента трения, снижая запас по сцеплению. В результате повышения значения

расчетного коэффициента трения при уменьшении скорости имеем уменьшение допустимого давления в тормозном цилиндре. Поэтому при минимальной скорости получаем наименьшие давления. Отсюда: для установления ограничения давления в тормозном цилиндре необходимо выбирать кривую с соответствующей минимальной скоростью. Приняв за основу эти давления, получаем вывод, что при увеличении скорости вагона мы ожидаем повышение запаса по сцеплению. Минимальный запас реализуется для минимальной скорости.

На рис. 6 отдельно представлена зависимость давления в тормозном цилиндре от осевой нагрузки для скорости 5 км/ч. Данная скорость принята как минимальная на основе ПТЭ от 2022 года при соединении отцепов, а давления являются максимально допустимыми для принятых условий. В диапазоне нагрузок 20–25 т/ось максимальное давление не превышает 5,5 кгс/см².

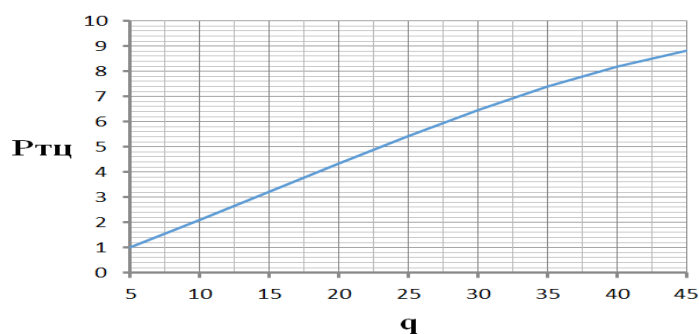


Рис. 6. Зависимость максимальных допустимых давлений в тормозном цилиндре из условия недопущения юза от осевой нагрузки для варианта 1

Следует отметить, что рост запаса по сцеплению при увеличении скорости при выбранных давлениях может снизить эффективность управления движением поезда. Поэтому на этапе 2 (вариант 2) интерес представляет оценка максимальных допустимых давлений, когда изменение скорости учитывается не только при расчете расчетного коэффициента трения, но и при определении расчетного коэффициента сцепления. Как и для варианты 1, обезгрузка во втором варианте не учитывается.

На рис. 7 представлены зависимости, характеризующие изменения максимальных давлений в тормозных цилиндрах из условия недопущения юза от осевой нагрузки для разных скоростей (вариант 2).

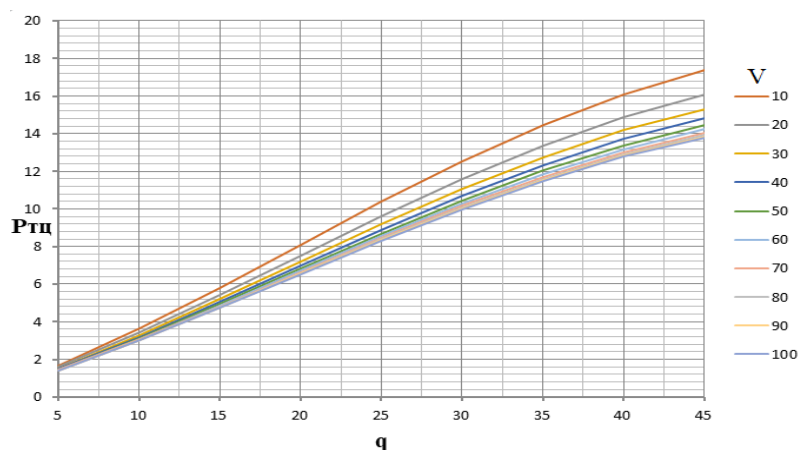


Рис. 7. Зависимости максимальных допустимых давлений в тормозном цилиндре из условия недопущения юза от осевой нагрузки для варианта 2

Как видно из графиков, в отличие от варианта 1, минимальные давления реализуются для максимальной скорости (в расчетах – 100 км/ч), а все остальные кривые регулярно находятся выше. Данный факт согласуется с требованиями при проектировании тормозов, которые предусматривают проверку на юз для композиционных колодок на скорости 100 км/ч. Таким образом, взяв за основу давления при максимальной скорости, имеем ожидаемое увеличение запаса по сцеплению при уменьшении скорости торможения. На рис. 8 отдельно представлена зависимость давления в тормозном цилиндре от осевой нагрузки для скорости 100 км/ч.

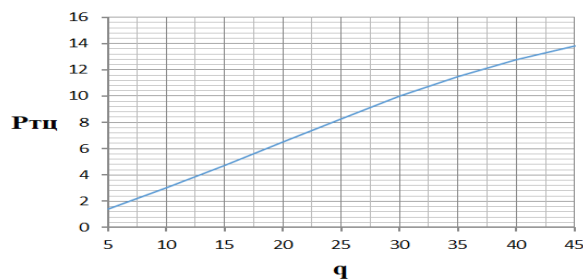


Рис. 8. Зависимость максимальных давлений в тормозном цилиндре из условия недопущения юза от осевой нагрузки для варианта 2

Следует отметить, что для варианта 1 и 2 выводы применительно к ожидаемому увеличению запаса по сцеплению противоположны друг другу. Однако, ранее отмечалось, что при уменьшении скорости увеличивается не только составляющая расчетного коэффициента сцепления от скорости, но и расчетный коэффициент трения. При этом градиенты изменений этих функций разные.

Выполнив исследования и обосновав рекомендации, на заключительном этапе произведена проверка рекомендуемых давлений на условие недопущения юза. Проверка производилась на основе рекомендованной методики расчета тормозных систем грузовых вагонов [2]. Проверка выполнена для двух вариантов обоснования максимально допустимого давления в тормозном цилиндре на основе оценки коэффициента запаса по сцеплению (13):

$$\Delta = \delta_p \varphi_{кр} - f |\psi_p|, \quad (6)$$

где $|\psi_p|$ – расчетный допускаемый коэффициент сцепления колеса с рельсом, определяется как функция от осевой нагрузки и скорости;

$\varphi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения колодок, зависит от типа колодок и скорости движения.

Если коэффициент меньше нуля, то имеет место запас по сцеплению. Если больше нуля, то условие безюзового торможения нарушается.

Формула расчетного коэффициента силы нажатия тормозных колодок выведена ранее. Расчетная сила нажатия на тормозную колодку и действительная сила нажатия на одну колодку, определяются по общеизвестным формулам [2].

Следует отметить, что в соответствии с выведенной зависимостью из условия безюзового торможения при определении давлений в тормозных цилиндрах [1] силы F_1 (усилие сжатия внутренней отпускной пружины тормозного цилиндра), и F_2 (усилие пружины авторегулятора рычажной передачи, приведенное к штоку тормозного цилиндра) не учитывались, что обусловило некоторое занижение граничных значений давлений. В расчетной зависимости действительной силы нажатия на одну колодку, учет сил F_1 и F_2 приводят к уменьшению действительных нажатий и увеличению запаса по юзу. В проверках эти силы не учитывались.

На рис. 9 представлены результаты расчета для варианта 1 с коэффициентом обезгрузки равным 1.

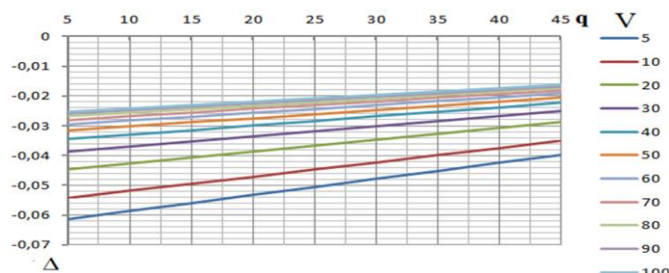


Рис. 9. Результаты расчета коэффициента запаса по сцеплению для варианта 1 и зависимости давлений в тормозных цилиндрах от осевой нагрузки, выбранных на скорости 5 км/ч без учета сил F_1 , F_2 , и обезгрузки тележки

Анализ зависимостей показывает, что в целом имеет место запас по сцеплению. Следует отметить, что запас по сцеплению выше на минимальной скорости и ниже на максимальной, что несколько противоречит ожиданиям. Этот факт объясняется тем, что для определения давлений в тормозном цилиндре принималось минимальное фиксированное значение расчетного коэффициента сцепления для максимальной скорости, а значение расчетного коэффициента трения максимальным для минимальной

скорости (см. рис. 5, 6). При проведении проверки значения расчетного коэффициента сцепления определялось с учетом изменения скорости, что привело к его увеличению при уменьшении скорости и как следствие, к росту запаса по сцеплению. Для максимальной скорости при том же фиксированном значении расчетного коэффициента сцепления расчетный коэффициент трения минимальный. Поэтому допустимое давление при увеличении скорости увеличивается (см. рис. 5). При проверке имеем несколько другую картину. Принимая за основу минимально допускаемые давления для минимальной скорости (см. рис. 5, 6), получаем их корреляцию с максимальным расчетным коэффициентом трения и минимальным расчетным коэффициентом сцепления (для заданной осевой нагрузки). Вместе с этим при уменьшении скорости значение расчетного коэффициента сцепления возрастает и для заданного давления в тормозном цилиндре имеем увеличение запаса по юзу именно на минимальной скорости.

Учитывая вышесказанное, выполнены расчеты для несколько другого варианта. В качестве допускаемых принимались давления для скорости 100 км/ч. Эти давления соответствуют минимальному расчетному коэффициенту сцепления и минимальному расчетному коэффициенту трения. То есть обе величины определялись для одной скорости. Отсюда, условия определения давлений и проверки для скорости 100 км/ч идентичны, а запас по юзу для этой скорости должен быть равен 0.

На рис. 10 представлены результаты расчета запаса по сцеплению для давлений, зависящих от осевой нагрузки, принимаемых для скорости 100 км/ч.

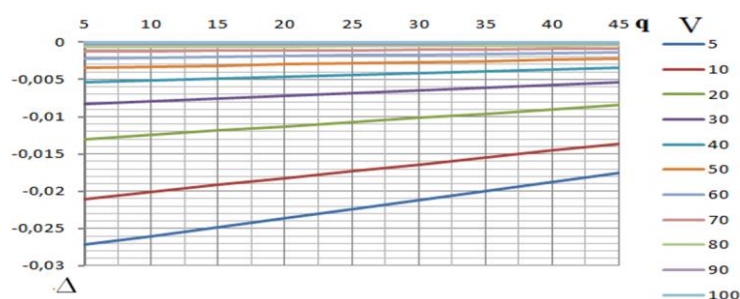


Рис. 10. Результаты расчета коэффициента запаса по сцеплению для варианта 1 и зависимости давлений в тормозных цилиндрах от осевой нагрузки, выбранных на скорости 100 км/ч без учета сил F_1 , F_2 и обезгрузки тележки

Как видно из рисунка, для скорости 100 км/ч запас по юзу отсутствует и равен 0, а для минимальной скорости имеем наличие запаса.

На рис. 11 представлены зависимости запаса по юзу для варианта 1, но с учетом обезгрузки, равной 0,9. В сравнении с вариантом, когда обезгрузка не учитывалась, в данном варианте имеет место уменьшение запаса по сцеплению, что является ожидаемым и указывает на верность расчетов.

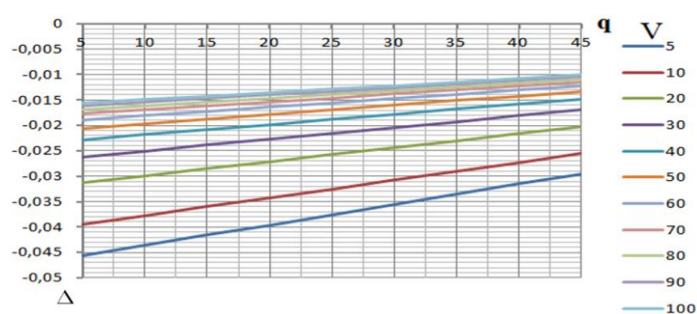


Рис. 11. Результаты расчета коэффициента запаса по сцеплению для варианта 1 и зависимости давлений в тормозных цилиндрах от осевой нагрузки, выбранных на скорости 5 км/ч без учета сил F_1 и F_2 , с коэффициентом обезгрузки тележки 0,9

На рис. 12 представлены результаты расчетов, когда давления выбирались по варианту 1, но для скорости 100 км/ч и с учетом обезгрузки, равной 0,9. Как видно из рисунка, при скорости выше 20 км/ч имеет место расчетное нарушение условий безюзового торможения для всех осевых нагрузок. Данный факт указывает на чувствительность рассмотренного варианта к возникновению юза.

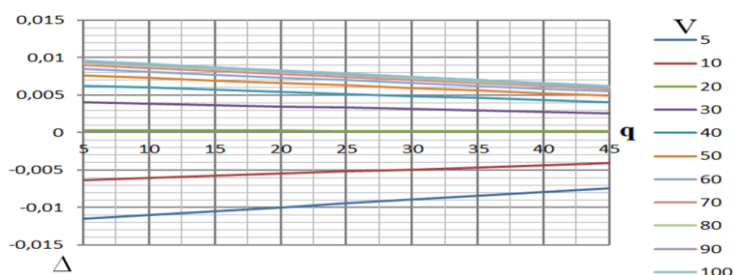


Рис. 12. Результаты расчета коэффициента запаса по сцеплению для варианта 1 и зависимости давлений в тормозных цилиндрах от осевой нагрузки, выбранных на скорости 100 км/ч без учета сил F_1 и F_2 , с обезгрузкой тележки 0,9

В дальнейшем рассмотрен вариант второй, когда давление определялось с учетом изменения расчетного коэффициента сцепления от скорости. Результаты без учета обезгрузки представлены на рис. 13. Как видно из рисунка, зависимости практически идентичны зависимостям, представленным на рис. 10. Действительно, для рис. 10 и рис. 13 за основу принимались давления, у которых расчетный коэффициент сцепления определялся для скорости 100 км/ч.

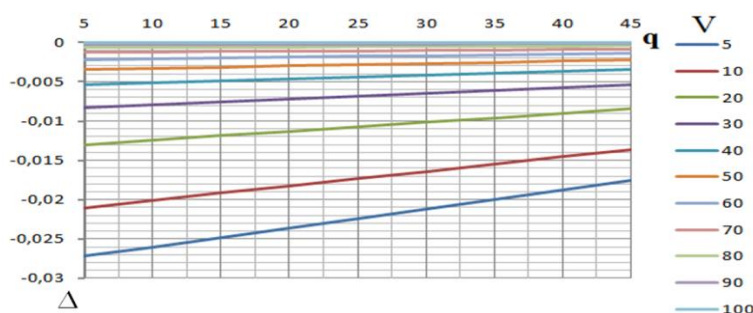


Рис. 13. Результаты расчета коэффициента запаса по сцеплению для варианта 2 и зависимости давлений в тормозных цилиндрах от осевой нагрузки, выбранных на скорости 100 км/ч без учета сил F_1 , F_2 , и обезгрузки тележки

На рис. 14 представлены результаты расчетов для варианта 2, но с учетом обезгрузки, равной 0,9. Как видно, зависимости идентичны зависимостям, представленным на рис. 12. При скорости выше 20 км/ч имеет место отсутствие запаса по юзу для всего диапазона осевых нагрузок.

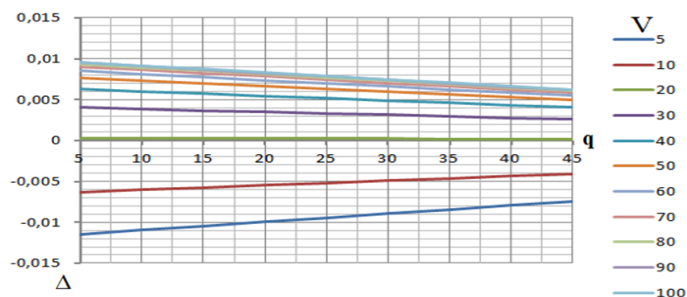


Рис. 14. Результаты расчета коэффициента запаса по сцеплению для варианта 2 и зависимости давлений в тормозных цилиндрах от осевой нагрузки, выбранных на скорости 100 км/ч без учета сил F_1 и F_2 , с обезгрузкой тележки 0,9

Таким образом, обоснование предельного давления в тормозных цилиндрах в соответствии с вариантом 1 позволяет иметь запас по сцеплению как при отсутствии, так и при наличии обезгрузки. Для варианта 2 наличие обезгрузки обуславливает отсутствие запаса по сцеплению при скоростях выше 20 км/ч во всем диапазоне осевых нагрузок.

Исходя из всего сказанного, следует сделать вывод о необходимости рассмотрения третьего варианта, когда определение граничных давлений определяется с учетом изменения расчетного коэффициента трения и расчетного коэффициента сцепления от скорости. Для варианта 3 не учитывались силы F_1 и F_2 . Обезгрузка колесных пар учитывалась равной 0,9. Результаты расчетов представлены на рис. 15. При этом получили зависимости в виде семейства кривых, каждая из которых соответствует своей скорости и отражает изменение давления в зависимости от осевой нагрузки.

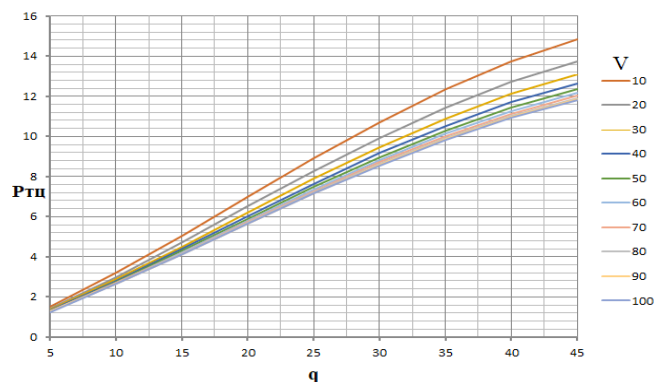


Рис. 15. Зависимости изменения граничных давлений для варианта 3

Как видно из графиков, наименьшие давления имеем для максимальной скорости. Поэтому принимаем их за основу.

На рис. 16 представлены результаты проверки коэффициента запаса для обезгрузки, равной 1, и прочих равных с вариантом 3 условий. Как и следовало ожидать, минимальный запас по сцеплению имеем для максимальной скорости, который возрастает при уменьшении скорости.

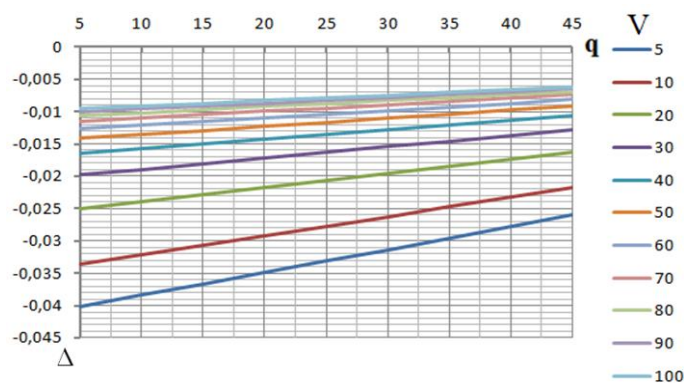


Рис. 16. Результаты расчета запаса по сцеплению для минимальных граничных давлений в соответствии с вариантом 3. Обезгрузка равна 1

На рис. 17 представлены результаты расчета коэффициента запаса по сцеплению для варианта аналогичного предыдущему, но с обезгрузкой равной 0,9. Следует отметить, что условия выбора минимальных граничных давлений для максимальной скорости идентичны условиям расчета запаса по сцеплению для той же скорости. Отсюда ожидаемый результат – запас по сцеплению для этих условий отсутствует, что и наблюдаем на рис. 17.

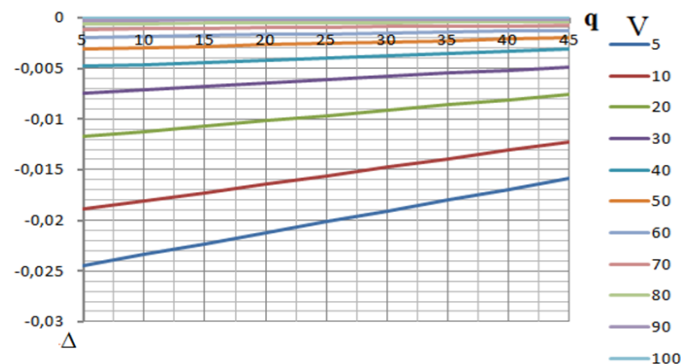


Рис. 17. Результаты расчета запаса по сцеплению для минимальных граничных давлений в соответствии с вариантом 3. Обезгрузка равна 0,9

Следует также отметить, что силы F_1 и F_2 в расчетах не учитывались. В реальности они несколько уменьшают усилия на колодке, а при выбранных давлениях это приводит к некоторому запасу по сцеплению для максимальной критической по условию сцепления скорости.

Выводы

Сравнительная оценка рассмотренных вариантов показывает, что вариант 3 наиболее рационален, т.к. в наиболее полной мере реализует условия сцепления при торможении и эффективность управления движением поезда.

Список литературы

1 **Карпычев, В. А.** Определение граничных характеристик авторежима тормозной системы грузового вагона из условия безюзового торможения / В. А. Карпычев, А. Б. Болотина, А. В. Страхова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1 (93). – С. 8–14. – DOI 10.46973/0201-727X.

2 **ГОСТ 34434-2018.** Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета ; введ. с 01.08.2019. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 31 с.

3 **Правила тяговых расчетов для поездной работы.** – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.

References

1 **Karpichev, V. A.** Determination of the boundary characteristics of the automatic braking system of a freight car based on the condition of non-slip braking / V. A. Karpichev, A. B. Bolotina, A. V. Strakhova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 1 (93). – P. 8–14. – DOI 10.46973/0201-727X.

2 **GOST 34434-2018.** Brake systems of freight railway cars. Technical requirements and calculation rules ; introduced on 01.08.2019. – Moscow : Standartinform, 2018. – 31 p.

3 **Rules for traction calculations for train operation.** – Moscow : Transport, 1985. – 287 p.

V. A. Karpichev, A. V. Strakhova, S. A. Egorenkova

**QUANTITATIVE ASSESSMENT OF MAXIMUM PRESSURES
IN THE BRAKE CYLINDER DEPENDING ON THE AXIAL LOAD
OF A FREIGHT CARRIAGE UNDER THE CONDITION
OF NON-SLIP BRAKING**

Abstract. This article presents a comprehensive study devoted to substantiating the permissible pressure in a freight car brake cylinder depending on the axle load, taking into account the prevention of wheelset skidding during braking. Three methodological options for determining the maximum pressure are considered, differing in their approaches to accounting for the influence of travel speed on the calculated values of the wheel-rail adhesion coefficient and the friction coefficient of composite brake shoes. Particular attention is paid to the influence of the bogie unloading factor on the adhesion reserve. A comparative assessment shows that the approach that simultaneously considers the adhesion coefficient and friction coefficient provides the best balance between braking safety, resistance to skidding, and train control efficiency under real operating conditions.

Keywords: pressure in the brake cylinder, non-slip braking, adhesion coefficient, friction coefficient, boundary pressures.

For citation: Karpichev, V. A. Quantitative assessment of maximum pressures in the brake cylinder depending on the axial load of a freight carriage under the condition of non-slip braking / V. A. Karpichev, A. V. Strakhova, S. A. Egorenkova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 168–178. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_168.

Сведения об авторах

Карпычев Владимир Александрович
Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Машиноведение, проектирование,
стандартизация и сертификация»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: kv119@yandex.ru

Страхова Арина Владимировна
Российский университет транспорта (МИИТ),

Information about the authors

Karpichev Vladimir Aleksandrovich
Russian University of Transport (MIIT),
Chair “Mechanical Engineering, Design,
Standardization and Certification”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of the Chair,
e-mail: kv119@yandex.ru

Strakhova Arina Vladimirovna
Russian University of Transport (MIIT),

кафедра «Машиноведение, проектирование,
стандартизация и сертификация»,
ассистент,

e-mail: arishastrakhova@yandex.ru

Егоренкова Софья Алексеевна

Центр НК и ТД ПКБ АО «ВНИИЖТ»,

специалист,

e-mail: egorenkovasofya@yandex.ru

Chair “Mechanical Engineering, Design,
Standardization and Certification”,

Assistant,

e-mail: arishastrakhova@yandex.ru

Egorenkova Sofya Alekseevna

Center for Non-Destructive

Testing and Technical Diagnostics

of the Design Bureau of JSC “VNIIZhT”,

Specialist,

e-mail: egorenkovasofya@yandex.ru

Д. В. Ольховатов, А. В. Шевкунова, П. Ю. Коновалов, Д. Е. Притыкин, Я. К. Склифус

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА

Аннотация. Нестабильность выходного напряжения вторичных источников питания электровозов при значительных колебаниях напряжения в контактной сети приводит к сбоям в работе аппаратуры, отказам и экономическим ущербам от их простоя. В качестве решения предлагается разработка усовершенствованной конструкции управляемого вторичного источника напряжения с системой автоматического регулирования, обеспечивающей стабилизацию выходного напряжения. Для достижения поставленной цели в работе выполнен анализ типовых схем вторичных источников питания, проведен расчет ключевых элементов, таких как разделительный трансформатор, и разработана система управления на основе регулятора напряжения, верифицированная с помощью имитационного моделирования в среде SimInTech. Результаты моделирования подтвердили работоспособность и эффективность разработанной системы управления, продемонстрировав ее способность поддерживать стабильное выходное напряжение при изменении входного.

Ключевые слова: электровоз, вторичный источник питания, цепи управления, управляемый выпрямитель, стабилизация напряжения, математическое моделирование.

Для цитирования: Моделирование системы стабилизации напряжения вторичного источника питания цепей управления электровоза / Д. В. Ольховатов, А. В. Шевкунова, П. Ю. Коновалов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 179–187. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_179.

Введение

Стабильное и надежное функционирование систем управления, безопасности и вспомогательного оборудования электроподвижного состава (ЭПС) в значительной степени определяется качеством электроэнергии, предоставляемой бортовыми вторичными источниками питания (ВИП). Данные устройства выполняют критически важную функцию преобразования и стабилизации напряжения, поступающего от контактной сети или собственных силовых установок, для питания низковольтных цепей, таких как микропроцессорные системы управления, комплексные локомотивные системы безопасности, устройства освещения и связи, а также для обеспечения режима подзаряда аккумуляторных батарей (АКБ).

Актуальность исследования обусловлена ужесточением требований к качеству выходного напряжения вторичных источников питания в условиях значительных колебаний уровня напряжения в контактной сети переменного тока. Использование традиционных неуправляемых выпрямителей приводит к прямому переносу этих колебаний на выход источника, что может вызывать сбои в работе чувствительной электронной аппаратуры, снижение надежности ЭПС и, как следствие, привести к существенным экономическим ущербам, связанным с отказами и простоями.

В качестве объекта исследования взят за основу вторичный источник питания цепей управления электровоза переменного тока.

Рассматриваемая проблема заключается в необходимости обеспечения высокого качества выходного напряжения вторичного источника питания. Основными требованиями являются стабильность этого напряжения и минимальный коэффициент пульсаций. Указанные параметры должны поддерживаться в условиях значительных колебаний входного напряжения, при этом необходимо обеспечить сохранение приемлемых массогабаритных показателей самого устройства.

Целью работы является проектирование конструкции и системы управления вторичного источника питания, способного поддерживать стабильное выходное напряжение в широком диапазоне изменений входного напряжения, что позволит повысить надежность работы систем электровоза и обеспечить бесперебойный подзаряд аккумуляторной батареи.

Основная часть

Проведем краткий анализ структурных схем вторичных источников питания электровозов.

Рассматриваемый объект можно классифицировать по различным признакам, таким как род входного и выходного напряжения, мощность, количество выходных каналов, метод стабилизации и точность выходных параметров.

Существует несколько типовых структурных схем ВИП, каждая из которых обладает определёнными достоинствами и недостатками [1].

Наиболее простой структурой обладает ВИП, состоящий из выпрямителя и дросселя, выполняющего роль фильтра. Основное достоинство такой схемы – простота конструкции. Существенным недостатком является высокий уровень пульсаций выходного напряжения, который может достигать 100 %, что негативно сказывается на работе подключаемой нагрузки.

Более сложная схема включает в себя неуправляемый выпрямитель, сглаживающий фильтр, преобразователь напряжения и выходной фильтр. Такая конфигурация позволяет обеспечить минимальный коэффициент пульсации на выходе. Однако это достигается за счет усложнения конструкции и увеличения количества элементов [2].

Управляемый преобразователь лишён таких недостатков, как высокий коэффициент пульсации и сложность силовой части. Его ключевой особенностью является возможность регулирования выходного напряжения. Основным недостатком данной схемы считается повышенная сложность системы управления.

Для обеспечения гальванической развязки входных и выходных цепей, а также согласования уровней напряжений, часто применяются схемы ВИП с сетевым трансформатором. В таких схемах стабилизатор напряжения (СН) может быть параметрическим или компенсационного типа (с непрерывным или импульсным регулированием) и дополнительно способствует сглаживанию пульсаций. Недостатком структур со трансформатором промышленной частоты являются значительные масса и габариты.

С целью снижения массогабаритных показателей широкое распространение получили бестрансформаторные схемы или схемы с высокочастотным преобразованием [2]. В так называемых квазибестрансформаторных ВИП согласование напряжений осуществляется с помощью высокочастотного преобразователя, что позволяет уменьшить размеры магнитных компонентов. Недостатком таких схем является трёхкратное преобразование энергии, ведущее к снижению общего КПД.

В структурах с входом и выходом на постоянном напряжении основным узлом выступает высокочастотный преобразователь, который преобразует постоянное входное напряжение в переменное с последующим выпрямлением и фильтрацией. Стабилизация может осуществляться регуляторами, установленными как во входной, так и в выходной цепях.

В случаях, когда не требуется гальваническая развязка и отношение входного и выходного напряжений лежит в допустимом диапазоне, могут применяться ВИП на базе импульсных регуляторов постоянного напряжения (последовательного или параллельного типа) с входными и выходными сглаживающими фильтрами [3].

Для получения выходного переменного напряжения требуемого качества (частоты, числа фаз, формы кривой) используются схемы с автономным инвертором. Выигрыш в массе и габаритах достигается за счёт применения бестрансформаторного выпрямителя на входе и размещения согласующего трансформатора на стороне высокочастотного переменного напряжения.

Современная конструкция ВИП, отвечающая актуальным требованиям, часто включает в себя выпрямитель, инвертор, силовой высокочастотный трансформатор, фильтры, стабилизатор напряжения и аккумуляторную батарею, работающую в буферном режиме.

Такая схема позволяет обеспечить минимальный коэффициент пульсации и непрерывное электроснабжение критичных нагрузок. К её недостаткам относят повышенные массогабаритные показатели, стоимость, а также сложность силовой части и системы управления.

На основе проведенного анализа типовых структурных схем вторичных источников питания (ВИП) можно сделать вывод, что для питания цепей управления электровоза переменного тока наиболее подходящей является схема управляемого выпрямителя с обратной связью. Данный выбор можно аргументировать следующими положениями:

1 Стабильность выходного напряжения. В отличие от неуправляемых выпрямителей, чье выходное напряжение нестабильно при колебаниях в контактной сети, источник с обратной связью активно компенсирует эти колебания, обеспечивая стабильное питание для критичных систем управления и безопасности.

2 Оптимальное соотношение эффективности и сложности. Схема превосходит громоздкие решения с сетевыми трансформаторами по массогабаритным показателям и технически сложные высокочастотные схемы с низким КПД. Такой подход обеспечивает рациональный баланс параметров, соответствующий условиям эксплуатации на ЭПС.

3 Высокоточное регулирование. Использование фазового управления тиристорами на основе сигнала обратной связи реализует принцип компенсационной стабилизации, обеспечивающий более высокую точность поддержания выходного напряжения по сравнению с простыми параметрическими стабилизаторами.

4 Соответствие современным требованиям. Конструкция напрямую отвечает ключевым требованиям к современным ВИП: надежность, минимальный уровень пульсаций и обеспечение бесперебойного питания ответственного оборудования электровоза.

Рассмотрим кратко его устройство. Основные функциональные узлы [4]:

1 Тиристорно-диодный преобразователь. Выполнен по схеме с наложением регулируемого (тиристоры $VS1, VS2$) и нерегулируемого (диоды $VD3-V D5$) напряжений. Регулировка выходного напряжения осуществляется фазовым методом путем управления моментом отпирания тиристоров.

2 Система заряда АКБ. Включает тиристорный ключ ($VS7$), дроссель ($L2$) и трансформатор тока ($T2$) для контроля и формирования сигнала обратной связи по току.

3 Система управления. Состоит из регулятора напряжения (РН) и импульсного регулятора тока заряда: – регулятор напряжения (РН) формирует управляющие импульсы для тиристоров $VS1, VS2$ путем изменения времени разряда конденсаторов в RC -цепях, управляемого сигналом обратной связи по напряжению;

– импульсный регулятор ограничивает ток и напряжение заряда АКБ путем широтно-импульсного регулирования скважности открытия тиристора $VS7$.

4 Обратный тиристорный ключ ($VS8$). Обеспечивает автоматическое подключение нагрузок к аккумуляторной батарее при пропадании питающего напряжения.

С целью обеспечения гальванической развязки первичной сети, согласования уровней напряжения питания бортового оборудования электровоза и обеспечения стабильных выходных характеристик источника питания при колебаниях входного напряжения выполним электромагнитный расчет разделительного трансформатора с двумя вторичными обмотками [5].

Конструкция – двухстержневая, с размещением на каждом стержне сетевых полуобмоток и одной вторичной обмотки, между которыми заложена экранирующая обмотка. Магнитопровод выполнен из стали 3413.

Исходные данные для расчета:

- напряжение первичной обмотки: $U_1 = 380$ В;
- максимальное входное напряжение: $U_{1\max} = 470$ В;
- число вторичных обмоток: $n = 2$;
- напряжение холостого хода вторичной обмотки: $U_{2\text{хх}} = 120$ В;
- допустимое отклонение: $\Delta U_{\text{хх}} = 0,5$ В;
- номинальный ток вторичной обмотки: $I_{2н} = 5$ А;
- частота питающей сети: $f = 50$ Гц;
- активное сечение магнитопровода: $S_a = 0,0038$ м²;
- магнитная индукция: $B_m = 1,5$ Тл.

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_1}{U_{2\text{хх}}} = \frac{380}{120} = 3,16.$$

Мощность трансформатора

$$P = n \cdot I_{2н} \cdot U_{2\text{хх}} = 2 \cdot 5 \cdot 120 = 1200 \text{ Вт.}$$

Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1н} = \frac{P}{U_1} = \frac{1200}{380} = 3,158 \text{ А,}$$

где P – мощность трансформатора;
 U_1 – входное напряжение трансформатора.

Число витков первичной обмотки

$$W_1 = \frac{U_{1\max}}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_a} = \frac{470}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 0,0038} = 371,42,$$

где f – частота питающей сети;
 B_m – магнитная индукция;
 S_a – активное сечение магнитопровода.
 Принимаем $W_1 = 372$ витка.
 Число витков вторичной обмотки

$$W_2 = \frac{W_1}{k} = \frac{371,4}{3,2} = 117,5.$$

Принимаем $W_2 = 118$ витков.
 Сечение провода первичной обмотки

$$S_1 = \frac{I_{1н}}{1,2 \cdot j} = \frac{3,16}{1,2 \cdot 2} = 0,877 \text{ мм}^2,$$

где $I_{1н}$ – номинальный ток первичной обмотки;
 j – плотность тока в обмотках.
 Выбираем провод ПЭВ-2, $S_1 = 0,90 \text{ мм}^2$. Диаметр провода с учетом изоляции $d_1 = 0,78 \times 10^{-3} \text{ м}$.
 Число витков в слое первичной обмотки: 214 витков (2 слоя).
 Число витков в слое вторичной обмотки: 107 витков (2 слоя).
 Суммарная толщина изоляции катушки: 19,825 мм.
 Диаметр катушки: $D_k = 0,139 \text{ м}$.
 Активное сопротивление обмоток (при 115 °С):
 – первичная: $R_{115} = 0,0064 \text{ Ом}$;
 – вторичная: $R_{215} = 0,00536 \text{ Ом}$.

Активные потери в обмотках

$$P_1 = I_{1н}^2 \cdot R_{115} = 3,16^2 \cdot 0,0064 = 0,064 \text{ Вт};$$

$$P_2 = I_{2н}^2 \cdot R_{215} = 5^2 \cdot 0,00536 = 0,134 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери: $\Sigma P = 0,198 \text{ Вт}$.

Средний перегрев обмоток: $\Delta T = 2,16 \text{ °С}$.

Напряжение короткого замыкания: $U_{кз} = 0,197 \text{ В}$.

Качество выходного напряжения оценивается по коэффициенту пульсаций ($K_{ПО}$).

Без сглаживающего фильтра коэффициент пульсаций выходного напряжения составляет 60 %:

$$K_{ПО} = \frac{\Delta U}{U_{ср}} \cdot 100 \% = \frac{30}{50} \cdot 100 \% = 60 \% .$$

Применение LC-фильтра позволяет снизить коэффициент пульсаций до 20 %, что обеспечивает требуемое качество напряжения для питания цепей электровоза

$$K_{ПО} = \frac{\Delta U}{U_{ср}} \cdot 100 \% = \frac{10}{50} \cdot 100 \% = 20 \% .$$

Расчет подтверждает, что конструкция трансформатора (число витков, сечение провода, магнитные параметры) обеспечивает минимальное падение напряжения (0,5 В) и потери мощности (0,2 Вт) в рабочем диапазоне нагрузок, что гарантирует стабильную работу источника питания при колебаниях напряжения в контактной сети.

Как известно, проектирование электронной аппаратуры – циклический процесс, включающий разработку схем, управляющих систем, испытания и доработки. Рост сложности устройств, особенно с использованием высоких частот и аналого-цифровых компонентов, увеличивает число циклов из-за сложности аналитического учёта паразитных эффектов [6].

Решением этой многоступенчатой задачи является внедрение сквозного цикла автоматизированного проектирования (САПР), который объединяет моделирование как идеальной схемы, так и реальной конструкции. Среди достаточного множества инструментов моделирования [7–9] можно выделить среду динамического моделирования *SimInTech* ввиду ряда неоспоримых преимуществ [10, 11]:

- обширная библиотека электронных и электромеханических компонентов;
- встроенные средства для ведения проектов и визуализации результатов прямо на схеме;
- уточнённый анализ процессов, включая вклад каждого компонента в общее поведение системы;
- высокая надёжность расчёта переходных процессов;
- инструменты для создания новых моделей компонентов и их графических символов;
- возможно работать с русскоязычным интерфейсом и документацией, что ускоряет освоение и работу.

и работу.

Все эти возможности реализует моделирование процессов в источнике с применением программы *SimInTech*.

Математическая модель преобразователя приведена на рис. 1.

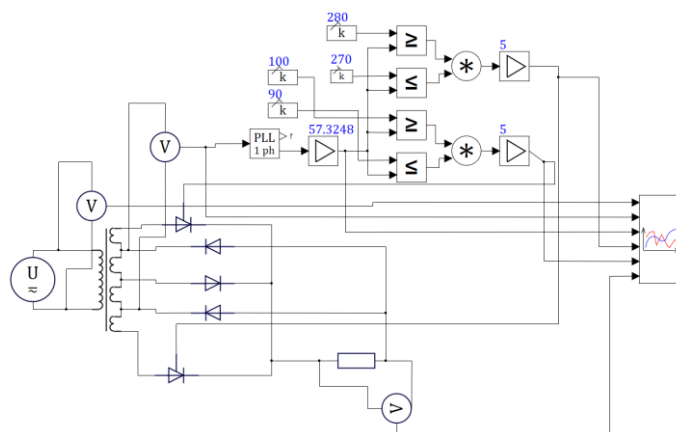


Рис. 1. Схема модели источника питания

В схеме проведено имитационное моделирование части источника, которая включает в себя следующие элементы: источник переменного напряжения, имитирующий напряжение в сети; разделительный трансформатор, обеспечивающий гальваническую развязку сети и цепей источника питания; плечо неуправляемого, диодного выпрямителя; тиристор, обеспечивающий управляемое напряжение; формирователь импульсов управления, для открытия тиристора, которые приходят с импульсного трансформатора регулятора напряжения; терминатор линии (сохраняет целостность цепи), ставится в том случае, если сигнал не используется; цепь нагрузки, отслеживающая уровень напряжения сети; формирователь графиков (все результаты моделирования заносятся в этот блок и формируются в виде графиков внутри блока).

Блок *PLL* реализует модель устройства фазовой автоподстройки частоты для однофазного сигнала. Структура модели устройства фазовой автоподстройки частоты для однофазного сигнала показана на рис. 2.

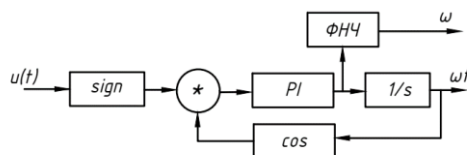


Рис. 2. Структура устройства ФАПЧ для однофазного сигнала

Блок служит для определения функции угла (ωt) синусоидального сигнала, который используется, например, в блоке ЭЦД – генератор импульсов (однофазный, двухпульсный). Угол изменяется в диапазоне от 0 до 2π , причем значение 0 соответствует началу положительной полуволны входного сигнала.

Сигнал после пи-регулятора (PI) представляет собой частоту входного сигнала, а после интегрирования угол. На первом периоде входного сигнала значение угла (ωt) может не соответствовать реальным значениям.

Рассмотрим более подробно процессы, происходящие в источнике питания и регуляторе напряжения, на примере выходных осциллограмм, полученных с помощью вывода данных *SimInTech*.

На рис. 3–5 представлены графики переходных процессов, протекающих в моделях. На графиках приняты следующие обозначения: U_1 – напряжение первичной обмотки трансформатора, U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора, угол – функция (ωt) синусоидального сигнала вторичной обмотки трансформатора, $T1$ и $T2$ – сигналы, подаваемые на управляющий электрод тиристоров $T1$ и $T2$ для их отпирания, U_n – напряжение на нагрузке.

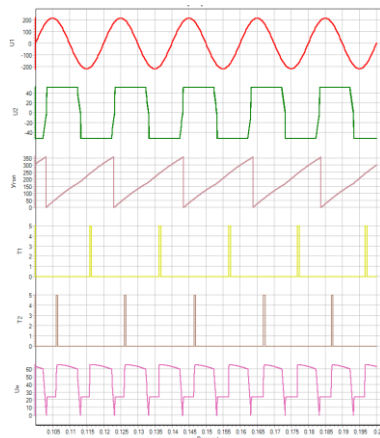


Рис. 3. Характеристики источника питания при углах регулирования 60° и 240°

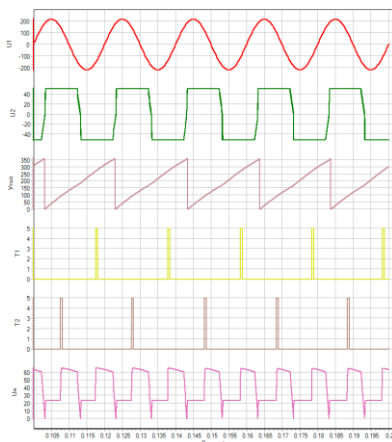


Рис. 4. Характеристики источника питания при углах регулирования 90° и 270°

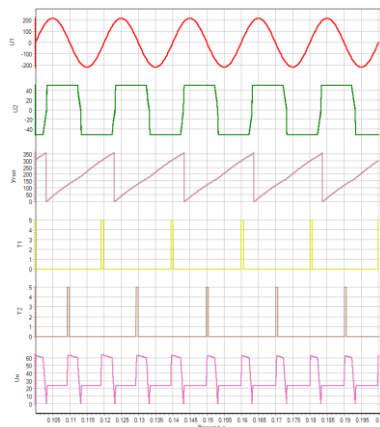


Рис. 5. Характеристики источника питания при углах регулирования 120° и 300°

Проведем анализ зависимости выходного напряжения при рассматриваемых углах регулирования.

При углах 60° и 240° (см. рис. 3) тиристоры открываются с умеренной задержкой относительно начала полуволны напряжения. Нагрузка получает значительную часть полуволны напряжения, что обеспечивает относительно высокое среднее значение U_n . Форма выходного напряжения демонстрирует характерные «срезы» в начале каждой полуволны, соответствующие задержке открытия тиристоров.

При углах 90° и 270° (см. рис. 4) задержка открытия тиристоров увеличивается, что приводит к сокращению времени проводимости каждого тиристора. Среднее значение напряжения на нагрузке снижается по сравнению с предыдущим случаем (см. рис. 3). Форма напряжения становится более «обрезанной», что визуально отражает уменьшение площади под кривые напряжения.

При углах 120° и 300° (см. рис. 5) тиристоры открываются ещё позже, ближе к концу полуволны. Время проводимости минимально среди двух рассмотренных случаев, что приводит к дальнейшему снижению среднего выходного напряжения. Напряжение на нагрузке принимает форму коротких импульсов, следующих за каждым пиком полуволны.

Выводы

Проведённое имитационное моделирование подтвердило адекватность математической модели работы управляемого выпрямителя, реализующего функцию источника вторичного питания. Увеличение угла регулирования приводит к сокращению длительности открытого состояния тиристоров и, как следствие, к снижению среднего напряжения на нагрузке, что полностью соответствует теоретическим основам электроники и подтверждает практическую применимость модели для проектирования и анализа источников вторичного питания.

Использование программы *SimInTech* позволило провести визуализацию и анализ переходных процессов системы, что особенно важно при проектировании схем, где взаимодействие элементов может существенно влиять на работу устройства.

Таким образом, модель может быть использована для дальнейшего проведения испытаний при различных внешних воздействиях, анализа устойчивости и оптимизации системы управления.

Список литературы

- 1 **Иксар, Е. В.** Повышение энергоэффективности источников вторичного питания в схеме управления тяговым приводом электроподвижного состава / Е. В. Иксар // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 17–18 октября 2024 года. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2024. – С. 373–379.
- 2 **Самойлов, А. Г.** Устройства электропитания : учебное пособие / А. Г. Самойлов, С. А. Самойлов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 160 с. – ISBN 978-5-9984-1183-0.
- 3 **Милютин, В. С.** Источники питания для сварки / В. С. Милютин, М. П. Шалимов, С. М. Шанчуров. – Москва : Айрис-пресс, 2007. – 384 с. – ISBN 978-5-8112-2741-9.
- 4 **Электровоз ЭП1М (ЭП1П).** Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы. ИДМБ.661142–01РЭ1. – ОАО «ВЭЛНИИ», 2006. – 1306 с.
- 5 **Ермолин, Н. П.** Расчет трансформаторов малой мощности / Н. П. Ермолин. – Москва : Энергия, Ленинград, 1969. – 192 с.
- 6 **Худяков, В. Ф.** Моделирование источников вторичного электропитания в среде MATLAB 7.x : учебное пособие / В. Ф. Худяков, В. А. Хабuzов. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2008. – 332 с.

References

- 1 **Iksar, E. V.** Increasing the energy efficiency of secondary power sources in the control circuit of the traction drive of electric rolling stock / E. V. Iksar // Innovative Technologies in Water, Utilities and Water Transport : proceedings of the International scientific and technical conference, Minsk, October 17–18, 2024. – Minsk : Belarusian National Technical University, 2024. – P. 373–379.
- 2 **Samoylov, A. G.** Power supply devices : textbook / A. G. Samoylov, S. A. Samoylov ; Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs. – Vladimir : VISU Publishing House, 2021. – 160 p. – ISBN 978-5-9984-1183-0.
- 3 **Milyutin, V. S.** Power sources for welding / V. S. Milyutin, M. P. Shalimov, S. M. Shanchurov. – Moscow : Iris-press, 2007. – 384 p. – ISBN 978-5-8112-2741-9.
- 4 **Electric locomotive EP1M (EP1P).** Operation manual. Book 1. Description and operation. Electrical circuits. IDMB.661142–01RE1. – JSC “VEINII”, 2006. – 1306 p.
- 5 **Ermolin, N. P.** Calculation of Low-Power Transformers / N. P. Ermolin. – Moscow : Energiya, Leningrad, 1969. – 192 p.
- 6 **Khudyakov, V. F.** Modeling of secondary power sources in the MATLAB 7.x environment : a textbook / V. F. Khudyakov, V. A. Khabuzov. – Saint-Petersburg : GUAP, 2008. – 332 p.

7 Моделирование объёмных характеристик области нагрева контактного провода подвижной электрической дугой и их вычисление в среде MathCAD / И. А. Кондрашов, Ю. Г. Семенов, А. Д. Цой, Д. А. Кецакало // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (81). – С. 140–148. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_140.

8 **Сироткин, В. В.** Эффективное использование энергии рекуперации в тяговой сети электропитания / В. В. Сироткин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (94). – С. 100–109. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_100.

9 **Шевкунова, А. В.** Моделирование работы тиристорного выпрямителя / А. В. Шевкунова, Д. В. Ольховатов // Молодежь и наука : актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 307–311.

10 **Ольховатов, Д. В.** Разработка энергоэффективного асинхронного электропривода мотор-вентилятора электровоза / Д. В. Ольховатов, А. В. Шевкунова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (59). – С. 46–55. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-3-46-55.

11 **Зарифьян, А. А.** Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (83). – С. 81–89. – DOI 10.46973/0201727X_2021_3_81.

7 Modeling the volumetric characteristics of the contact wire heating area by a moving electric arc and their calculation in the MathCAD environment / I. A. Kondrashov, Yu. G. Semenov, A. D. Tsoy, D. A. Ketskalov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 140–148. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_140.

8 **Sirotkin, V. V.** Efficient use of regeneration energy in a traction power supply network / V. V. Sirotkin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 2 (94). – P. 100–109. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_100.

9 **Shevkunova, A. V.** Modeling of a thyristor rectifier operation / A. V. Shevkunova, D. V. Olkhovатов // Youth and science : actual problems of fundamental and applied research : materials of the VIII All-Russian national scientific conference of young scientists, Komsomolsk-on-Amur, April 07–11, 2025. – Komsomolsk-on-Amur : Komsomolsk-on-Amur State University, 2025. – P. 307–311.

10 **Olkhovатов, D. V.** Development of an energy-efficient asynchronous motor drive for an electric locomotive motor-fan / D. V. Olkhovатов, A. V. Shevkunova // Vestnik of the Ural State University of Railway Transport. – 2023. – No. 3 (59). – P. 46–55. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-3-46-55.

11 **Zarifyan, A. A.** Study of electromechanical processes in a commutator traction motor taking into account losses / A. A. Zarifyan, A. Sh. Mustafin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2021. – No. 3 (83). – P. 81–89. – DOI 10.46973/0201727X_2021_3_81.

D. V. Olkhovатов, A. V. Shevkunova, P. Yu. Konovalov, D. E. Pritykin, Ya. K. Sklifus

MODELING OF THE VOLTAGE STABILIZATION SYSTEM FOR THE SECONDARY POWER SUPPLY OF ELECTRIC LOCOMOTIVE CONTROL CIRCUITS

Abstract. Instability of the output voltage of electric locomotive secondary power supplies during significant voltage fluctuations in the overhead contact line leads to malfunctions of equipment, failures, and economic losses from their downtime. As a solution, the development of an improved design of a controlled secondary voltage source with an automatic regulation system that ensures output voltage stabilization is proposed. To achieve this goal, the work involved an analysis of typical secondary power supply circuits, a calculation of key elements such as an isolation transformer, and the development of a control system based on a voltage regulator, verified through simulation modeling in the SimInTech environment. The simulation results confirmed the operability and effectiveness of the developed control system, demonstrating its ability to maintain a stable output voltage during input voltage changes.

Keywords: electric locomotive, secondary power supply, control circuits, controlled rectifier, voltage stabilization, mathematical modeling.

For citation: Modeling of the voltage stabilization system for the secondary power supply of electric locomotive control circuits / D. V. Olkhovатов, A. V. Shevkunova, P. Yu. Konovalov [et. al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 179–187. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_4_179.

Сведения об авторах

Ольховатов Дмитрий Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Dmolkh@yandex.ru

Шевкунова Анастасия Владимировна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: nastya3051990@mail.ru

Коновалов Павел Юрьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: pk_zao@dek.rgups.ru

Притыкин Дмитрий Евгеньевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
Центр развития инновационных компетенций,
кандидат технических наук, доцент,
директор,
e-mail: pde_crik@rgups.ru

Склифус Ярослав Константинович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
Центр дизайна, проектирования и моделирования,
кандидат технических наук, доцент,
начальник центра,
e-mail: Yaroslav.sklifus@mail.ru

Information about the authors

Olkhovатов Dmitry Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Dmolkh@yandex.ru

Shevkunova Anastasiya Vladimirovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: nastya3051990@mail.ru

Konovalov Pavel Yurievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: pk_zao@dek.rgups.ru

Pritykin Dmitry Evgenievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Center for the Development of Innovative Competencies,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Director,
e-mail: pde_crik@rgups.ru

Sklifus Yaroslav Konstantinovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Traction Rolling Stock”,
Center for Design, Engineering and Modeling,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Center,
e-mail: Yaroslav.sklifus@mail.ru

П. А. Поляков, И. А. Яицков, А. А. Кузькин, А. В. Мизюкаев, Г. И. Галимова

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА ДИСКОВО-КОЛОДОЧНОГО ТИПА ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ПРИЖАТИЯ ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКИ

Аннотация. Тормозное устройство осевого действия, к которому относится тормоз дисково-колодочного типа, постоянно совершенствуется. В эру цифровизации во всех отраслях не прекращаются попытки создать тормозное устройство с электромеханическим приводом. На данный момент предлагаемые конструкции электромеханических тормозов обладают рядом существенных недостатков, которые выявляются как в процессе проектирования, так и в процессе эксплуатации. Для решения этой задачи необходимо разработать промежуточную стадию тормозного устройства, работающего от «традиционных» приводов транспортного средства и изменяющего тормозные характеристики под изменяющиеся внешние условия. Для этого необходимо тормозное устройство оснастить блоком изменения тормозных характеристик при взаимодействии рабочих пар тормоза под дискретные внешние условия. В качестве основной изменяющейся тормозной характеристики был выбран тормозной момент. В результате проведенных исследований была разработана конструкция, которая позволяет изменять не только положение давления в системе «привод – колодка – диск», но и нормальную силу в паре тормоза.

Ключевые слова: торможение, тормозное устройство, механизм регулирования тормозного момента, нормальная сила, напряжение поверхности контакта.

Для цитирования: Изменение характеристик тормозного устройства дисково-колодочного типа путем совершенствования механизма прижатия тормозной колодки / П. А. Поляков, И. А. Яицков, А. А. Кузькин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 188–198. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_188.

Введение

В работе [1] экспериментально исследовался тормозной момент барабанного тормоза при циклическом торможении. Определено влияние скорости вращения барабана и количество тормозных циклов на развиваемый тормозной момент и на температурное поле тормозного барабана. На поверхности трения тормоза температура зависела от начальной скорости вращения барабана и росла с каждым новым циклом взаимодействия рабочих пар трения. В статье [2] исследовались дискретные температурные поля как для сплошных, так и для вентилируемых дисков тормозов при единичном торможении. Модели конечных элементов строились для трёх типов дисков: сплошных, вентилируемых с 32 рёбрами и вентилируемых с 42 рёбрами. Для каждого из моделируемых дисков задавались разные материалы: серый чугун, сталь AISI 420 и сплав INCONEL 718. При моделировании оценка тепловой нагруженности проводилась с учетом температуры на рабочей поверхности диска и с учетом изменения температуры по толщине диска. Серый чугун показал самые низкие максимальные температуры благодаря высокой теплопроводности, а INCONEL 718 – самые высокие температуры из-за низкой теплопроводности. Несмотря на улучшенные охлаждающие свойства, вентилируемые диски показали более высокие максимальные температуры поверхности по сравнению с цельными дисками из-за меньшей теплоёмкости. В статье [3] систематически рассматриваются структура электромеханического тормоза, моделирование процесса взаимодействия рабочих поверхностей, оценка усилия прижатия колодки к поверхности диска и оценка управления процессом торможения. В статье [4] оценивалось влияние износа тормозных колодок на реакцию электромеханической дисковой тормозной системы с помощью модели, построенной в MATLAB/Simulink. Сравнение тормозных сил моделировалось для тормозных устройств без износа и с износом при перманентном и дискретных значениях коэффициента трения на основе построенной тепловой модели. Тормозная сила увеличивалась при дискретном значении коэффициента трения, изменяемого примерно на 0,06 %. Переменный коэффициент трения приводил к более высокому износу, чем постоянный коэффициент трения, примерно на 30 %. В статье [5] был проведен анализ патентов и

литературных источников, посвященных разработке приводов электромеханических тормозов. В результате анализа электромеханический тормоз структурировался на следующие подсистемы: подсистема фрикционного узла, подсистема обеспечения стояночного тормоза, подсистема компенсации зазора между рабочими парами трения, подсистема возврата в исходное положение и подсистема датчиков управления тормозным устройством. На основе базовой структуры обобщены алгоритм оценки для непрямого управления усилием зажима и алгоритм прямого управления усилием зажима привода. В рамках исследования [6] рассматривались типовые структуры электромеханических тормозов, проводилась оценка требуемого уровня активной безопасности. Для точного анализа основных факторов, влияющих на вероятностную метрику технических отказов в тормозных устройствах, дополнительно рассматривалась частота сбоев в работе приводов тормозных устройств. Были рассчитаны частоты отказов в работе критически важных компонентов электромеханических тормозов, в частности матрицы приводов тормозных устройств. Результаты показали, что неработоспособность матрицы приводов тормозных устройств составляла $9,244 \times 10^{-3}$ ошибок во времени. Показатели метрики вероятностных технических отказов систем электромеханического тормоза для каждой цели безопасности составляют 6,14, 5,89 и 6,03 сбоев во времени, что соответствовало требуемому уровню активной безопасности. В статье [7] приводится схема работы тормозного устройства, оснащенного системой адаптации к внешним изменяющимся условиям. В качестве параметра, который мог быть изменен при взаимодействии рабочих пар фрикционного узла, предложен центр давления в системе «привод – тормозная колодка – тормозной диск». В статьях [8] и [9] рассмотрены нестационарные процессы динамики как автомобиля, так и вагона подвижного состава. В связи с перемещениями кузова транспортного средства изменяются нормальные и касательные силы в контакте колеса с поверхностью. Следовательно, на транспортных средствах необходимо корректировать тормозной момент на колесах разных осей. Для автомобиля актуально также изменение тормозных моментов между колесами одной оси.

Проанализировав результаты прошедших исследований, можно сделать вывод, что исследования в области тормозных устройств являются достаточно насыщенными по содержанию. Применение электромеханических тормозных устройств в данный момент ограничено концептуальными моделями, базирующимися на легковой технике. Основная проблематика электромеханических тормозных устройств заключается в соотношении габаритных размеров электропривода и его мощности, а также в безотказной работе тормозных устройств с электромеханическим приводом ввиду постоянного изменения внешних условий. Для широкого применения, в том числе эксплуатации на коммерческих транспортных средствах и на подвижном составе, необходима переходная версия конструктивного решения, а именно тормозное устройство с традиционным приводом, но с встроенным адаптированным блоком управления тормозным моментом. Блок управления тормозным моментом должен изменять тормозной момент, полученный от привода тормозной системы, в зависимости от изменяемых внешних условий.

Материалы и методы

На основе анализа можно сформулировать цель исследования, заключающуюся в регулировании тормозных свойств во времени для адаптации к внешним дискретным условиям.

Для обеспечения изменения тормозных свойств целесообразно использовать принцип смещения положения центра давления. В тормозном устройстве помимо механизма прижатия возможна встройка механизма регулирования тормозного момента. В качестве механизма регулирования рекомендуется применение электромеханического привода для обеспечения поворота прижимающих элементов. Для реализации процесса изменения тормозного момента во времени торможения была разработана трехмерная модель тормозного устройства с электромеханическим приводом для регулировки (рис. 1).

Согласно разработанной трехмерной модели тормозное устройство состоит из механизма прижатия, выполненного с помощью кулачкового механизма, механизма регулирования, реализующего изменение тормозного момента с помощью электромеханического привода и фрикционного узла. Механизм прижатия осуществляет передачу усилия от штока пневматической камеры через кулачки на левый и правый прижимающие элементы, которые обеспечивают прижатие внутренней колодки фрикционного узла. Для воздействия на внешнюю колодку кулачки надавливают на заднюю стенку суппорта и перемещают суппорт относительно скобы тормозного устройства. Прижимающие элементы имеют по три площадки контакта с внутренней колодкой тормоза, размещенные на элементе под углом 120° (рис. 2).

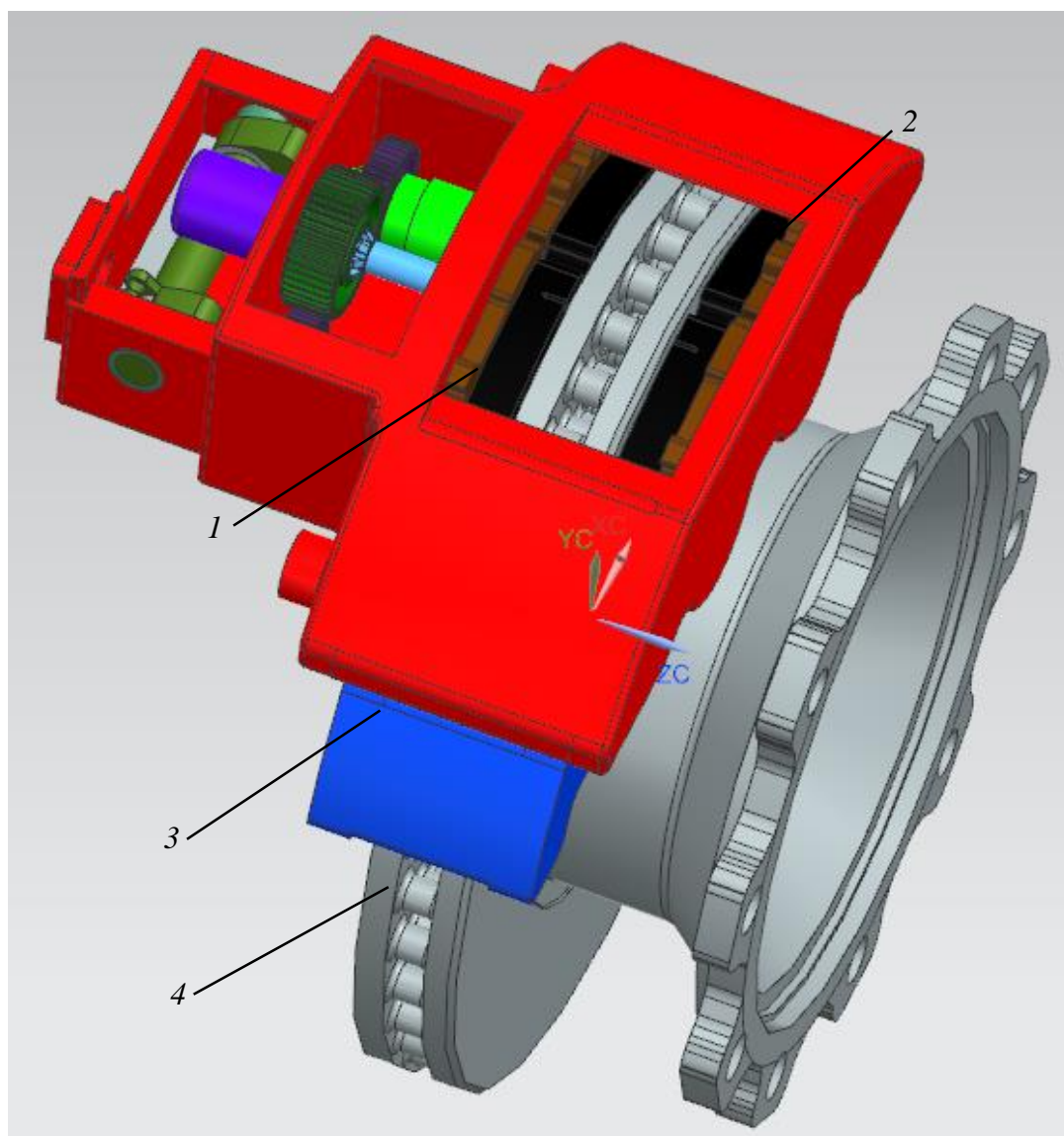


Рис. 1. Дисковый тормозной механизм колодочного типа с сегментными колодками:
1 – прижимающий элемент; 2 – тормозная колодка; 3 – фрикционная накладка;
4 – тормозной диск

Для обеспечения вращения необходим электродвигатель, который вращает шестерню для передачи вращения и изменения положения контактов прижимающих элементов.

Для математического моделирования процесса взаимодействия колодок с тормозным диском геометрия трехмерной модели импортировалась в Recurdyn.

Для моделирования геометрия модели тормозного устройства дисково-колодочного типа была преобразована в твердотельную модель с 10 основными телами. Прижимающие элементы объединялись с шестернями в единое тело для облегчения моделирования. Для обеспечения фиксации тел было назначено 10 шарниров. Скоба устройства крепилась к базе с помощью фиксирующего шарнира Fixed_bracket_base. Суппорт имел перемещение относительно скобы устройства с помощью двух шарниров TraJoint1(2)_support_bracket. Для обеспечения перемещения внутренней и внешней колодок были созданы по два шарнира на каждую колодку TraJoint1(2)_outer(inner)_shoe_support. Для обеспечения вращения тормозного диска относительно базовой поверхности был задан шарнир RevJoint_disk_base в оси тормозного диска. Вращение оси кулачка относительно суппорта тормоза обеспечивал шарнир RevJoint_cam_support. Для одновременного перемещения и вращения относительно своих осей прижимающих элементов были заданы шарниры Cylindrical_left(right)_clamping_support. Для соединения твердых тел колодки и накладки между собой были созданы шарниры Fixed в 12 точках (рис. 3).

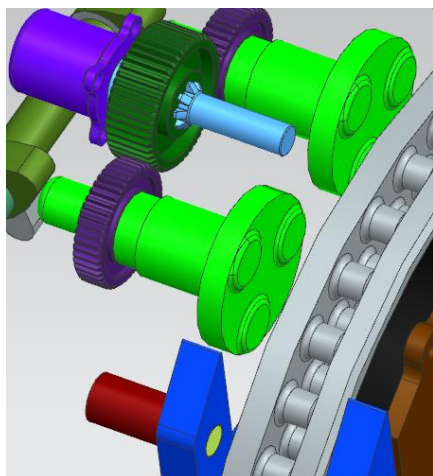


Рис. 2. Механизм регулирования тормозного момента

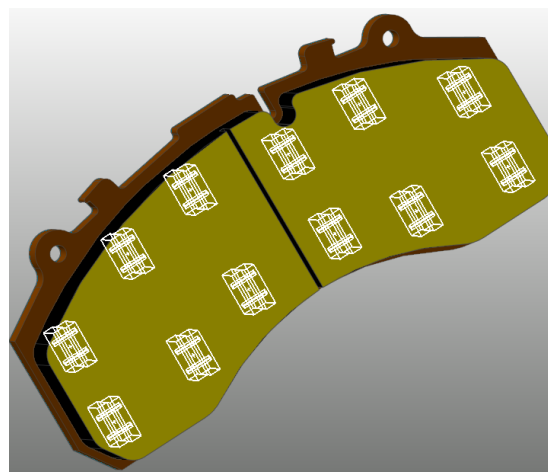


Рис. 3. Крепление накладки к колодке тормозного устройства

Для обеспечения взаимодействия контактов между поверхностями были созданы контакты между прижимающими элементами и кулачками (*GeoSurContact_left(right)_clamping_cam*), между суппортом и кулачками (*GeoSurContact1(2)_cam_support*). Для создания прижатия между внешней колодкой и тормозным диском были заданы контакты (*GeoSurContact_outer_shoe_support*, *GeoSurContact_outer_overlay_disk*). Для прижатия внутренней колодки к поверхности диска были созданы контакты (*GeoSurContact_left(right)_clamping_inner_shoe*, *GeoSurContact_inner_overlay_disk*). В качестве ограничений в перемещении тел относительно других тел были заданы контакты (*GeoSurContact_left(right)_clamping_support*, *GeoSurContact_support_bracket*). Для контактирующих металлических поверхностей были заданы следующие параметры: $c = 110\,000$ Н/мм; $f = 0,1$ [10]. Для контактирующих поверхностей накладки и диска при жесткости $c = 100\,000$ Н/мм задавался увеличенный коэффициент трения $f = 0,3$. Кроме того, соприкасающиеся поверхности колодки с диском были преобразованы в податливые тела (рис. 4).

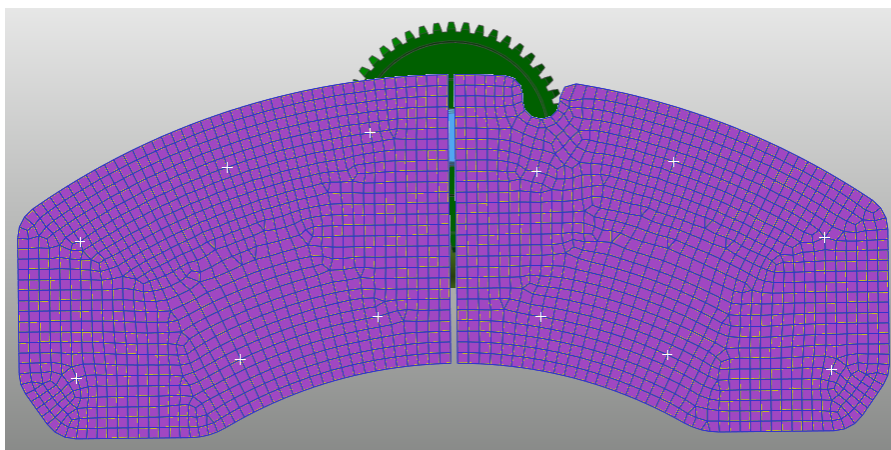


Рис. 4. Сетка поверхности накладки колодки тормозного устройства

При образовании сетки поверхности накладки внутренней колодки было образовано 2329 узлов, а для внешней колодки – 2655 узлов. Для поверхности взаимодействия были заданы следующие параметры: модуль Юнга $E = 110$ ГПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$ [11]. Белыми метками обозначены точки крепления накладки к колодке через фиксирующие шарниры.

Работа привода начиналась с 0,25 с до 0,5 с и заключалась в повороте кулачка на $26,5^\circ$ и последующем удержании в данном положении. Вращение прижимающих элементов производилось ступенчато:

- первая ступень изменения положения контактных площадок прижимающих элементов (с 0,75 с до 0,8 с на 30° и с 0,8 с до 0,85 с на 30° (рис. 5, а));
- вторая ступень (с 1,25 с до 1,3 с на 30° и с 1,3 с до 1,35 с на 30° (рис. 5, б)).

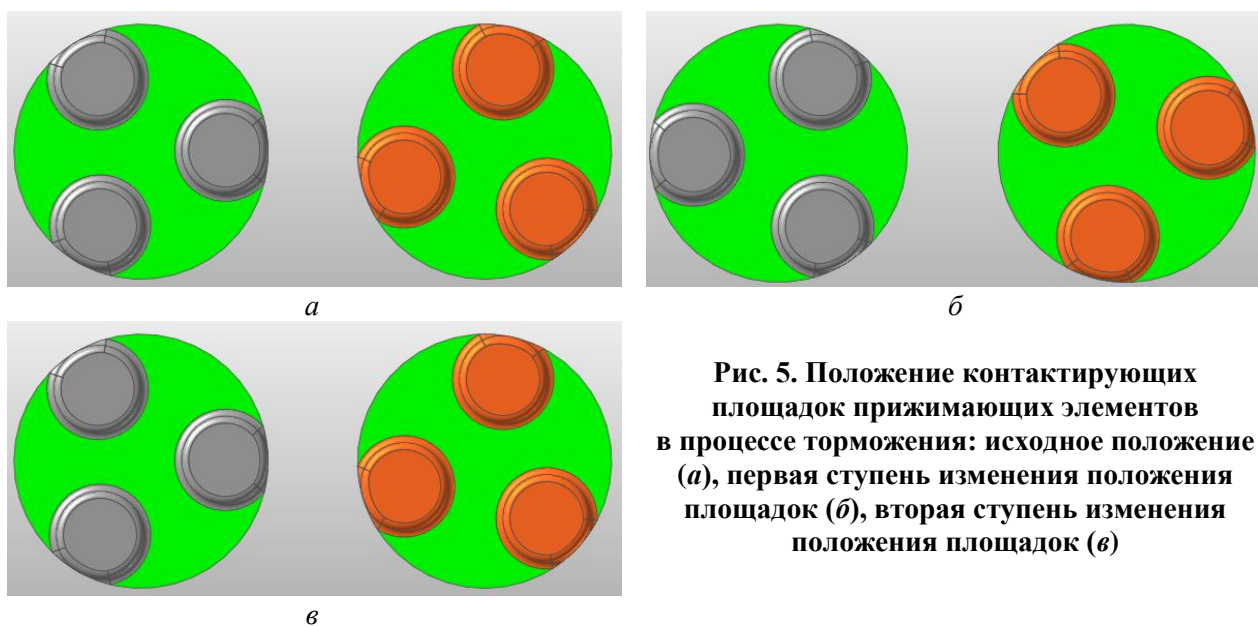


Рис. 5. Положение контактирующих площадок прижимающих элементов в процессе торможения: исходное положение (а), первая ступень изменения положения площадок (б), вторая ступень изменения положения площадок (в)

Результаты моделирования

После создания геометрии, формулирования законов относительного перемещения и математического описания контактирующих поверхностей был проведен динамический и кинематический анализ предложенной конструкции тормозного устройства дисково-колодочного типа.

В качестве основных параметров оценки изменения тормозного момента были использованы нормальная и тангенциальная силы в контакте внутренней и внешней накладок с поверхностями диска и напряжения в узлах сопряжения колодки и накладки.

На рис. 6 представлены результаты изменения нормальной и тангенциальной сил в контакте в зависимости от времени и кривой изменения положения прижимающих элементов. После начала вращения прижимающих элементов вокруг своей оси видна просадка нормальной силы (0,75 с), тогда как после завершения процесса вращения прижимающих элементов на 60° (0,85 с) наблюдался рост нормальной и тангенциальной сил.

При дальнейшем повороте на 60° наблюдалась просадка нормальной силы в начале поворота вокруг своей оси прижимающих элементов, а после завершения поворота прижимающего элемента наблюдались значения нормальных и тангенциальных сил, такие же, как и до начала вращения прижимающих элементов.

На основе полученной информации можно сделать вывод о том, что изменение положения точек контакта прижимающих элементов во взаимодействии с колодкой оказывает влияние на изменение величин прижимающих сил в контакте.

Две контактирующие площадки, оказывающие воздействие на верхний край колодки, приводят к увеличению нормальных сил в контакте, тогда как при одной давящей площадке на верхний край уменьшают нормальную силу в сопрягаемых поверхностях накладки и диска. Результаты моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение нормальной нагрузки в контактирующих площадках фрикционного узла

Интервал времени, с	N_{\max} , Н	N_{\min} , Н	$N_{\text{ср}}$, Н	$N_{\text{ско}}$, Н	N_{\max} , Н	N_{\min} , Н	$N_{\text{ср}}$, Н	$N_{\text{ско}}$, Н
	Внутренняя колодка				Внешняя колодка			
0,5–0,75	56,07	54,14	55,137	55,139	26,15	25,61	25,932	25,932
0,85–1,25	56,91	55,37	55,977	55,978	27,07	26,17	26,396	26,397
1,35–1,65	56,28	54,52	55,489	55,49	26,41	25,94	26,15	26,151

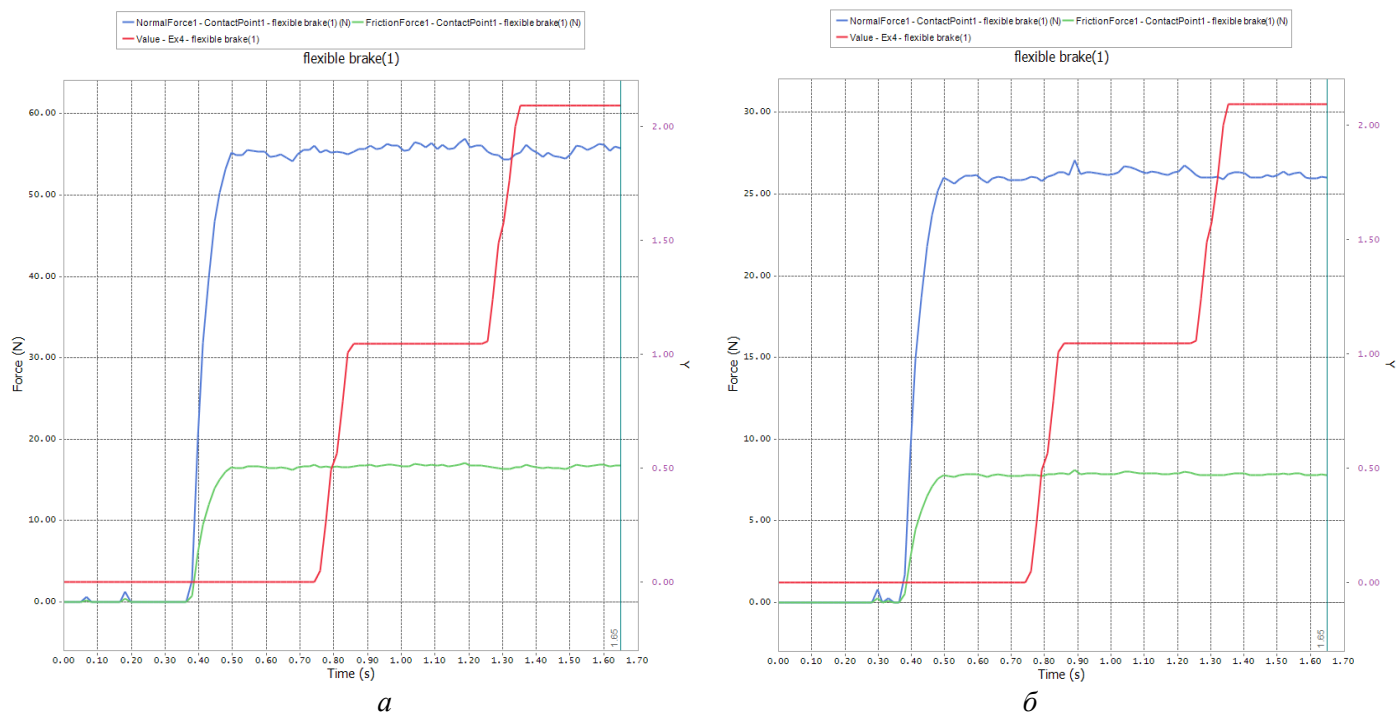


Рис. 6. Изменение нормальных и тангенциальных сил в контакте накладок внутренней (а) и внешней (б) колодок с поверхностями тормозного диска

После изменения положения контактирующих площадок прижимающих элементов (первая ступень) нормальная сила возрастала на 1,52 и 1,78 % для внутренней и внешней колодок соответственно. При изменении положения контактирующих площадок в рамках второй ступени нормальная сила снизилась на 0,87 и 0,94 % для внутренней и внешней колодок соответственно.

Для оценки радиуса взаимодействия контактирующих площадок использовалось напряжение на поверхностях накладок внешней и внутренней колодок тормоза.

Основные напряжения в контакте между накладкой и поверхностью диска сосредоточены в пятнах крепления накладок к колодкам (табл. 2), так как через них передается прижимающая сила со стороны привода тормоза.

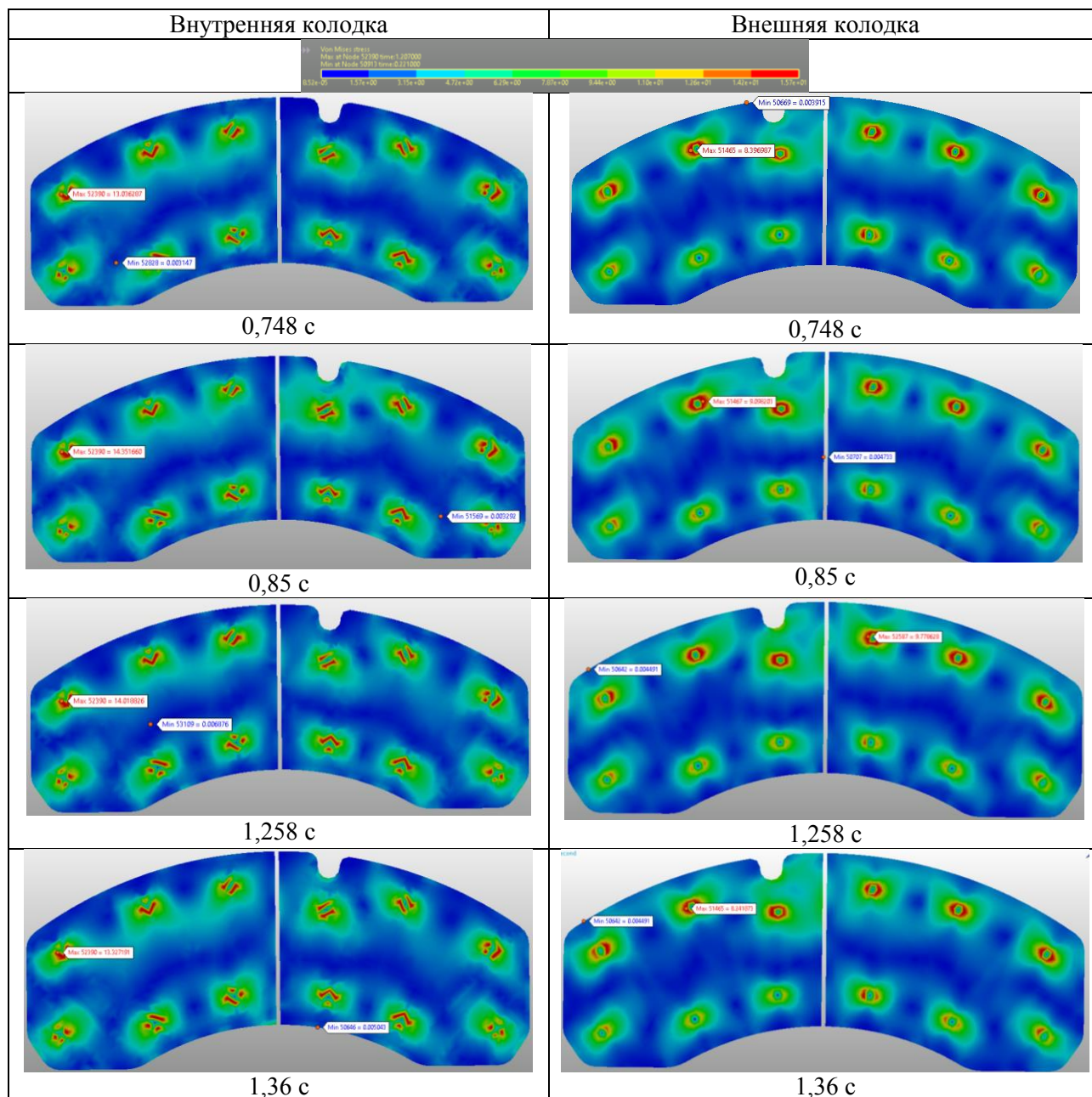
Согласно полученным результатам с начала работы прижимающего механизма до момента изменения положения контактных площадок прижимающих элементов максимальное значение напряжения на поверхности внутренней колодки составляло 13,04 МПа, тогда как после изменения положения в рамках первой ступени (0,85 с) напряжение возросло до 14,35 МПа. Следовательно, положение центра давления в паре «внутренняя колодка – тормозной диск» сместилось к верхнему краю колодки. После второй ступени изменения положения контактных площадок (с 1,25 до 1,35 с) напряжение на поверхности контакта внутренней колодки снизилось с 14,01 до 13,32 МПа.

Для внутренней колодки до начала изменения положения контактных площадок прижимающих элементов напряжение составляло 8,39 МПа, после вращения прижимающих элементов в рамках параметров первой ступени напряжение возросло 9,09 МПа. После работы механизма изменения положения контактных площадок прижимающих элементов во второй ступени напряжение было снижено с 9,77 до 8,24 МПа.

Основные параметры изменения напряжений на контактирующих поверхностях внутренней и внешней тормозных колодок за время взаимодействия сведены в табл. 3.

Таблица 2

**Изменение напряжений на контактирующих поверхностях накладок
внешней и внутренней тормозных колодок тормоза**



Для наглядности влияния работы механизма изменения тормозного момента приведены графики напряжений в узлах, расположенных в верхней и нижней частях накладок в местах соединения колодки и накладки через фиксирующий шарнир. Особенность выбора этих узлов состояла в их нахождении на одном радиусе. Для внешней колодки были выбраны узел под номером 52640, расположенный в верхнем секторе накладки, и узел 52662, размещенный в нижней части накладки. Для внутренней колодки выбирались узлы под номерами 52341 и 52352, расположенные в верхнем и нижнем секторах накладки соответственно.

Результаты изменения напряжений на поверхностях накладок тормозных колодок во время торможения представлены на рис. 7.

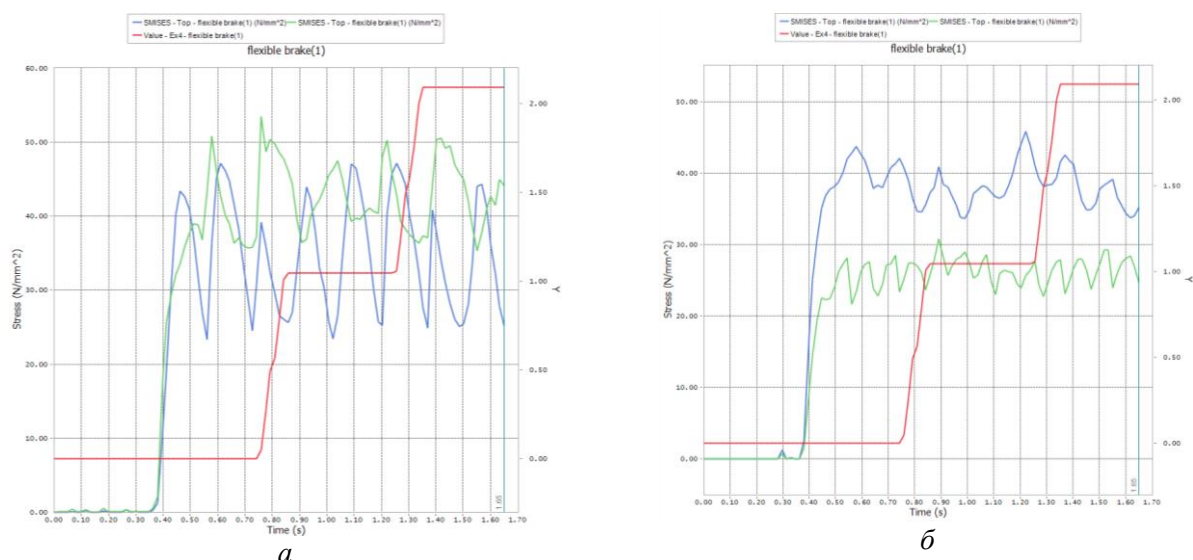


Рис. 7. Изменения напряжений на поверхностях накладок внутренней (а) и внешней (б) тормозных колодок во время торможения: для внутренней колодки напряжение в узле 52341 (синяя линия), напряжение в узле 52352 (зеленая линия); для внешней колодки напряжение в узле 52640 (синяя линия), напряжение в узле 52662 (зеленая линия)

Таблица 3

Изменение напряжений на верхнем и нижнем краях накладок внешней и внутренней тормозных колодок тормоза

Интервал времени, с	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	$\sigma_{\text{ско}}$, МПа	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	$\sigma_{\text{ско}}$, МПа
	Внутренняя колодка (узел 52341)				Внешняя колодка (узел 52640)			
0,5–0,75	47,19	23,39	35,8	36,6	43,75	25,01	38,3	38,5
0,85–1,25	47,17	23,43	36,32	37,17	45,87	33,64	38,4	38,54
1,35–1,65	44,29	24,9	32,31	32,96	42,55	33,74	37,38	37,48
Внутренняя колодка (узел 52352)				Внешняя колодка (узел 52662)				
0,5–0,75	50,84	35,69	39,66	39,88	28,5	21,69	25,69	25,78
0,85–1,25	50,31	36,46	41,82	41,98	30,82	22,99	26,61	26,66
1,35–1,65	50,61	35,32	43,38	43,63	29,25	23,13	26,63	26,69

При первой ступени изменения положения контактных площадок прижимающих элементов напряжение на поверхности для верхних частей внутренней и внешней колодок увеличивалось на 1,6 и на 0,1 % соответственно. Для нижних частей накладок внутренней и внешней колодок напряжение на поверхностях показало рост на 5,2 и на 3,4 % соответственно. Несмотря на рост среднеквадратичных значений, тренд на снижение графиков напряжений на контактных поверхностях тормоза виден на рис. 7.

При реализации второй ступени изменения положения контактных площадок прижимающих элементов напряжение на поверхностях для верхних частей накладок внутренней и внешней колодок уменьшилось на 11,3 и на 2,7 % соответственно, тогда как для нижних частей накладок внутренней и внешней колодок был достигнут рост на 3,9 и на 0,1 % соответственно.

Исходя из полученных результатов изменений напряжений, можно увидеть смещение положения центра давления в радиальном направлении тормозного диска в сторону увеличенной зоны напряжения на поверхностях контакта.

Заключение

На основе результатов исследования можно сделать вывод о том, что изменение контактирующих поверхностей прижимающих элементов оказывает влияние не только на положение центра давления в паре «тормозная колодка – тормозной диск», но и на величину нормальных и тангенциальных сил в контакте накладок и диска. Полученные результаты математического моделирования процесса взаимодействия контактных поверхностей фрикционного узла тормозного устройства с изменением положения контактирующих поверхностей прижимающих элементов показали изменение нормальных

и тангенциальных сил во времени. При воздействии четырех контактирующих площадок прижимающих элементов на верхнюю часть (первая ступень изменения положения) колодки происходит увеличение нормальных сил на 1,52 и 1,78 % для внутренней и внешней колодок соответственно, тогда как при воздействии двух контактирующих площадок прижимающих элементов на верхнюю часть колодки (вторая ступень изменения положения) нормальные силы уменьшаются на 0,87 и 0,94 % для внутренней и внешней колодок соответственно. В качестве параметров оценки смещения положения центра давления было предложено напряжение на поверхностях накладок тормозных колодок при взаимодействии с диском. Для первой ступени изменения положения контактов прижимающих элементов было получено увеличение напряжений на поверхностях накладок на 1,6 % для внутренней колодки и на 0,1 % для внешней колодки тормоза. Для нижних частей накладок внутренней и внешней колодок было зафиксировано снижение напряжения на поверхностях, что в комплексе позволяет утверждать о смещении центра давления в верхнюю часть колодки в радиальном направлении. Для второй ступени изменения положения контактов прижимающих элементов напряжение на поверхностях накладок снижалось на 11,3 % для внутренней колодки и на 2,7 % для внешней колодки тормоза. Для нижних частей накладок внутренней и внешней колодок был зафиксирован рост напряжения на поверхностях на 3,9 и 0,1 % для внутренней и внешней колодок соответственно. Это свидетельствует о смещении центра давления в нижнюю часть колодки в радиальном направлении. Развивая данное направление изменения конструкции тормозного устройства, можно увеличить эффект изменения тормозного момента для силового устройства дисково-колодочного типа.

Список литературы

- 1 Singh, R. K. In-situ braking torque and temperature analysis of two-wheeler drum brake in friction braking / R. K. Singh, C. Sarkar // J Mech Sci Technol. – 2023. – Vol. 37. – P. 2069–2077. – DOI 10.1007/s12206-023-0342-8.
- 2 Numerical investigation of material and structural influence on transient temperature behavior in disc brakes during single-stop braking / C. N. Minh, Q. D. Van, T. N. Dinh [et al.] // International Journal of Heat and Technology. – 2024. – Vol. 42. – No. 4. – P. 1337–1348. – DOI 10.18280/ijht.420424.
- 3 Electromechanical braking systems and control technology : A survey and practice / H. Jing, Q. Lin, M. Liu [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2024. – Vol. 239 (10-11). – P. 4551–4573. – DOI 10.1177/09544070241271826
- 4 Farag, M. M. Modeling and Simulation of an Electromechanical Brake System / M. M. Farag, A.-K. M. Jamal, F. Haider // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, The Fifth Scientific Conference for Engineering and Postgraduate Research (PEC 2020). – 2020. – Vol. 1105. – 13 p. – DOI 10.1088/1757-899X/1105/1/012051.
- 5 A Review of Electro-Mechanical Brake (EMB) System: Structure, Control and Application / C. Li, G. Zhuo, C. Tang [et al.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – 38 p. – DOI 10.3390/su15054514.
- 6 Electro-Mechanical Brake System Architectural Design and Analysis Based on Functional Safety of Vehicles / J. Peng, T. Wu, L. Chu [et al.] // Actuators. – 2024. – Vol. 13. – 23 p. – DOI 10.3390/act13090346.
- 7 Перспективы развития систем адаптации тормозных устройств / И. А. Яицков,

References

- 1 Singh, R. K. In-situ braking torque and temperature analysis of two-wheeler drum brake in friction braking / R. K. Singh, C. Sarkar // J Mech Sci Technol. – 2023. – Vol. 37. – P. 2069–2077. – DOI 10.1007/s12206-023-0342-8.
- 2 Numerical investigation of material and structural influence on transient temperature behavior in disc brakes during single-stop braking / C. N. Minh, Q. D. Van, T. N. Dinh [et al.] // International Journal of Heat and Technology. – 2024. – Vol. 42. – No. 4. – P. 1337–1348. – DOI 10.18280/ijht.420424.
- 3 Electromechanical braking systems and control technology : A survey and practice / H. Jing, Q. Lin, M. Liu [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. – 2024. – Vol. 239 (10-11). – P. 4551–4573. – DOI 10.1177/09544070241271826.
- 4 Farag, M. M. Modeling and Simulation of an Electromechanical Brake System / M. M. Farag, A.-K. M. Jamal, F. Haider // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering, The Fifth Scientific Conference for Engineering and Postgraduate Research (PEC 2020). – 2020. – Vol. 1105. – 13 p. – DOI 10.1088/1757-899X/1105/1/012051.
- 5 A Review of Electro-Mechanical Brake (EMB) System: Structure, Control and Application / C. Li, G. Zhuo, C. Tang [et al.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – 38 p. – DOI 10.3390/su15054514.
- 6 Electro-Mechanical Brake System Architectural Design and Analysis Based on Functional Safety of Vehicles / J. Peng, T. Wu, L. Chu [et al.] // Actuators. – 2024. – Vol. 13. – 23 p. – DOI 10.3390/act13090346.
- 7 Prospects for the development of braking device adaptation systems / I. A. Yaitkov, P. A. Polyakov,

П. А. Поляков, Н. А. Задаянчук [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2024. – № 3 (86). – С. 64–70.

8 Изменение нормальных реакций по колесам высокоподвижных колесных транспортных средств при наезде на препятствие в процессе торможения / П. А. Поляков, И. А. Яицков, И. П. Талипова [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 4. – С. 370–383. – DOI 10.24412/2071-6168-2025-4-370-371.

9 Яицков, И. А. Влияние продольной динамики пассажирского вагона на его тормозные свойства / И. А. Яицков, П. А. Поляков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (88). – С. 75–88. – DOI 10.46973/0201-727X2022475.

10 Ding, H. Identification of Contact Stiffness between Brake Disc and Brake Pads Using Modal Frequency Analysis / H. Ding, Q. Zhu, H. Lyu // J. Eng. Technol. Sci. – 2020. – Vol. 52. – No. 4. – P. 468–480. – DOI 10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.4.2.

11 Pan, G. Impact Analysis of Brake Pad Backplate Structure and Friction Lining Material on Disc-Brake Noise / G. Pan, L. Chen // Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. – 9 p. – DOI 10.1155/2018/7093978.

N. A. Zadayanchuk [et al.] // Progressive technologies and systems of mechanical engineering. – 2024. – № 3 (86). – P. 64–70.

8 Change of normal reactions on wheels of highly mobile wheeled vehicles when hitting an obstacle during braking / P. A. Polyakov, I. A. Yaitskov, I. P. Talipova [et al.] // Izvestiya of the Tula State University. Technical sciences. – 2025. – No. 4. – P. 370–383. – DOI 10.24412/2071-6168-2025-4-370-371.

9 Yaitskov, I. A. The influence of the longitudinal dynamics of a passenger car on its braking properties / I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2022. – No. 4 (88). – P. 75–88. – DOI 10.46973/0201-727X2022475.

10 Ding, H. Identification of Contact Stiffness between Brake Disc and Brake Pads Using Modal Frequency Analysis / H. Ding, Q. Zhu, H. Lyu // J. Eng. Technol. Sci. – 2020. – Vol. 52. – No. 4. – P. 468–480. – DOI 10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.4.2.

11 Pan, G. Impact Analysis of Brake Pad Backplate Structure and Friction Lining Material on Disc-Brake Noise / G. Pan, L. Chen // Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. – 9 p. – DOI 10.1155/2018/7093978.

P. A. Polyakov, I. A. Yaitskov, A. A. Kuzkin, A. V. Mizyukaev, G. I. Galimova

CHANGING THE CHARACTERISTICS OF A DISC-TYPE BRAKE DEVICE BY IMPROVING THE MECHANISM OF PRESSING THE BRAKE PAD

Abstract. The axial-acting braking device, which includes a disc-shoe type brake, is constantly being improved. In the era of digitalization, attempts to create an electromechanical braking device have not stopped in all industries. At the moment, the proposed designs of electromechanical brakes have a number of significant drawbacks that are identified both during the design process and during operation. To solve this problem, it is necessary to develop an intermediate stage of a braking device powered by "traditional" vehicle drives and changing braking characteristics to suit changing external conditions. To do this, the braking device must be equipped with a block for changing braking characteristics when working pairs of brakes interact under discrete external conditions. The braking torque was chosen as the main variable braking characteristic. As a result of the research, a design has been developed that allows you to change not only the pressure position in the drive-pad-disc system, but also the normal force in the brake pair.

Keywords: braking, braking device, braking torque control mechanism, normal force, contact surface tension.

For citation: Changing the characteristics of a disc-type brake device by improving the mechanism of pressing the brake pad / P. A. Polyakov, I. A. Yaitskov, A. A. Kuzkin [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 188–198. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_188.

Сведения об авторах

Поляков Павел Александрович
Набережночелнинский институт
Казанского федерального университета
(НЧИ КФУ),

Information about the authors

Polyakov Pavel Alexandrovich
Naberezhnye Chelny Institute of Kazan
Federal University (NChI KFU),

кафедра «Механика и конструирование»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: polyakov.pavel88@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

Кузькин Антон Алексеевич

Набережночелнинский институт
Казанского федерального университета
(НЧИ КФУ),
аспирант,
e-mail: AntonKuzkin039@yandex.ru

Мизюкаев Анатолий Вячеславович

Набережночелнинский институт
Казанского федерального университета
(НЧИ КФУ),
аспирант,
e-mail: mizyukaev2000@gmail.com

Галимова Гульназ Ильгизовна

Набережночелнинский институт
Казанского федерального университета
(НЧИ КФУ),
кафедра «Механика и конструирование»,
старший преподаватель,
e-mail: plosatik1208@mail.ru

Chair “Mechanics and Design
Engineering”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Yaitskov Ivan Anatolyevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Cars and Car Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Dean of the Electromechanical
Department,
e-mail: yia@rgups.ru

Kuzkin Anton Alekseevich

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan
Federal University (NChI KFU),
Postgraduate Student,
e-mail: AntonKuzkin039@yandex.ru

Mizyukaev Anatoly Vyacheslavovich

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan
Federal University (NChI KFU),
Postgraduate Student,
e-mail: mizyukaev2000@gmail.com

Galimova Gulnaz Ilgizovna

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan
Federal University (NChI KFU),
Chair “Mechanics and Design
Engineering”,
Senior Lecturer,
e-mail: plosatik1208@mail.ru

Е. Н. Розенберг, В. С. Кузьмин, А. В. Озеров

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ НЕОГРАНИЧЕННЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С ЛОКОМОТИВНЫМ ПРИЕМНИКОМ

Аннотация. Определение пространственных координат локомотивов, специального самоходного подвижного состава, а также головных вагонов моторвагонного подвижного состава является одной из базовых задач для систем регулирования движения поездов. Для ее решения широкое распространение получили напольные датчики, средства одометрии, а также приемники глобальных навигационных спутниковых систем.

В работе на основе математического аппарата теории четырехполюсников предложены расчетные выражения, позволяющие определить ток под приемными катушками движущегося подвижного состава при его произвольном положении вдоль рельсовой линии. Эти же выражения могут быть рассмотрены как трансцендентные уравнения для определения пространственных координат единицы тягового подвижного состава по известной величине сигнального тока под приемными катушками при заданной регулировке на питающем конце.

Полученные результаты могут быть применены в качестве математического обеспечения решения задачи позиционирования тягового подвижного состава в условиях нестабильной работы глобальных навигационных спутниковых систем.

Ключевые слова: пространственные координаты, позиционирование, основные устройства безопасности, рельсовая цепь, локомотивный приемник.

Для цитирования: Розенберг, Е. Н. К определению пространственных координат тягового подвижного состава с использованием сигналов неограниченных рельсовых цепей с локомотивным приемником / Е. Н. Розенберг, В. С. Кузьмин, А. В. Озеров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 199–206. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_199.

Введение

Системы регулирования движения поездов требуют для своего функционирования сведений о положении рассматриваемой единицы тягового подвижного состава: локомотива, единицы специального самоходного подвижного состава или головного вагона моторвагонного подвижного состава, – для определения текущей допустимой и целевой скорости движения с учетом типа и пространственных координат впереди расположенного переменного препятствия. Задача определения пространственных координат железнодорожного подвижного состава исторически решается с применением исключительно напольных датчиков, в частности электрических рельсовых цепей с путевыми приемниками. Однако они зачастую обеспечивают низкую точность, особенно в условиях применения низкочастотных рельсовых цепей с изолирующими стыками, что не позволяет существенно наращивать провозную способность железнодорожных линий.

Внедрение современных микропроцессорных основных устройств безопасности, в частности унифицированного комплексного локомотивного устройства безопасности КЛУБ-У и безопасного локомотивного объединенного комплекса БЛОК, позволило перейти к новым, более точным методам определения пространственных координат: одометрическому и базирующемуся на сведениях от глобальных навигационных спутниковых систем [1, 2]. Применение различных решений, в частности электронной карты в составе основных устройств безопасности, сделало возможным уточнение пространственных координат железнодорожного подвижного состава с использованием регистрации границ (т.н. виртуальных бализ) или уникальных идентификаторов рельсовых цепей, что позволяет существенно сократить величину погрешности, связанной с применением указанных методов [3].

Тем не менее такие решения не позволяют уточнять пространственные координаты в границах эксплуатационной длины отдельной рельсовой цепи. Кроме того, работа навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем подвержена влиянию со стороны систем радиоэлектронной борьбы [4]. С учетом этого целесообразен поиск новых методов, которые можно было бы комплексировать с известными с целью, как повышения точности определения пространственных координат в границах эксплуатационной длины отдельной рельсовой цепи, так и повышения уровня функциональной безопасности систем регулирования движения поездов [5–7].

Одним из новых направлений в данной области, использующим возможности микропроцессорных локомотивных устройств безопасности, является определение пространственных координат единиц тягового подвижного состава в границах эксплуатационной длины рельсовой цепи по уровню принимаемого из рельсовой линии сигнала автоматической локомотивной сигнализации. В рамках данного направления в первую очередь рассматриваются неограниченные рельсовые цепи, характерные для современных систем автоблокировки, например, АБТЦ-МШ. С учетом этого в качестве цели работы выбрано описание математического обеспечения для определения пространственных координат подвижного состава вдоль рельсовой линии неограниченных рельсовых цепей с использованием локомотивного приемника.

Материалы и методы

В рамках рассматриваемого направления для решения задачи определения пространственных координат единицы тягового подвижного состава возможно использовать современные микропроцессорные основные устройства безопасности. При движении локомотивного приемника вдоль рельсовой линии сигнальный ток системы автоматической локомотивной сигнализации или ток контроля рельсовой линии под приемными катушками локомотива возрастает по мере приближения к питающему концу рельсовой цепи. С учетом этого изменения при известной регулировке аппаратуры питающего конца рельсовой цепи, параметрах рельсовой линии и протекающих по ней сигналов представляется возможным определить местоположение локомотива или иной единицы тягового подвижного состава. Уточнение полученных таким способом пространственных координат может быть выполнено путем комплексирования с данными о пройденном расстоянии от одометрических датчиков угла поворота.

В рамках работы рассмотрены две поездные ситуации. Первая предполагает нахождение единицы тягового подвижного состава между точками подключения аппаратуры питающего и приемного концов (рис. 1, а), т.е. в границах т.н. конструктивной длины. Вторая предполагает нахождение единицы тягового подвижного состава в границах эксплуатационной длины рельсовой цепи в зоне дополнительного шунтирования (рис. 1, б).

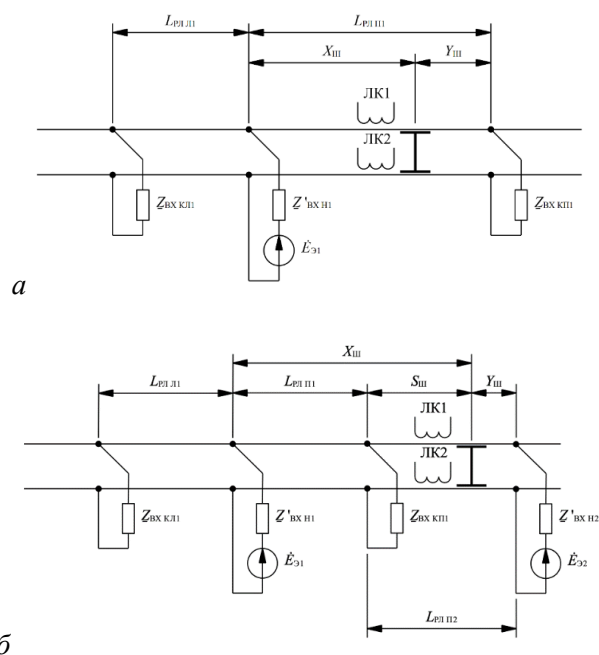


Рис. 1. Рассматриваемые ситуации:

- а – единица тягового подвижного состава между питающим и приемным концом рельсовой цепи;
 б – единица тягового подвижного состава находится в зоне дополнительного шунтирования

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$L_{рл\ л1}$ – протяженность рельсовой линии между точками подключения аппаратуры питающего и приемного концов первой рельсовой цепи слева;

$L_{рл\ ш1}$ – протяженность рельсовой линии между точками подключения аппаратуры питающего и приемного концов первой рельсовой цепи справа;

$L_{рл\ ш2}$ – протяженность рельсовой линии между точками подключения аппаратуры питающего и приемного концов второй рельсовой цепи справа;

$X_{ш}$ – ордината единицы тягового подвижного состава (поездного шунта) относительно точки подключения аппаратуры питающего конца первой рельсовой цепи;

S – ордината единицы тягового подвижного состава (поездного шунта) относительно точки подключения аппаратуры ближайшего приемного конца рельсовой цепи;

$Y_{ш}$ – ордината единицы тягового подвижного состава (поездного шунта) относительно точки подключения аппаратуры находящегося позади нее приемного или питающего конца рельсовой цепи;

ЛК1, ЛК2 – приемные катушки рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

$Z'_{вх н1}$ – обратное (со стороны рельсовой линии) входное сопротивление аппаратуры питающего конца первой рельсовой цепи;

$Z'_{вх н2}$ – обратное (со стороны рельсовой линии) входное сопротивление аппаратуры питающего конца второй рельсовой цепи;

$Z_{вх кл1}$ – входное сопротивление аппаратуры приемного конца первой рельсовой цепи слева;

$Z_{вх кл2}$ – входное сопротивление аппаратуры приемного конца первой рельсовой цепи справа;

$\dot{E}_{э1}$ – комплексное значение напряжения, эквивалентное питающему элементу первой рельсовой цепи;

$\dot{E}_{э2}$ – комплексное значение напряжения, эквивалентное питающему элементу второй рельсовой цепи.

Для получения расчетных выражений будет в данной работе использован метод четырехполюсников. Схемы замещения, соответствующие рассматриваемым ситуациям, показаны на рис. 2.

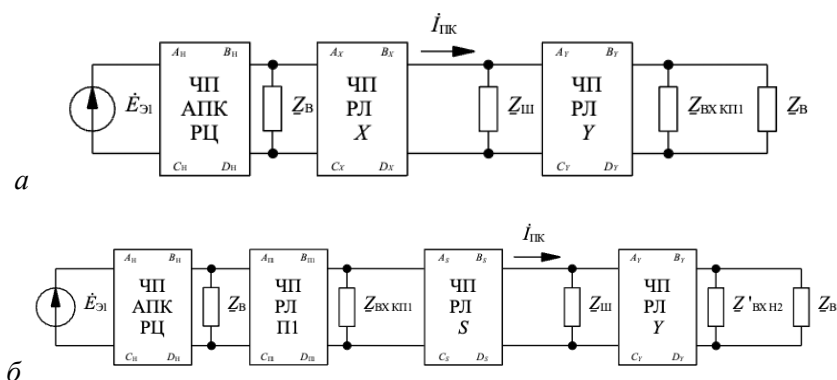


Рис. 2. Схемы замещения для рассматриваемых ситуаций:

а – единица тягового подвижного состава между питающим и приемным концом рельсовой цепи;

б – единица тягового подвижного состава находится в зоне дополнительного шунтирования

На рис. 2 дополнительно приняты следующие обозначения:

$Z_в$ – волновое сопротивление рельсовой линии, смежной с рассматриваемой;

ЧП РЛ X – четырехполюсник рельсовой линии между точками подключения аппаратуры питающего конца рассматриваемой рельсовой цепи и наложения поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава с параметрами A_x, B_x, C_x, D_x ;

ЧП РЛ Y – четырехполюсник рельсовой линии между точками подключения аппаратуры приемного (схема «а») или питающего (схема «б») конца рельсовой цепи и наложения поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава с параметрами A_y, B_y, C_y, D_y ;

$Z_ш$ – сопротивление поездного шунта рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

$i_{пк}$ – комплексный сигнальный ток, протекающий под приемными катушками рассматриваемой единицы тягового подвижного состава;

ЧП АПК РЦ – четырехполюсник аппаратуры питающего конца рельсовой цепи с параметрами $A_п, B_п, C_п, D_п$;

ЧП РЛ П1 – четырехполюсник рельсовой линии между точками подключения аппаратуры питающего и приемного концов рассматриваемой рельсовой цепи с параметрами $A_{п1}, B_{п1}, C_{п1}, D_{п1}$;

ЧП РЛ S – четырехполюсник рельсовой линии между точками подключения аппаратуры приемного конца рассматриваемой рельсовой цепи и наложения поездного шунта с параметрами A_s, B_s, C_s, D_s .

Результаты и обсуждения

Для решения задачи требуется определить величину тока $\dot{I}_{пк}$. Полученные на основе разработанных схем замещения расчетные выражения для первой и второй схем замещения (рис. 2, *а* и *б*) имеют вид (1) и (2) соответственно:

$$i_{\text{ПК}}(X_{\text{Ш}}) = \left[\underline{A}_{\text{РЛ АЛС 1}} \cdot \frac{\underline{C}_{\text{РЛ АЛС 1}} \underline{Z}_{\text{Ш}} + \underline{D}_{\text{РЛ АЛС 1}}}{\underline{A}_{\text{РЛ АЛС 1}} \underline{Z}_{\text{Ш}} + \underline{B}_{\text{РЛ АЛС 1}}} - \underline{C}_{\text{РЛ АЛС 1}} \right] \dot{U}_1, \quad (1)$$

где $\underline{A}_{\text{РЛ АЛС 1}} = \underline{K}_1 \underline{K}_3 + \underline{B}_H \underline{K}_4$,
 $\underline{B}_{\text{РЛ АЛС 1}} = \underline{K}_1 \underline{K}_5 + \underline{B}_H \underline{K}_6$,
 $\underline{C}_{\text{РЛ АЛС 1}} = \underline{K}_2 \underline{K}_3 + \underline{D}_H \underline{K}_4$,
 $\underline{D}_{\text{РЛ АЛС 1}} = \underline{K}_2 \underline{K}_5 + \underline{D}_H \underline{K}_6$,
 $\underline{K}_1 = \underline{A}_H + \frac{\underline{B}_H}{\underline{Z}_B}$,
 $\underline{K}_2 = \underline{C}_H + \frac{\underline{D}_H}{\underline{Z}_B}$,
 $\underline{K}_3 = \underline{K}_6 = \text{ch} \underline{\gamma} X_{\text{Ш}}$,
 $\underline{K}_4 = \frac{1}{\underline{Z}_B} \text{sh} \underline{\gamma} X_{\text{Ш}}$,
 $\underline{K}_5 = \underline{Z}_B \text{sh} \underline{\gamma} X_{\text{Ш}}$;

$$i_{\text{ПК}}(X_{\text{Ш}}) = \left[\underline{A}_{\text{РЛ АЛС 2}} \cdot \frac{\underline{C}_{\text{РЛ АЛС 2}} \underline{Z}_{\text{Ш}} + \underline{D}_{\text{РЛ АЛС 2}}}{\underline{A}_{\text{РЛ АЛС 2}} \underline{Z}_{\text{Ш}} + \underline{B}_{\text{РЛ АЛС 2}}} - \underline{C}_{\text{РЛ АЛС 2}} \right] \dot{U}_1, \quad (2)$$

где $\underline{A}_{\text{РЛ АЛС 2}} = \underline{H}_1 \underline{H}_3 + \underline{B}_H \underline{H}_4$,
 $\underline{B}_{\text{РЛ АЛС 2}} = \underline{H}_1 \underline{H}_5 + \underline{B}_H \underline{H}_6$,
 $\underline{C}_{\text{РЛ АЛС 2}} = \underline{H}_2 \underline{H}_3 + \underline{D}_H \underline{H}_4$,
 $\underline{D}_{\text{РЛ АЛС 2}} = \underline{H}_2 \underline{H}_5 + \underline{D}_H \underline{H}_6$,
 $\underline{H}_1 = \underline{A}_H + \frac{\underline{B}_H}{\underline{Z}_B}$,
 $\underline{H}_2 = \underline{C}_H + \frac{\underline{D}_H}{\underline{Z}_B}$,
 $\underline{H}_3 = \text{ch} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} + S_{\text{Ш}}) + \frac{\underline{Z}_B}{2\underline{Z}_{\text{ВХ КП1}}} \left[\text{sh} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} + S_{\text{Ш}}) + \text{sh} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} - S_{\text{Ш}}) \right]$,
 $\underline{H}_4 = \frac{1}{\underline{Z}_B} \text{sh} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} + S_{\text{Ш}}) + \frac{1}{2\underline{Z}_{\text{ВХ КП1}}} \left[\text{ch} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} + S_{\text{Ш}}) + \text{ch} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} - S_{\text{Ш}}) \right]$,
 $\underline{H}_5 = \underline{Z}_B \left[\text{sh} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} + S_{\text{Ш}}) + \frac{\underline{Z}_B}{2\underline{Z}_{\text{ВХ КП1}}} \left[\text{ch} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} + S_{\text{Ш}}) - \text{ch} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} - S_{\text{Ш}}) \right] \right]$,
 $\underline{H}_6 = \text{ch} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} + S_{\text{Ш}}) + \frac{\underline{Z}_B}{2\underline{Z}_{\text{ВХ КП1}}} \left[\text{sh} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} + S_{\text{Ш}}) - \text{sh} \underline{\gamma} (L_{\text{РЛ П1}} - S_{\text{Ш}}) \right]$.

Определение величины ЭДС, наведенной сигнальным током $\dot{I}_{\text{ПК}}$, выполняется с использованием известных выражений, например, приведенных в [8].

Представленные формулы (1) и (2) могут быть использованы в двух задачах. Первая заключается в определении тока под приемными катушками движущегося подвижного состава при его произвольном положении вдоль рельсовой линии. Вторая задача предполагает при известной величине силы тока под приемными катушками выполнить расчет пространственной координаты локомотивного приемника вдоль рельсовой линии. Решение второй задачи требует решения трансцендентных уравнений.

Решение обеих задач выполняется при следующих ограничениях:

– участки рельсовой линии между точками подключения аппаратуры и наложения поездного шунта представляют собой однородную линию с известными и неизменными в процессе выполнения движения вдоль нее вторичными параметрами;

– параметры работы питающего элемента рельсовой цепи (генератора или вторичной обмотки трансформатора) известны и неизменны в процессе выполнения движения вдоль рельсовой линии рассматриваемой рельсовой цепи;

– устройство безопасности снабжено электронной картой и ординаты всех точек подключения аппаратуры известны;

– геометрическое положение приемных катушек рассматриваемой единицы тягового подвижного состава относительно соответствующих ходовых рельсов и их электрические параметры не меняются в процессе движения;

– принимаемое при расчетах значение сопротивления поездного шунта не превышает нормативной величины для рассматриваемого типа рельсовой цепи.

С использованием формулы (1) были построены серии зависимостей действующей величины $\dot{I}_{\text{ПК}}$ силы сигнального тока под приемными катушками от положения рассматриваемой единицы тягового подвижного состава $X_{\text{ш}}$ вдоль неограниченной рельсовой цепи с частотой несущей сигнала автоматической локомотивной сигнализации 25 Гц (рис. 3, 4). Согласно полученным зависимостям, различие между действующими величинами $\dot{I}_{\text{ПК}}$ силы сигнального тока под приемными катушками для широкого диапазона значений сопротивления изоляции $r_{\text{из}}$ рельсовой линии при малых ординатах меньше, чем на большем удалении от точки подключения аппаратуры питающего конца рельсовой цепи.

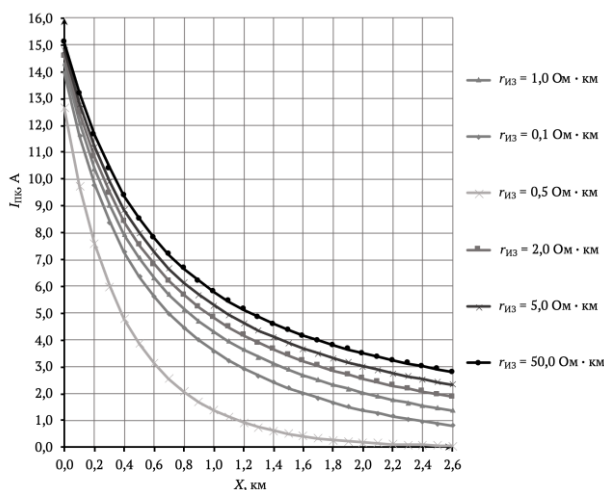


Рис. 3. Зависимости действующей величины $\dot{I}_{\text{ПК}}$ силы сигнального тока под приемными катушками от положения рассматриваемой единицы тягового подвижного состава $X_{\text{ш}}$ при различных сопротивлениях изоляции $r_{\text{и}}$ в диапазоне от 0,1 до 50,0 Ом × км

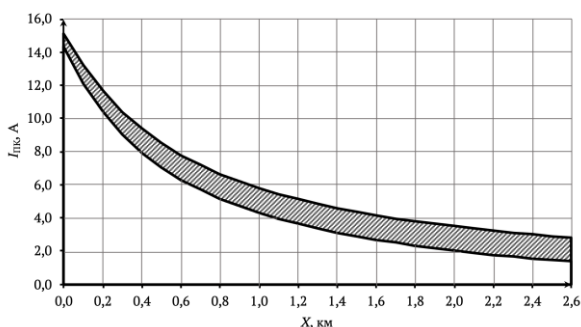


Рис. 4. Диапазон действующей величины $\dot{I}_{\text{ПК}}$ силы сигнального тока под приемными катушками от положения рассматриваемой единицы тягового подвижного состава $X_{\text{ш}}$ для диапазона сопротивлений изоляции $r_{\text{и}}$ от 1,0 до 50,0 Ом × км

Из графика, приведенного на рис. 5, видно, что диапазон действующих значений силы тока $\dot{I}_{\text{ПК}}$ под приемными катушками в случае неограниченных рельсовых цепей с локомотивным приемником в широком диапазоне сопротивлений изоляции $r_{\text{и}}$ от 1,0 до 50,0 Ом × км изменяется незначительно: от 1,4 до 2,8 А при наложении поездного шунта нормативной величины в ординате $X = 2,6$ км и от той цепи. При этом наиболее существенный рост величины тока на наибольшем удалении от питающего конца рельсовой цепи наблюдается при увеличении сопротивления изоляции от 1 до 9 Ом × км (1,40 до 2,53). Последующее увеличение сопротивления изоляции с шагом 1 Ом × км дает приращение действующего значения тока, не превышающее 1 %.

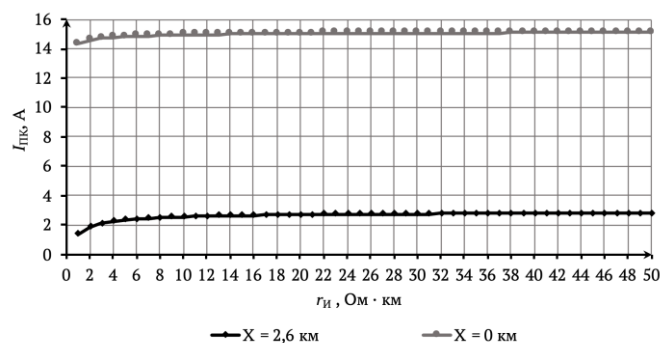


Рис. 5. Зависимости изменения действующего значения силы тока $\dot{I}_{ПК}$ под приемными катушками в ординатах $X = 0$ и $X = 2,6$ км от величины сопротивления изоляции рельсовой линии $r_{И}$

Существенное изменение действующего значения силы тока под приемными катушками возникает и при изменении величины активного сопротивления поездного шунта $R_{ш}$ (рис. 6). Однако в отличие от сопротивления изоляции, изменение сопротивления поездного шунта приводит к изменению действующего значения силы тока под приемными катушками на участке рельсовой цепи вблизи точки подключения аппаратуры питающего конца.

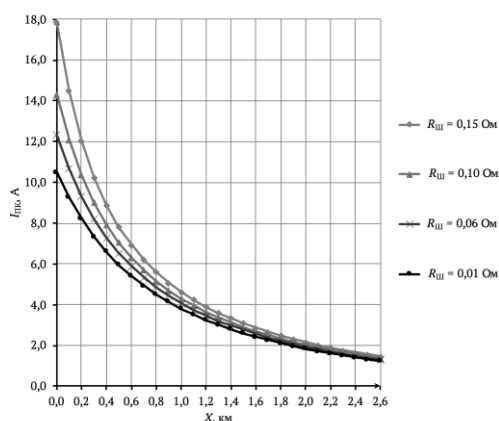


Рис. 6. Зависимости действующей величины $\dot{I}_{ПК}$ силы сигнального тока под приемными катушками от положения рассматриваемой единицы тягового подвижного состава $X_{ш}$ при различных сопротивлениях поездного шунта $R_{ш}$

Заключение

В работе приводится математическое обеспечение решения задачи определения пространственных координат подвижного состава вдоль рельсовой линии неограниченных тональных рельсовых цепей с использованием локомотивного приемника. Получены следующие основные результаты:

1 Разработаны схемы замещения, описывающие различные варианты взаимного расположения напольной аппаратуры рельсовых цепей и локомотивного приемника:

– единица тягового подвижного состава находится между питающим и приемным концом рельсовой линии;

– единица тягового подвижного состава находится в границах зоны дополнительного шунтирования.

2 Получены расчетные выражения, определяющие зависимость величины силы тока под приемными катушками рассматриваемого локомотивного приемника от положения единицы тягового подвижного состава. Также при известной величине силы тока под приемными катушками полученные выражения позволяют выполнить расчет ординаты локомотивного приемника вдоль рельсовой линии. Определены основные ограничения для применения полученных расчетных выражений.

3 Результаты моделирования показали, что с ростом величины сопротивления изоляции для случая неограниченной рельсовой цепи с локомотивным приемником наблюдается ухудшение условий

выбора кривой сигнального тока и, как следствие, решение задачи позиционирования единицы тягового подвижного состава вдоль рельсовой линии становится затруднительным. Существенное влияние на решение задачи позиционирования вблизи питающего конца рельсовой цепи может вносить изменение величины сопротивления поездного шунта.

4 Для повышения точности определения пространственных координат единицы тягового подвижного состава на значительном удалении от питающего конца рельсовой цепи целесообразно комплексовать результаты обработки сигналов, принимаемых из рельсовой линии, с данными от датчика угла поворота.

Полученные результаты будут использованы авторами в будущем для разработки соответствующей методики определения пространственных координат тягового подвижного состава.

Список литературы

- 1 Демьянов, В. В. Спутниковая навигация для интервального регулирования движения поездов / В. В. Демьянов, Д. Д. Логинов, О. Б. Имарова // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 3. – С. 28–31. – DOI 10.34649/AT.2021.3.3.004.
- 2 Иванов, В. Ф. Высокоточная система позиционирования железнодорожного подвижного состава / В. Ф. Иванов, П. А. Попов // Труды АО «НИИАС»: сборник статей. Т. 2. Вып. 11. – Москва : Типография АО «Т 8 Издательские Технологии», 2021. – С. 179–189. – EDN KCAWSO.
- 3 Розенберг, Е. Н. Проектные решения РСУДП для ВСЖМ-1 / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, А. Г. Баранов // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 3. – С. 2–4. – DOI 10.34649/AT.2024.3.3.001.
- 4 Определение местоположения поезда в условиях работы систем РЭБ / О. Ю. Куприенко, В. В. Батраев, С. В. Маршов, С. В. Ипатов // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 7. – С. 36–39. – EDN OSNXUE.
- 5 О методе обеспечения функциональной безопасности системы с одноканальной обработкой информации / И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг, А. С. Коровин, Н. Г. Пенькова // Надежность. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 44–52. – DOI 10.21683/1729-26462022-22-3-44-52.
- 6 Соколов, М. М. Использование входного сопротивления путевого участка для позиционирования подвижной единицы / М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 9. – С. 15–17. – DOI 10.62994/AT.2025.9.9.001.
- 7 Соколов, С. В. Решение задачи автономного высокоточного позиционирования железнодорожных подвижных единиц на основе измерения рельсовых токов / С. В. Соколов, Д. В. Швалов // Автоматика на транспорте. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 201–209. – DOI 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209.
- 8 Кузьмин, В. С. Оценка чувствительности локомотивных приёмников при использовании испытательных шлейфов со скрещиваниями / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20, № 3 (100). – С. 30–38. – DOI 10.30932/1992-3252-2022-20-3-4.

References

- 1 Demyanov, V. V. Satellite navigation for interval control of train traffic / V. V. Demyanov, D. D. Loginov, O. B. Imarova // Automation, communications, informatics. – 2021. – No. 3. – P. 28–31. – DOI 10.34649/AT.2021.3.3.004.
- 2 Ivanov, V. F. High-precision positioning system for railway rolling stock / V. F. Ivanov, P. A. Popov // Proceedings of JSC “NIAS”: collection of articles. Vol. 2. Iss. 11. – Moscow : Printing house of JSC T 8 Publishing Technologies, 2021. – P. 179–189. – EDN KCAWSO.
- 3 Rosenberg, E. N. Design solutions for the RSUDP for the VSZhM-1 / E. N. Rosenberg, A. V. Ozerov, A. G. Baranov // Automation, communications, informatics. – 2024. – No. 3. – P. 2–4. – DOI 10.34649/AT.2024.3.3.001.
- 4 Determining the location of a train under conditions of electronic warfare systems operation / O. Yu. Kuprienko, V. V. Batraev, S. V. Marshov, S. V. Ipatov // Railway transport. – 2025. – No. 7. – P. 36–39. – EDN OSNXUE.
- 5 On the method of ensuring functional safety of a system with single-channel information processing / I. B. Shubinsky, E. N. Rosenberg, A. S. Korovin, N. G. Penkova // Reliability. – 2022. – Vol. 22, No. 3. – P. 44–52. – DOI 10.21683/1729-26462022-22-3-44-52.
- 6 Sokolov, M. M. Using the input resistance of a track section for positioning a moving unit / M. M. Sokolov, A. G. Khodkevich // Automation, communications, informatics. – 2025. – No. 9. – P. 15–17. – DOI 10.62994/AT.2025.9.9.001.
- 7 Sokolov, S. V. Solution of the problem of autonomous high-precision positioning of railway rolling units based on measuring track currents / S. V. Sokolov, D. V. Shvalov // Automation in transport. – 2025. – Vol. 11, No. 3. – P. 201–209. – DOI 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209.
- 8 Kuzmin, V. S. Evaluation of the sensitivity of locomotive receivers when using test loops with crossings / V. S. Kuzmin, A. K. Tabunshchikov // World of transport and transportation. – 2022. – Vol. 20, No. 3 (100). – P. 30–38. – DOI 10.30932/1992-3252-2022-20-3-4.

E. N. Rosenberg, V. S. Kuzmin, A. V. Ozerov

DETERMINING THE SPATIAL COORDINATES OF TRACTION ROLLING STOCK USING SIGNALS FROM UNLIMITED TRACK CIRCUITS WITH A LOCOMOTIVE RECEIVER

Abstract. Determining the spatial coordinates of locomotives, special self-propelled rolling stock, and the head cars of multiple-unit rolling stock is a fundamental task for train control systems. To solve this problem, floor-mounted sensors, odometry devices, and global navigation satellite system receivers have become widely used. Based on the mathematical apparatus of four-terminal network theory, this paper proposes calculation expressions for determining the current under the receiver coils of moving rolling stock at any position along the track. These same expressions can be considered as transcendental equations for determining the spatial coordinates of a traction rolling stock unit based on the known signal current under the receiving coils with a given adjustment at the feeder end.

The obtained results can be used as mathematical support for solving the problem of positioning traction rolling stock under conditions of unstable operation of global navigation satellite systems.

Keywords: spatial coordinates, positioning, primary safety devices, track circuit, locomotive receiver.

For citation: Rosenberg, E. N. Determining the spatial coordinates of traction rolling stock using signals from unlimited track circuits with a locomotive receiver / E. N. Rosenberg, V. S. Kuzmin, A. V. Ozerov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 199–206. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_199.

Сведения об авторах

Розенберг Ефим Наумович

АО «НИИАС»,
доктор технических наук, профессор,
первый заместитель генерального директора,
e-mail: info@vniias.ru

Кузьмин Владислав Сергеевич

АО «НИИАС»,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник Отдела научно-исследовательской
работы Центра интеллектуальных
и программных решений Научно-технического
комплекса интеллектуальных систем контроля
и управления,
e-mail: info@vniias.ru

Озеров Алексей Валерьевич

АО «НИИАС»,
начальник Международного управления –
начальник Центра управления
интеллектуальной собственностью
e-mail: a.ozеров@vniias.ru

Information about the authors

Rosenberg Efim Naumovich

JSC “NIAS”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
First Deputy General Director,
e-mail: info@vniias.ru

Kuzmin Vladislav Sergeevich

JSC “NIAS”,
Candidate of Engineering Sciences,
Leading Researcher of the Research Department
of the Center for Intelligent and Software
Solutions of the Scientific and Technical
Complex of Intelligent Monitoring and Control
Systems,
e-mail: info@vniias.ru

Ozerov Alexey Valerievich

JSC “NIAS”,
Head of International Department,
Head of Intellectual Property Management
Centre,
e-mail: a.ozеров@vniias.ru

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 656.2 : 31 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_207

*И. В. Мартынюк, В. Н. Носков, В. А. Финоченко, Н. С. Флегонтов***К ВОПРОСУ НАУЧНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Аннотация. Статья посвящена вопросам, связанным с научным сопровождением реализации новой Энергетической стратегии железнодорожного транспорта.

В части повышения энергосбережения и энергоэффективности рассматриваются вопросы, связанные с перевозочным процессом и тяговым подвижным составом: разработка методов снижения расхода энергии в системе «колесо – рельс», эффективная эксплуатация бесстыкового пути и совершенствование технологий лубрикации.

В вопросах применения низкоуглеродных источников энергии оценивается эффективность таких мер, как электрификация грузонапряженных участков железных дорог, использование природного газа в качестве моторного топлива, возможность использования водорода и накопителей энергии. В стационарной энергетике предлагаются к рассмотрению возможности собственной электрогенерации на основе возобновляемых источников энергии с использованием их в системах тепло- и водоснабжения (солнечные коллекторы, тепловые насосы, биотопливо) и модернизацией котельных с переводом их на низкоуглеродный природный и на сжиженные углеводородные газы.

В области совершенствования системы учета расхода топливно-энергетических ресурсов анализируется возможность увеличения количества и информативности показателей энергоэффективности, энергосбережения и углеродоемкости в отношении систем водоотведения, тепло- и водоснабжения. Также отмечается возможность использования низкоуглеродных источников в виде возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, энергетическая стратегия, энергосбережение, низкоуглеродные энергоисточники.

Для цитирования: К вопросу научного сопровождения энергетической стратегии железнодорожного транспорта / И. В. Мартынюк, В. Н. Носков, В. А. Финоченко, Н. С. Флегонтов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 207–213. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_207.

Введение

Железнодорожный транспорт является одним из крупных потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в Российской Федерации, которые составляют значительную часть эксплуатационных расходов компании ОАО «РЖД». Важность энергетической политики, ее содержание отражены в новой редакции Энергетической стратегии ОАО «РЖД» [1] (далее – Стратегия). Необходимость научного сопровождения реализации Стратегии рассмотрена в [2]. Настоящая статья является продолжением данной темы.

В качестве предмета рассмотрения в работе анализируются следующие общие целевые ориентиры Стратегии:

- во-первых, это повышение энергоэффективности всех инфраструктурных объектов компании и активное внедрение энергосберегающих технологий;
- во-вторых, рациональное использование и применение низкоуглеродных источников энергии;
- в-третьих, анализ расхода ТЭР и создание совершенной системы контроля и учета.

Повышение энергоэффективности и внедрение энергосберегающих технологий

По вопросу повышения энергоэффективности перевозочного процесса необходимо отметить, что часть проводимых в этом направлении мероприятий имеют в основном организационно-технологический характер, как правило, не требующий новых разработок. Примерами могут служить сокращение нагонов пассажирских поездов, уменьшение числа неграфиковых остановок грузовых поездов у запрещающих сигналов, обучение локомотивных бригад рациональным режимам вождения поездов, сокращение одиночного следования локомотивов и др. Здесь роль научного сопровождения представляется важной в дальнейшей разработке энергооптимального следования поездопотока, вплоть до автоматизации режимов для отдельных составов в поездопотоке с учетом специфики их формирования.

Анализируя достигнутую за прошедший период энергоэффективность перевозочного процесса, необходимо отметить, что транспортная наука может способствовать ее улучшению за счет мероприятий [3]:

- по снижению поглощающей тяговую энергию поперечной (боковой) и вертикальной динамики вагонов в составе поездов;

- по повышению КПД электромеханических процессов при использовании рекуперативного торможения;

- по увеличению полноты сгорания дизельного топлива в двигателях тепловозов.

Бесспорным выглядит наукоемкий характер планируемых в Стратегии мероприятий в части повышения энергоэффективности тягового подвижного состава, и к таковым можно отнести:

- создание локомотивов с распределенной системой тяги;

- адаптацию эксплуатируемого подвижного состава к изменяющимся условиям работы;

- повышение коэффициента мощности локомотивов;

- развитие систем накопления энергии на локомотивах;

- применение локомотивов двойного питания и совершенствование дизель-генераторных установок для тепловозов;

- развитие систем измерения и диагностики локомотивов, а именно бортовых и испытательных;

- внедрение автоматизированных систем прогрева тепловозов.

В данном вопросе следует отметить, что большинство из перечисленных направлений относится к компетенции разработчиков в компаниях и на предприятиях транспортного машиностроения, в которых в послереформенный период железнодорожного транспорта организованы собственные научно-технические и конструкторские коллективы. Однако в предложениях от научных подразделений железнодорожного транспорта по тематике локомотивостроения у этих организаций заинтересованность, как правило, не проявляется. В частности, на текущий момент нет доступной информации о состоянии разработок научно-технических коллективов локомотивостроения в такой прорывной высокотехнологичной области, как создание сверхпроводникового тягового электропривода на локомотивах.

Роль транспортной науки в области энергоэффективности тягового подвижного состава по названным причинам может быть сосредоточена на разработке технических требований к вновь создаваемым локомотивам, электропоездам, поездам высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ), рельсовым автобусам. Здесь сферой деятельности остаются также испытательные процедуры для вновь разработанного и модернизированного подвижного состава, включая создание испытательных технических средств, в т. ч. для условий рядовой эксплуатации локомотивов [4]. Кроме этого, не должны выпадать из внимания вопросы совершенствования систем автоведения и прогрева тепловозов.

Также значительна обосновывающая роль научного сообщества в организации тяжеловесного движения. Оно является преимущественно однонаправленным, требующим кратной тяги, т. е. обратное движение локомотивов оказывается недогруженным, и пропуск тяжеловесных поездов вносит ограничения в работу многих хозяйств, что означает упущенную выгоду. В данном вопросе необходимо определить оптимальные маршруты следования поездов повышенной массы для увеличения их доходности.

Важной задачей в области повышения энергоэффективности перевозочного процесса являются:

- разработка методов снижения расхода энергии на преодоление трения в системе «колесо – рельс»;

- эффективная эксплуатация бесстыкового пути;

- совершенствование технологий лубрикации.

Все это позволит снизить износ и уменьшить сопротивление движению поездов, что, в свою очередь, обеспечит экономию ТЭР.

Необходимо также отметить, что большой потенциал энергосбережения находится в хозяйствах тепло- и водоснабжения железнодорожного транспорта. К основным направлениям здесь следует отнести:

- отказ от высокоуглеродных топлив и переход на местные более экологичные и более дешевые виды топлива, например попутный нефтяной газ (ПНГ) в районах нефте- и газодобычи, а также торф, отходы лесной и деревообрабатывающей промышленности;

- совершенствование объектов теплогенерации и применение в тепловых сетях новых материалов и технологий.

Кроме этого, вполне эффективными в этих хозяйствах могут быть работы в области когенерации и тригенерации для нужд конкретных объектов железнодорожного транспорта.

В части мероприятий по обеспечению энергоэффективности зданий и сооружений следует в первую очередь назвать применение систем поддержания в зданиях оптимальных температур в зависимости от температуры наружного воздуха, использование «зеленых» технологий, систем «умный

дом», светодиодного освещения. В данной области транспортная наука могла бы внести существенный вклад в обновление систем кондиционирования воздуха в производственных помещениях инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта, на что затрачиваются большие объемы электроэнергии, особенно в южных регионах и в пассажирских поездах на всей сети железных дорог в летний период. При внедрении светодиодных источников освещения от транспортной науки потребуются предложения по путям утилизации отработавших свой ресурс этих источников, т. к. они изготавливаются из весьма токсичных материалов: арсенида, фосфида и нитрида галлия.

В направлении повышения энергоэффективности технологического и вспомогательного оборудования, используемого в хозяйствах ОАО «РЖД», фигурирует многочисленная разнообразная техника, включая компрессорные станции, специальный подвижной состав, автотракторную технику, автотранспорт (с его переводом на газомоторное топливо), силовые установки с частотно-регулируемым приводом. В этой сфере целесообразно обратить особое внимание на насыщенную разнообразным энергооборудованием и весьма энергозатратную подотрасль железнодорожного строительства.

Применение низкоуглеродных источников энергии

В области низкоуглеродного развития и экологизации энергетического комплекса ОАО «РЖД» данный стратегический приоритет ставит такую задачу, как оценка масштабов углеродного следа в проектах электрификации железнодорожных линий. К подобной оценке вынуждает экологическая ответственность не только производителя, но и потребителя электроэнергии. Т. е. экологичность электрификации в настоящее время не считается однозначной и зависит от углеродного следа потребляемой электроэнергии.

По этому вопросу, а именно – приобретения электроэнергии с низким углеродным следом, следует отметить, что ОАО «РЖД» не управляет углеродным следом получаемой электроэнергии. Однако с внесением в перспективе изменений в законодательство об электроэнергетике возможным инструментом такого управления могут стать так называемые «зеленые сертификаты», выдаваемые производителям электроэнергии с низким углеродным следом.

По итогам анализа изменений в структуре топливно-энергетического баланса (ТЭБ) компании можно сказать следующее: рост доли потребления электроэнергии на тяговые и нетяговые нужды, снижение доли природного газа в нетяговом потреблении (доля процента от общего потребления в стране), малая доля альтернативных топлив (доли процента) означают, что здесь встает задача не только отслеживания изменений ТЭБ железнодорожного транспорта, но в большей степени задача генерации идей и предложений по активной его гармонизации. В данном вопросе важен рост доли потребления экологичного низкоуглеродного природного газа, что к тому же является общегосударственной задачей.

В перевозочном процессе использование низкоуглеродных энергоисточников должно вестись в следующих направлениях:

- электрификация грузонапряженных участков железных дорог;
- использование природного газа в качестве моторного топлива на тяговом подвижном составе;
- рассмотрение возможности использования водорода и накопителей энергии как в тяге поездов, так и при электроснабжении стационарных объектов железных дорог.

В данном контексте также следует рассмотреть перспективы создания и применения инновационных транспортных средств, базирующихся на таких энергоэффективных физических принципах, как вакуумный транспорт или сверхпроводниковая магнитная левитация [5, 6].

В части планируемых мероприятий по *электрификации* необходимо рассмотреть вопросы, связанные с развитием ВСНТ, базирующегося на электрической тяге.

В проектах электрификации обычных линий транспортная наука должна усовершенствовать методологию технико-экономических обоснований (ТЭО) в сопоставлении электрификации с модернизацией тепловозной тяги, имея в виду также газовую моторизацию на участках, находящихся или тяготеющих к районам газодобычи.

В числе анализируемых факторов необходимо учитывать повышенную уязвимость электрифицированных линий с их тяговыми подстанциями в сравнении с автономной тягой, аналогичные риски для крупных объектов электрогенерации, а также принимать во внимание преимущественный фактор резервируемости первичных топлив для автономной тяги в отличие от нерезервируемости электроэнергии.

Следовало бы еще уточнить, насколько корректно в существующей методологии ТЭО учитывается климатическая зависимость контактной сети от обледенения, не относятся ли затраты на борьбу с гололедом на статью по предотвращению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций вместо статьи текущих расходов на эксплуатацию контактной сети. При этом растущая стоимость меди для

контактной сети и трансформаторов тяговых подстанций означает увеличение как капитальных затрат на электрификацию, так и эксплуатационных расходов на ремонтные работы, связанные с заменой изношенных токонесущих элементов на этих объектах.

Энергоснабжение ключевых производственных инициатив ОАО «РЖД» в области развития перевозок и инфраструктуры, в пассажирском комплексе и транспортно-логистических услугах требует от транспортной науки создания и поиска научно-технической продукции энергетического назначения с опорой как на отраслевые исследования и разработки, так и на продуцируемые в системе топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны в его ведомственных интересах с отслеживанием прорывных технических решений фундаментальной науки по программам РАН [3].

В части *применения природного газа в качестве моторного топлива* на подвижном составе необходимо отметить следующее.

Несмотря на более чем 40-летний период исследований и разработок в данном направлении газовые локомотивы до настоящего времени находятся в виде только единичных образцов в подконтрольной эксплуатации или на стадии испытаний.

На сегодня для возобновления интенсивного развития газовой моторизации в автономной тяге необходимо объединить идеи и предложения, планы и намерения представителей транспортной науки, транспортного машиностроения, газовой отрасли, а также инженерных кадров железнодорожного транспорта. Существующие в настоящий момент соглашения между этими отраслями должны быть обновлены и актуализированы. В качестве предложения здесь можно рассмотреть реализацию проекта газовой моторизации тепловозной тяги на участках, действующих в газодобывающих районах на Свердловской и Северной железных дорогах, с их большими объемами перевозочной работы и, соответственно, топливопотребления [7].

Целесообразность предлагаемого проекта газификации тепловозной тяги, с вовлечением полигона Северного широтного хода, должна быть обоснована подробными расчетами для определения ожидаемых показателей, и транспортная наука совместно с локомотивостроителями должна определить типы моделей магистральных и маневровых тепловозов для их перевода на газомоторное топливо.

В области использования *водорода* в качестве топлива [8] перед представителями транспортной науки стоит задача анализа и оценки эффективности водородно-энергетических установок и их адаптации к условиям применения на железнодорожном транспорте. Кроме этого, при развертывании программ водородной энергетики необходимо учесть решение следующих вопросов:

- обеспечение доставки больших объемов водорода из мест производства к местам потребления;
- создание технологий заправки водородом водородно-энергетических установок транспортного назначения;
- обеспечение безопасности эксплуатации водородно-энергетического оборудования на железнодорожном транспорте.

В части развития направления по *использованию накопителей энергии* транспортная наука может обосновать возможность применения энергонакопительных установок, в частности сверхпроводниковых индуктивных накопителей, в электросетевом хозяйстве и на тяговом подвижном составе [9, 10].

В области *применения низкоуглеродных источников в стационарной энергетике* могут быть рассмотрены вопросы собственной электрогенерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с использованием их в системах тепло- и водоснабжения (солнечные коллекторы, тепловые насосы, биотопливо) и по модернизации котельных с переводом их с классических углеводородных топлив (угля, мазута) на низкоуглеродный природный и на сжиженные углеводородные газы.

Поскольку применение ВИЭ является общепризнанной тенденцией декарбонизации в энергетике, то роль транспортной науки состоит в увеличении пока малой их доли в собственной электрогенерации на объектах ОАО «РЖД» с тем условием, чтобы в каждой конкретной реализации была достигнута не только экологическая, но и экономическая эффективность ветровых и солнечных электростанций, а также малых ГЭС при имеющем место удешевлении оборудования, работающего на ВИЭ.

Надо сказать, что в данном направлении одной из актуальных задач является изучение использования новых эффективных энергоисточников (плазменные генераторы, водородные и биотопливные двигатели), работающих на традиционных первичных топливах, и их адаптация к условиям железнодорожного транспорта [3].

В направлении модернизации стационарных объектов теплоэнергетики (котельных) в регионах со слабо развитой газификацией одним из решений данной проблемы является доставка природного газа в сжиженном виде в криогенных цистернах железнодорожного транспорта [11].

В интересах ОАО «РЖД» необходимо продолжить работы в области малоуглеродной генерации в виде создания мощностей на ПНГ. Кроме этого, также необходимо рассмотреть вопрос об использовании малых АЭС в энергодефицитных для компании регионах, в частности на Восточном полигоне.

Упомянутые два низкоуглеродных энергетических предложения не получили пока должного развития, однако на текущем этапе и в ближайшей перспективе они могут оказаться в составе инвестиционных проектов компании.

Анализ расходов ТЭР и создание совершенной системы их учета

По обозначенному направлению можно отметить следующее: планируемые мероприятия по повышению точности учета и цифровизации энергетических систем ОАО «РЖД» могут быть выполнены более успешно, если на горизонтах планирования Стратегии транспортной науке удастся сформировать заказ от железнодорожного транспорта в адрес приборостроительной промышленности на создание приборов учета, в конструкции которых был бы функционально реализован весь спектр различных специфических условий эксплуатации на железнодорожном транспорте.

Среди прочих задач из поля зрения не должно быть упущено увеличение количества и информативности показателей электросетевого комплекса, чтобы показатель уровня потерь в электрических сетях был дополнен другими характеристиками энергоэффективности и энергосбережения. Таким же образом на увеличение количества и информативности показателей энергоэффективности, энергосбережения и углеродоемкости транспортная наука должна быть сориентирована в отношении систем водоотведения, тепло- и водоснабжения, которые на текущий момент характеризуются только удельным расходом первичного топлива на генерацию тепла. То же самое можно сказать в отношении использования низкоуглеродных источников в виде ВИЭ.

Выводы

В заключение следует отметить, что проведенный анализ Стратегии с позиций научного сопровождения ее реализации показывает, что она содержит довольно много проблем, требующих проведения исследовательских работ и осуществления новых технических разработок.

В связи с этим в настоящее время актуальной представляется задача постановки обозначенных вопросов научного сопровождения по реализации Стратегии в виде заявок в планы НИОКР ОАО «РЖД». При этом естественным и логичным видится участие представителей транспортной науки в мониторинге ее реализации и поиске, обосновании и выполнении климатических проектов, проектов декарбонизации и проектов устойчивого развития.

В области рисков в ходе реализации Стратегии необходимо сказать, что они должны быть в поле зрения как в части возможных ограничений доступа предприятий компании к низкоуглеродным ТЭР и энергоэффективным технологиям, так и в части возникновения дефицита энергетической инфраструктуры, ТЭР и опережающего роста их стоимости. От науки в данном направлении требуется решение вопросов по прогнозированию и заблаговременному предупреждению возможных рисков и угроз с реальными предложениями по предотвращающим их мероприятиям.

Список литературы

- 1 Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года / Распоряжение ОАО «РЖД» от 11.02.2008 № 269р. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=35> (дата обращения: 16.12.2025).
- 2 О научном сопровождении энергетической стратегии ОАО «РЖД» / И. В. Мартынюк, В. Н. Носков, В. А. Финоченко, Н. С. Флегонтов // Железнодорожный транспорт. – № 10. – 2024. – С. 30–33. – ISSN 0044-4448.
- 3 Энергетика России. Проблемы и перспективы : труды научной сессии Российской академии наук : Общее собрание Российской академии наук / под редакцией В. Е. Фортова, Ю. Г. Леонова. – Москва : Наука, 2006. – 500 с. – ISBN 5-02-034244-2.

Reference

- 1 Energy strategy of JSC Russian Railways for the period up to 2030 and for the future up to 2035 / Order of JSC Russian Railways dated 11.02.2008 No. 269r. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=35> (date of access: 16.12.2025).
- 2 On scientific support for the energy strategy of JSC Russian Railways / I. V. Martynyuk, V. N. Noskov, V. A. Finochenko, N. S. Flegontov // Railway Transport. – No. 10. – 2024. – P. 30–33. – ISSN 0044-4448.
- 3 Energy of Russia. Problems and prospects : Proceedings of the scientific session of the Russian Academy of Sciences : General collection of the Russian Academy of Sciences / edited by V. E. Fortov, Yu. G. Leonov. – Moscow : Nauka, 2006. – 500 p. – ISBN 5-02-034244-2.

4 Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников, Н. С. Флегонтов [и др.] ; под редакцией В. А. Гапановича. – Москва : ИД МИСиС, 2012. – 620 с. – ISBN 978-5-87623-647-0.

5 Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны : монография / А. А. Зайцев, Е. И. Морозова, Г. Н. Талашкин [и др.]. – Санкт-Петербург : ООО «Тип. «НП-Принт», 2015. – 139 с. – ISBN 978-5-9907561-3-7.

6 **Луконин, А. А.** Технические решения магнитолевитационных технологий на железнодорожном транспорте / А. А. Луконин, В. А. Финченко // Мониторинг. Наука и технологии. – 2018. – № 4. – С. 75–79. – DOI 10.25714/MNT.2018.37.011.

7 Оценка перспектив создания Северного широтного транспортного коридора / Ю. Ш. Блам, В. А. Крюков, В. Ю. Малов [и др.] // ЭКО. – 2016. – № 5. – С. 28–43. – ISSN 0131-7652.

8 **Кузык, Б. Н.** Россия: стратегия перехода к водородной энергетике / Б. Н. Кузык, Ю. В. Яковец. – Москва : Институт экономических стратегий, 2007. – 400 с. – ISBN 978-5-93618-110-8.

9 **Носков, В. Н.** К вопросу использования сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии в железнодорожной тяге / В. Н. Носков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 3. – С. 54–59. – ISSN 0201-727X.

10 **Никитин, В. В.** Применение накопителей энергии для повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава / В. В. Никитин, А. М. Евстафьев, Т. С. Титова // Электротехника. – 2018. – № 10. – С. 21–25. – ISSN 0013-5860.

11 **Черемных, О. Я.** Перспектива развития транспортных средств для сжиженного природного газа / О. Я. Черемных // Инженерный журнал : наука и инновации. – 2018. – № 1. – DOI 10.18698/2308-6033-2018-1-1722.

4 Energy saving in railway transport / V. A. Gapanovich, V. D. Avilov, B. A. Arzhannikov, N. S. Flegontov [et al.] ; edited by V. A. Gapanovich. – Moscow : Publishing House MISiS, 2012. – 620 p. – ISBN 978-5-87623-647-0.

5 Magnetolevitation transport in the unified transport system of the country: monograph / A. A. Zaitsev, E. I. Morozova, G. N. Talashkin [et al.]. – Saint-Petersburg : Llc. “Pr. House. “NP-Print”, 2015. – 139 p. – ISBN 978-5-9907561-3-7.

6 **Lukonin, A. A.** Technical solutions for magnetic levitation technologies in railway transport / A. A. Lukonin, V. A. Finchenko // Monitoring. Science and Technology. – 2018. – No. 4. – P. 75–79. DOI 10.25714/MNT.2018.37.011.

7 Assessment of the prospects for the creation of the Northern Latitudinal Transport Corridor / Yu. Sh. Blam, V. A. Kryukov, V. Yu. Malov [et al.] // ECO. – 2016. – No. 5. – P. 28–43. – ISSN 0131-7652.

8 **Kuzyk, B. N.** Russia : strategy of transition to hydrogen energy / B. N. Kuzyk, Yu. V. Yakovets. – Moscow : Institute of Economic Strategies, 2007. – 400 p. – ISBN 978-5-93618-110-8.

9 **Noskov, V. N.** On the issue of using superconducting inductive energy storage devices in railway traction / V. N. Noskov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2008. – No. 3. – P. 54–59. – ISSN 0201-727X.

10 **Nikitin, V. V.** Application of energy storage devices to improve the energy efficiency of traction rolling stock / V. V. Nikitin, A. M. Evstafiev, T. S. Titova // Elektrotehnika. – 2018. – No. 10. – P. 21–25. – ISSN 0013-5860.

11 **Cheremnykh, O. Ya.** Prospects for the development of vehicles for liquefied natural gas / O. Ya. Cheremnykh // Engineering Journal : Science and Innovation. – 2018. – No. 1. – DOI 10.18698/2308-6033-2018-1-1722.

I. V. Martynyuk, N. V. Noskov, V. A. Finochenko, N. S. Flegontov

ON THE ISSUE OF SCIENTIFIC SUPPORT FOR THE ENERGY STRATEGY OF RAILWAY TRANSPORT

Abstract. The article is devoted to issues related to the scientific support of the implementation of the new Energy strategy of railway transport.

In terms of increasing energy saving and energy efficiency, issues related to the transportation process and traction rolling stock are being considered: the development of methods to reduce energy consumption in the wheel–rail system, the efficient operation of a continuous welded track and the improvement of lubrication technologies.

In the application of low-carbon energy sources, the effectiveness of measures such as electrification of high-load railway sections, the use of natural gas as a motor fuel, the possibility of

using hydrogen and energy storage is being evaluated. In the stationary energy sector, it is proposed to consider the possibility of its own electric generation based on renewable energy sources using them in heat and water supply systems (solar collectors, heat pumps, biofuels) and upgrading boilers with their conversion to low-carbon natural and liquefied petroleum gases.

In the field of improving the accounting system for fuel and energy resources, the possibility of increasing the number and information content of energy efficiency, energy conservation and carbon intensity indicators in relation to wastewater, heat and water supply systems is being analyzed. The possibility of using low-carbon sources in the form of renewable energy sources is also noted.

Keywords: railway transport, energy strategy, energy conservation, low-carbon energy sources.

For citation: On the issue of scientific support for the energy strategy of railway transport / I. V. Martynyuk, V. N. Noskov, V. A. Finochenko, N. S. Flegontov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 207–213. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_207.

Сведения об авторах

Мартынюк Игорь Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Научно-исследовательский и испытательный центр «Криотрансэнерго»,
директор, кандидат технических наук,
e-mail: mnv_kte@rgups.ru

Носков Владимир Николаевич

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

Финоченко Виктор Анатольевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
доктор технических наук, профессор,
декан энергетического факультета,
e-mail: fin@rgups.ru

Флегонтов Николай Степанович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Научно-исследовательский и испытательный центр «Криотрансэнерго»,
ведущий инженер,
e-mail: centrkte@rgups.ru

Information about the authors

Martynyuk Igor Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Research and Testing Center “Kriotransenergo”,
Director, Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: mnv_kte@rgups.ru

Noskov Vladimir Nikolaevich

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

Finochenko Victor Anatolyevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Life Safety”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Dean of the Power Engineering Department,
e-mail: fin@rgups.ru

Flegontov Nikolai Stepanovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Scientific Research Center “Kriotransenergo”,
Lead Engineer,
e-mail: centrkte@rgups.ru

В. А. Осипов

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ТОКОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ ДЛЯ ТЯГОВОЙ СЕТИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЭКРАНИРУЮЩИМ ПРОВОДНИКОМ

Аннотация. Получены расчетные соотношения для определения величины тока в металлической оболочке волоконно-оптического кабеля, являющегося элементом тяговой сети с комбинированным экранирующим проводником. Цепь обратного тока электрифицированной железной дороги рассматривалась как линия с распределёнными параметрами, и при определении суммарного тока в металлической оболочке кабеля кроме тока, ответвляющегося из рельсового пути в оболочку волоконно-оптического кабеля, учитывались также токи, образованные в результате взаимной индуктивной связи металлической оболочки с контактной сетью и рельсовым путем. Полученные аналитические соотношения необходимы для принятия решения о термической стойкости волоконно-оптического кабеля к длительно протекающим рабочим токам при работе в составе тяговой сети переменного тока.

Ключевые слова: тяговая сеть, волоконно-оптический кабель, система с комбинированным экранирующим проводником, термическая стойкость.

Для цитирования: Осипов, В. А. Расчет рабочих токов волоконно-оптического кабеля для тяговой сети с комбинированным экранирующим проводником / В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 214–222. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_4_214.

Введение

Комплексный подход к повышению энергоэффективности электрифицированных железных дорог переменного тока предполагает введение в качестве элемента тяговой сети металлической оболочки волоконно-оптического кабеля. Особенность таких кабелей заключается в возможности одновременно выполнять роль канала для передачи информации посредством оптической связи и быть проводником электрического тока. При протекании последнего, очевидно, возникают потери энергии, выделяемой в виде тепла на металлических элементах кабеля. В отличие от витых стальных и сталеалюминевых канатов у волоконно-оптического кабеля максимально допустимая температура значительно ниже, поэтому встает вопрос о необходимости расчета максимальных токов, протекающих в рабочем режиме в экранирующем проводнике, функцию которого выполняет волоконно-оптический кабель.

Основная часть

Для определения величины тока в металлической оболочке волоконно-оптического кабеля, выполняющего функцию обратного провода, предлагается изложенный ниже подход. Рассмотрим на первом этапе однопутный участок железной дороги переменного тока, заменим экранирующий проводник – кабель ОКГТ и две нитки рельса эквивалентным распределенным проводником. В расчете будем полагать, что рельсовая цепь и экран соединены параллельно в весьма большом числе мест (рис. 1).

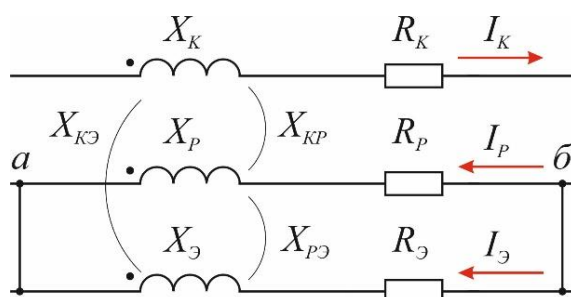


Рис. 1. Схема замещения элемента тяговой сети с комбинированным экранирующим проводником

Для участка тяговой сети, показанной на рис. 1, можно составить уравнение:

$$\dot{I}_P Z_P + \dot{I}_Э Z_{ЭP} - \dot{I}_K Z_{KP} = \dot{I}_Э Z_Э + \dot{I}_P Z_{ЭP} - \dot{I}_K Z_{KЭ}. \quad (1)$$

Учитывая, что ток в эквивалентном проводнике определяется как

$$\dot{i} = \dot{i}_P + \dot{i}_\Delta, \quad (2)$$

перепишем уравнение (1):

$$\dot{i}_P (Z_P + Z_\Delta - 2 \cdot Z_{\Delta P}) + \dot{i}_K (Z_{K\Delta} - Z_{KP}) = \dot{i} (Z_\Delta - Z_{\Delta P}). \quad (3)$$

Ток в эквивалентном проводнике

$$\dot{i} = \dot{i}_P \frac{Z_P + Z_\Delta - 2 \cdot Z_{\Delta P}}{Z_\Delta - Z_{\Delta P}} + \dot{i}_K \frac{Z_{K\Delta} - Z_{KP}}{Z_\Delta - Z_{\Delta P}}. \quad (4)$$

Ток в рельсе

$$\dot{i}_P = \frac{\dot{i} (Z_\Delta - Z_{\Delta P}) + \dot{i}_K (Z_{KP} - Z_{K\Delta})}{Z_P + Z_\Delta - 2 \cdot Z_{\Delta P}}. \quad (5)$$

Ток в экране найдем согласно (2), вычитая из (4) выражение (5):

$$\dot{i}_\Delta = \frac{\dot{i} (Z_P - Z_{\Delta P}) + \dot{i}_K (Z_{K\Delta} - Z_{KP})}{Z_P + Z_\Delta - 2 \cdot Z_{\Delta P}}. \quad (6)$$

Напряжение на концах участка $a - б$ определяется выражением

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{i}_P Z_P + \dot{i}_\Delta Z_{\Delta P} - \dot{i}_K Z_{KP}; \\ \dot{U}_{ab} &= \frac{\dot{i} (Z_\Delta - Z_{\Delta P}) (Z_P + Z_{\Delta P}) + \dot{i}_K (Z_{KP} - Z_{K\Delta}) (Z_P + Z_{\Delta P})}{Z_P + Z_\Delta - 2 \cdot Z_{\Delta P}} - \dot{i}_K Z_{KP}. \end{aligned}$$

После преобразования получим

$$\dot{U}_{ab} = \dot{i} \frac{Z_P Z_\Delta - Z_{\Delta P}^2}{Z_P + Z_\Delta - 2 \cdot Z_{\Delta P}} - \dot{i}_K \frac{Z_P Z_{K\Delta} + Z_\Delta Z_{\Delta P} - Z_{\Delta P} (Z_{K\Delta} + Z_{KP})}{Z_P + Z_\Delta - 2 \cdot Z_{\Delta P}}. \quad (7)$$

В выражении (7) первое слагаемое – это падение напряжения, возникающее в эквивалентном проводнике вследствие протекания по нему эквивалентного тока I , второе слагаемое – это ЭДС взаимной индукции, наводимая в эквивалентном проводе током контактной сети I_K . Представив (7) в виде

$$\dot{U}_{ab} = \dot{i} \cdot Z_{\text{экв}} - \dot{i}_K \cdot Z_M,$$

запишем выражения для расчета собственного сопротивления и сопротивления взаимной индукции для эквивалентного проводника:

$$Z_{\text{экв}} = r_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}} = \frac{Z_P Z_\Delta - Z_{\Delta P}^2}{Z_P + Z_\Delta - 2 \cdot Z_{\Delta P}}; \quad (8)$$

$$Z_M = j\omega M_{\text{экв}} = \frac{Z_P Z_{K\Delta} + Z_\Delta Z_{\Delta P} - Z_{\Delta P} (Z_{K\Delta} + Z_{KP})}{Z_P + Z_\Delta - 2 \cdot Z_{\Delta P}}. \quad (9)$$

Используя подход, описанный в [1], запишем систему уравнений, где в качестве обратного провода используется эквивалентный проводник:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = ir_{\text{экв}} + L_{\text{экв}} \frac{\partial i}{\partial t} - M_{\text{экв}} \frac{\partial i_K}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = ug \end{cases}. \quad (10)$$

С учетом того, что ток и напряжения синусоидальны:

$$\begin{cases} -\frac{\partial \dot{U}}{\partial x} = \dot{I}_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}} \dot{I} - j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K \\ -\frac{\partial \dot{I}}{\partial x} = \dot{U}g \end{cases}$$

Перепишем второе уравнение, с учётом этого первое приобретет вид

$$-\frac{\partial \dot{U}}{\partial x} = \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x^2} = g \left[\dot{I}_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}} \dot{I} - j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K \right].$$

Введем обозначение

$$\gamma^2 = (r_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}})g,$$

с учетом которого запишем

$$\frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x^2} - \dot{I}\gamma^2 = -j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K.$$

Решение неоднородного дифференциального уравнения второй степени будем искать в виде общего и частного решения, где общее решение

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x^2} - \dot{I}\gamma^2 &= 0; \\ \dot{I} &= A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x}. \end{aligned}$$

Для нахождения частного решения определим коэффициенты методом вариации произвольных постоянных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{I}}{\partial x^2} - \dot{I}\gamma^2 &= 0; \\ \dot{I} &= A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x}; \\ \begin{cases} A_1' e^{-\gamma x} + A_2' e^{\gamma x} = 0; \\ -\gamma A_1' e^{-\gamma_0 x} + \gamma A_2' e^{\gamma x} = -j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K; \end{cases} \\ -A_1' e^{-\gamma x} &= A_2' e^{\gamma x}; \\ \gamma A_2' e^{\gamma x} + \gamma A_2' e^{\gamma x} &= -j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K; \\ A_2' &= \frac{-j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{2\gamma} e^{-\gamma x}; \\ A_1' &= \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{2\gamma} e^{\gamma x}. \end{aligned}$$

Интегрируя по расстоянию, получим:

$$A_1 = \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{2\gamma^2} e^{\gamma x} + B_1; \quad A_2 = \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{2\gamma^2} e^{-\gamma x} + B_2;$$

$$i = B_1 e^{-\gamma x} + B_2 e^{\gamma x} + \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2};$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -\gamma B_1 e^{-\gamma x} + \gamma B_2 e^{\gamma x} = -\dot{U}g;$$

$$\frac{\dot{U}}{Z_C} = B_1 e^{-\gamma x} - B_2 e^{\gamma x}.$$

Обозначив напряжение и ток в начале линии как U_A и I_A и положив $x = 0$, получим

$$B_1 = \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right); \quad B_2 = \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A - \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right).$$

Подставив в уравнения

$$\begin{aligned} i &= \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right) e^{\gamma x} + \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \\ \frac{\dot{U}}{Z_C} &= \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2} \left(\dot{I}_A + \frac{\dot{U}_A}{Z_C} - \frac{j\omega g M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{\gamma^2} \right) e^{\gamma x} \end{aligned}$$

окончательно запишем:

$$i = \left(\dot{I}_A - \frac{j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{Z_{\text{экв}}} \right) ch(\gamma x) - \frac{\dot{U}_A}{Z_C} sh(\gamma x) + \frac{j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{Z_{\text{экв}}}; \quad (11)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_A \cdot ch(\gamma x) - \left(\dot{I}_A \cdot Z_C - j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K \frac{Z_C}{Z_{\text{экв}}} \right) sh(\gamma x). \quad (12)$$

Применим принцип наложения и разделим ток, протекающий в эквивалентном проводнике, на компоненту, индуцированную полем контактной сети, и компоненту, обусловленную стеканием тока с ЭПС в рельс. Для определения граничных значений тока, протекающего в эквивалентном проводнике, в результате взаимной индуктивной связи с контактной сетью рассмотрим рис. 2, а. Здесь представлена расчетная схема участка железной дороги переменного тока.

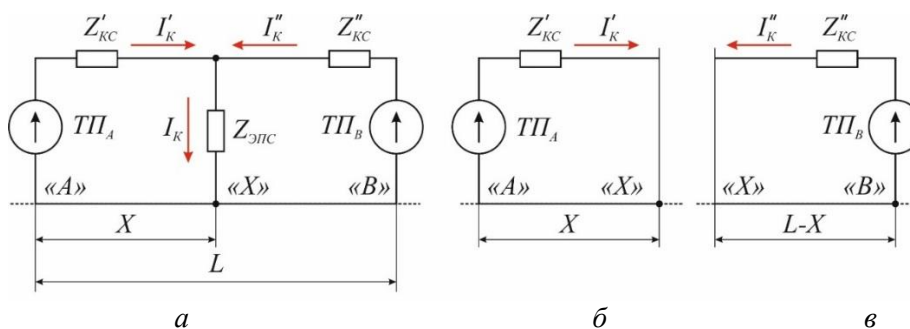


Рис. 2. Пояснение к расчету граничных параметров

Проводник обратного тока не ограничен участком «AB», а продолжается левее и правее рассматриваемого участка теоретически бесконечно далеко. Так как анализируется только индуцированная составляющая тока, заменим исходную схему на рис. 2, а двумя частными схемами – на рис. 2, б и 2, в. Для схемы на рис. 2, б справедливо утверждение, что

$$\dot{U}_A = -\dot{U}_X. \quad (13)$$

Учитывая, что входное сопротивление цепи обратного тока как линии с распределенными параметрами, одним проводником которой является эквивалентный провод, а другим земля, определяется выражением

$$Z_{BX} = \frac{Z \cdot Z_C + Z_C^2 \cdot th(\gamma x)}{Z + Z_C \cdot th(\gamma x)}, \quad (14)$$

и при условии, что цепь обратного тока слева и справа от рассматриваемого участка теоретически бесконечна $th(\gamma x) = 1$, следовательно, $Z_{BX} = Z_C$. Таким образом

$$\dot{U}_A = -\dot{I}_A \cdot Z_C. \quad (15)$$

Знак «минус» в (14) объясняется тем, что индуцированный ток в обратном проводнике направлен из точки «X» в точку «A», следовательно, в точке «A» ток стекает в землю из проводника, а в точке «X» направлен из земли в проводник. Подставим в (12) вместо переменной x координату «X», с учетом (13) получим

$$-\dot{U}_A = \dot{U}_A \cdot ch(\gamma X) - Z_C \left(\dot{I}_A - \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \right) sh(\gamma X).$$

Преобразуя выражение с учетом (13) и (15), получим

$$-\dot{U}_A = \dot{U}_A \cdot ch(\gamma X) + \dot{U}_A \cdot sh(\gamma X) + \dot{I}_K Z_C \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} sh(\gamma X).$$

Упрощая, получим

$$\dot{U}_A = -\dot{I}_K Z_C \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \frac{(e^{\gamma X} - e^{-\gamma X})}{(1 + e^{\gamma X})}.$$

Учитывая (15) и сделав ряд преобразований, получим

$$\begin{aligned} \dot{I}_A = \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \frac{e^{\gamma X} (1 - e^{-2\gamma X})}{e^{\gamma X} (e^{-\gamma X} + 1)} &= \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \frac{(1 - e^{-\gamma X})(1 + e^{\gamma X})}{(1 + e^{-\gamma X})}, \\ \dot{I}_A &= \frac{1}{2} \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} (1 - e^{-\gamma X}). \end{aligned} \quad (16)$$

Используя соотношение (16), определим закон изменения индуцированной компоненты тока как функцию расстояния. Для этого используем выражения (11) и (15):

$$\begin{aligned} \dot{i} &= \left(\dot{I}_A - \frac{j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{Z_{\text{экв}}} \right) ch(\gamma x) + \dot{I}_A sh(\gamma x) + \frac{j\omega M_{\text{экв}} \dot{I}_K}{Z_{\text{экв}}}; \\ \dot{i} &= \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K (1 - ch(\gamma x)) + \dot{I}_A e^{\gamma x} \end{aligned}$$

Подставив в полученное выражение соотношение (16), получим

$$\begin{aligned} \dot{i} &= \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K (1 - ch(\gamma x)) + \frac{1}{2} \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} (1 - e^{-\gamma X}) e^{\gamma x} = \\ &= \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K - \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K e^{\gamma x} - \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K e^{-\gamma x} + \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K e^{\gamma x} - \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} e^{\gamma x} e^{-\gamma X} = \\ &= \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K - \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} \dot{I}_K e^{-\gamma x} - \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{2Z_{\text{экв}}} e^{\gamma x} e^{-\gamma X}. \end{aligned}$$

Компонента тока, индуцированная в эквивалентном проводнике, определяется соотношением

$$\dot{I}_H = j\omega \dot{I}_K \frac{M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \left[1 - \frac{1}{2} (e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)}) \right]. \quad (17)$$

Для определения закона изменения токов, втекающих в эквивалентный проводник в точке приложения тяговой нагрузки, используем соотношения (11) и (12), отбросив в них компоненту, обусловленную магнитным влиянием на эквивалентный проводник поля контактной сети:

$$\dot{I} = \dot{I}_A \operatorname{ch}(\gamma x) - \frac{\dot{U}_A}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma x); \quad (18)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_A \operatorname{ch}(\gamma x) - \dot{I}_A Z_C \operatorname{sh}(\gamma x). \quad (19)$$

Учтем принятое допущение, что рельсовая цепь и экран, а следовательно, и эквивалентный проводник бесконечны в обе стороны. При этом тяговой ток, стекающий с ЭПС в рельсы, будет течь вправо и влево от места, где расположена нагрузка. Доли этого тока в общем случае будут равны между собой, так как входное сопротивление цепи обратного тока в обе стороны также будет одинаково и равно волновому сопротивлению $Z_{BX} = Z_C$. Ток в обратном проводнике вблизи тяговой подстанции, очевидно, будет равен току вблизи места приложения нагрузки, при этом вблизи нагрузки ток будет стекать из рельсов в землю, а вблизи подстанции, напротив, ток будет направлен из земли в рельсы.

С учетом сделанных замечаний напряжение, возникающее на эквивалентном проводнике обратного тока относительно идеальной земли около тяговой подстанции, и ток в эквивалентном проводе будут определяться выражениями:

$$\dot{U}_A = \frac{1}{2} \dot{I}_K Z_C; \quad \dot{I}_A = \frac{1}{2} \dot{I}_K.$$

После подстановки в (18) получим уравнение, описывающее изменение тягового тока в эквивалентном проводнике, втекающего в него из земли:

$$\dot{I}_B = \frac{1}{2} \dot{I}_K \operatorname{ch}(\gamma x) - \frac{1}{2} \dot{I}_K \operatorname{sh}(\gamma x) = \frac{1}{2} \dot{I}_K e^{-\gamma x}. \quad (20)$$

Пользуясь аналогичными рассуждениями, можно записать соотношение для тягового тока, стекающего из рельсов в землю. Запишем систему уравнений для эквивалентного проводника, полагая что известны ток и напряжения в месте приложения тяговой нагрузки:

$$\begin{cases} \dot{I} = \dot{I}_x \operatorname{ch}(\gamma x) + \frac{\dot{U}_x}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma x); \\ \dot{U} = \dot{U}_x \operatorname{ch}(\gamma x) + \dot{I}_x Z_C \operatorname{sh}(\gamma x). \end{cases} \quad (21)$$

Учитывая, что в системе (21) координата x отсчитывается от «конца линии», точки «X», т.е. от места приложения тяговой нагрузки, выполним замену таким образом, чтобы отчет шел от начала линии, от точки «A»:

$$\begin{cases} \dot{I} = \dot{I}_x \operatorname{ch}(\gamma(X-x)) + \frac{\dot{U}_x}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma(X-x)); \\ \dot{U} = \dot{U}_x \operatorname{ch}(\gamma(X-x)) + \dot{I}_x Z_C \operatorname{sh}(\gamma(X-x)). \end{cases} \quad (22)$$

В месте стекания тягового тока напряжение, возникающее на эквивалентном проводнике обратного тока относительно идеальной земли, и ток в эквивалентном проводе будут определяться выражениями:

$$\dot{U}_x = -\frac{1}{2} \dot{I}_K Z_C; \quad \dot{I}_x = \frac{1}{2} \dot{I}_K. \quad (23)$$

$$\dot{I}_C = \frac{1}{2} \dot{I}_K \operatorname{ch}(\gamma(X-x)) - \frac{1}{2} \dot{I}_K Z_C \frac{1}{Z_C} \operatorname{sh}(\gamma(X-x)) = \frac{1}{2} \dot{I}_K e^{-\gamma(X-x)}. \quad (24)$$

Полный ток в эквивалентном проводнике будет описываться соотношением

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_H + \dot{I}_B + \dot{I}_C; \\ \dot{I} &= \frac{1}{2} \dot{I}_K \left(\frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \left[2 - \left(e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)} \right) \right] + e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)} \right); \\ \dot{I} &= \dot{I}_K \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} + \frac{1}{2} \dot{I}_K \left(1 - \frac{j\omega M_{\text{экв}}}{Z_{\text{экв}}} \right) \left(e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

Для расчета тока, протекающего непосредственно в металлической оболочке волоконно-оптического кабеля, следует воспользоваться ранее полученным выражением. Подставляя в (6) выражение (25), запишем соотношение для расчета тока:

$$\dot{I}_\Omega = \dot{I}_K \left[\frac{Z_M}{Z_{\text{экв}}} + \frac{(Z_{K\Omega} - Z_{KP})}{Z_P + Z_\Omega - 2Z_{\Omega P}} + \left(\frac{1}{2} - \frac{Z_M}{2Z_{\text{экв}}} \right) \frac{(Z_P - Z_{\Omega P})}{Z_P + Z_\Omega - 2Z_{\Omega P}} \left(e^{-\gamma x} + e^{-\gamma(X-x)} \right) \right]. \quad (26)$$

Здесь коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{(r_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}})g}. \quad (27)$$

При расчете тока, протекающего в оболочке волоконно-оптического кабеля, следует учитывать тот факт, что, как было указано выше, ток стекает в землю с обеих сторон от места приложения тяговой нагрузки, аналогично обстоит ситуация и с током в месте, где ток возвращается в цепи отсоса подстанции. С учетом того что ток, возвращающийся в эквивалентный проводник левее тяговой подстанции «А», и ток, стекающий в землю правее точки «Х», будет направлен встречно току в рельсах на данном участке, в (20) и (24) следует поставить знак минус перед выражениями

$$\dot{I}_{B'} = -\frac{1}{2} \dot{I}_K e^{-\gamma x}; \quad (28)$$

$$\dot{I}_{C'} = -\frac{1}{2} \dot{I}_K e^{-\gamma(X-x)}. \quad (29)$$

Выводы

Величина тока в экранирующем проводнике является функцией нескольких переменных и может быть определена в результате расчета на имитационной модели с использованием выражения (26). Очевидно, что ток вдоль экранирующего проводника изменяется вследствие стекания его в землю вблизи нагрузки и возврата из земли вблизи питающего центра. Расчет процесса нагрева волоконно-оптического кабеля по усредненному результату расчета производить нецелесообразно, так как ток в различных сечениях будет неодинаков. Следует также принимать во внимание изменяющийся характер нагрузки. Все перечисленные факты позволяют утверждать, что расчет температуры нагрева оболочки кабеля целесообразно вести за весьма малые интервалы времени, с учетом начальных условий температуры, что возможно выполнить с использованием современных вычислительных средств.

Список литературы

- 1 Электротермическая деградация оптического кабеля на участках железных дорог переменного тока / Ю. И. Филиппов, Э. Е. Асс, Л. Е. Попов [и др.] // Lightwave Russian Edition. – 2006. – № 3. – С. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 Оплавление диэлектрического оптического кабеля, подвешенного на железнодорожных опорах под действием электротермической деградации / И. Н. Чернов, В. И. Муратов, С. М. Куценко, С. А. Зеленов // Lightwave Russian Edition. – 2007. – № 2. – С. 34–35. – ISSN 0741-5834.

References

- 1 Electrothermal degradation of optical cable on AC railway sections. / Yu. I. Filippov, E. E. Ass, L. E. Popov [et al.] // Lightwave Russian Edition. – 2006. – No 3. – P. 20–24. – ISSN 0741-5834.
- 2 Melting of dielectric optical cable suspended on railway supports under the influence of electrothermal degradation / I. N. Chernov, V. I. Muratov, S. M. Kutsenko, S. A. Zelenev // Lightwave Russian Edition. – 2007. – No 2. – P. 34–35. – ISSN 0741-5834.

3 Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения / В. А. Осипов, Г. Е. Соловьев, Е. В. Гороховский, А. А. Капкаев // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539 (дата обращения 27.11.2025).

4 **Гороховский, Е. В.** Условия электропроводности самонесущего волоконно-оптического кабеля. Экспериментальные данные / Е. В. Гороховский // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (дата обращения 27.11.2025).

5 Каталог кабельной продукции ООО ТПК «БИЛМАРТ», КАБЕЛЬ-ИРКУТСК. – URL: https://kabelir-kutsk.ru/shop/goods/kabel_okms_022_24_G652D_7kn-86525 (дата обращения 27.11.2025).

6 **Осипова, А. И.** Расчет токов короткого замыкания сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / А. И. Осипова, Ю. И. Жарков // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/nby2023/8489 (дата обращения 27.11.2025).

7 Техника высоких напряжений / И. М. Боготенков, 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.

8 **Микаэльян, Е. Ю.** Моделирование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока / Е. Ю. Микаэльян, В. Н. Черных // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (дата обращения 27.11.2025).

9 **Лысенко, В. Г.** Определение границ участка тяговой сети с устойчивым коротким замыканием / В. Г. Лысенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1. – С. 145–152. – ISSN 0201-727X.

10 **Безуглый, А. В.** Актуальные проблемы повышения энергетической эффективности в современных условиях / А. В. Безуглый, В. Н. Черных // Сборник научных трудов «Транспорт : наука, образование, производство». Том 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 16–19.

11 **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.

3 Problems of electrothermal degradation of fiber-optic communication lines and promising directions for their solution / V. A. Osipov, G. E. Solovyov, E. V. Gorokhovskiy, A. A. Kapkaev // Engineering Journal of Don. – 2013. – № 1. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1539 (date of access: 27.11.2025).

4 **Gorokhovskiy, E. V.** Conditions of electrical conductivity of a self-supporting fiber-optic cable. Experimental data / E. V. Gorokhovskiy // Engineering Journal of Don. – 2013. – № 4. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1968 (date of access: 27.11.2025).

5 Catalog of cable products of LLC TPK "BILMART", KABEL-IRKUTSK. – URL: https://kabelir-kutsk.ru/shop/goods/kabel_okms_022_24_G652D_7kn-86525 (date of access: 27.11.2025).

6 **Osipova, A. I.** Calculation of short-circuit currents of the DC network when using a two-level system of group grounding of supports / A. I. Osipova, Yu. I. Zharkov // Engineering Journal of Don. – 2023. – № 6. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/nby2023/8489 (date of access: 27.11.2025).

7 High voltage engineering / I. M. Bogotenkov, Yu. N. Bocharov, N. I. Gumerova, G. M. Imanov ; edited by Professor G. S. Kuchinsky. – Saint Petersburg : Energoatomizdat. St. Petersburg Branch, 2003. – 608 p. – ISBN 5-283-04757-1.

8 **Mikaelyan, E. Y.** Modeling of electromagnetic fields of an AC Railway Section / E. Y. Mikaelyan, V. N. Chernykh // Engineering Journal of Don. – 2019. – № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2019/6155 (date of access: 27.11.2025).

9 **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.

10 **Bezugly, A. V.** Actual problems of increasing energy efficiency in modern conditions / A. V. Bezugly, V. N. Chernykh // Collection of scientific papers «Transport : science, education, production». Volume 2. – Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2023. P. 16–19.

11 **Trubitsin, M. A.** Prolongation of the service life of electrical equipment / M. A. Trubitsin // Collection of scientific papers «Transport : science, education, production». Volume 3. Rostov-on-Don : Rostov State Transport University, 2022. – P. 51–54.

V. A. Osipov

CALCULATION OF OPERATING CURRENTS IN FIBER-OPTIC CABLES FOR A TRACTION NETWORK WITH A COMBINED SHIELDING CONDUCTOR

Abstract. This paper describes the development of calculation relationships for determining the current in the metal sheath of a fiber-optic cable, which is a part of a traction network with a combined shielding conductor. The return current circuit of an electrified railway is considered as a line with distributed parameters. When determining the total current in the cable's metal sheath, in addition to the current branching from the track into the fiber-optic cable sheath, currents generated by the mutual inductive coupling of the metal sheath with the overhead contact system and the track are also taken into account. The obtained analytical relationships are necessary for determining the thermal stability of fiber-optic cables against long-term operating currents when used in AC traction networks.

Keywords: traction network, fiber-optic cable, system with a combined shielding conductor, thermal stability.

For citation: Osipov, V. A. Calculation of operating currents in fiber-optic cables for a traction networks with a combined shielding conductor / V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 214–222. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_4_214.

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

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК РГУПС»

1 **Материалы статей** представляют в виде текстов, отформатированных и распечатанных на лазерном или струйном принтере (пригодных для сканирования) на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) в одном экземпляре. Рекомендуемый объем статьи – 5–15 страниц.

Одновременно представляют электронную версию статьи, выполненной в текстовом редакторе Word for Windows, шрифт Times New Roman, 11 pt, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание по ширине, абзацный отступ – 1,25 см, все поля – 2 см.

2 На первой странице должны быть указаны:

- **УДК** – в левом верхнем углу;
- интервал;
- **инициалы и фамилии авторов** – по центру, курсивом;
- интервал;
- **название статьи** – заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру, без переносов;
- интервал;
- **аннотация** (80–150 слов);
- **ключевые слова** (5–10 слов);
- интервал;
- **текст статьи** – печатается с переносами.
- интервал;
- **список литературы** на русском и английском языках (не менее 10 источников).

3 **Статья** должна содержать вводную часть, цель научной разработки, основную часть и выводы. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки журнала на компьютере.

4 **Буквы** латинского алфавита набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5 **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6 **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисовочная подпись обязательны.

7 **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8 **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9 **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

Условия и порядок публикации статей в журнале

- 1** Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.
- 2** Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.
- 3** Автор может прислать статью в адрес редакции:
 - по почте;
 - по электронной почте;
 - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4** Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

- 5** Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

6 На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.

7 Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.

Краткая информация о журнале

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный сериальный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В. И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» (www.pressa-rg.ru под индексом 53720).

Подписаться на журнал можно через агентство подписки «Урал-Пресс» и агентство «АРЗИ», распространяется журнал на территории Российской Федерации. Подписку можно оформить на квартал, на полгода или на год.

Журнал «Вестник РГУПС» бесплатно рассылается всем отраслевым вузам, в ряд вузов Министерства образования и науки России, центральным и зональным научно-техническим библиотекам, НИИ информации.

Почтовый адрес редакции:

3344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2.
Ростовский государственный университет путей сообщения.
Редакция журнала «Вестник РГУПС».
Телефон: +7 (863) 272-62-74. Факс: +7 (863) 255-37-85.
E-mail: pmv_nis@rgups.ru; nis@rgups.ru (дополнительный).

Архив журнала и требования по оформлению статей размещены на сайте <http://vestnik.rgups.ru>.

Научное издание

**ВЕСТНИК
Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

**№ 4 (100)
2025**

Уважаемые читатели!

**Вы можете подписаться на наш журнал на сайте www.pressa-rg.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 29.12.2025.
Дата выхода в свет 30.12.2025.
Печать офсетная.
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 26,26.
Тираж 510 экз.
Цена свободная.

Бумага офсетная.
Изд. № 66.
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.**