

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 (96)

Ростов-на-Дону
2024

ВЕСТНИК

Ростовского государственного университета путей сообщения

2024
№ 4 (96)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Болгова Е.А., Мукутадзе М.А., Колобов И.А. Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом сжимаемости смазочного материала.....	8
Больших И.В., Ананко А.М., Склифус Я.К., Аникина Е.Д. Исследование адгезионной прочности антифрикционных покрытий на основе фенилона.....	20
Иваночкин П.Г., Аникина Е.Д., Больших Е.П. Анализ состояния поверхности металлического контртела при взаимодействии с антифрикционным покрытием, содержащим ПТФЭ.....	28
Поляков В.Н. Методика определения параметров эксцентриситета гидродинамического подшипника скольжения.....	34
Рыжов С.П. Экспериментальные исследования спектрального состава шума зубодолбежных станков.....	41
Колесников И.В., Шаповалов В.В., Коваленко О.И., Политыко К.Н., Колодяжный И.А. Нанесение износостойких PVD-покрытий на фрикционные поверхности шестерен и муфт-шестерен перспективной автоматической коробки передач.....	49
Шаповалов В.В., Саямова Т.Л., Горин С.Л., Рябыш Д.А., Коваленко О.И. Разработка фрикционной многодисковой соединительной муфты для передвижных электростанций....	60

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Колоденкова А.Е., Верещагина С.С., Тарутин Н.А. Разработка структуры гибридной нейронной сети для системы мониторинга и идентификации неисправностей электрической подстанции.....	70
---	----

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Логунова П.А. Организация учета расхода электроэнергии на тягу поездов на тяговых подстанциях железных дорог постоянного тока.....	80
Маниковский А.С., Яковлев Д.А., Мухопад А.Ю. Повышение точности методов прогнозирования электропотребления в системе управления электроснабжением железнодорожного транспорта.....	87

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Гончаренко В.А., Хомоненко А.Д., Абу Хасан Р., Ермаков С.Г., Ходаковский В.А. К оценке уровня надежности и управлению конфигурацией RAID-массивов системы хранения данных на основе нечеткого вывода.....	94
Ковалев С.М., Бутакова М.А., Гуда А.Н., Ольгейзер И.А., Суханов А.В. Обзор трудов конференции ПТГ'24.....	107
Пугачев И.Н., Тормозов В.С. Разработка и анализ системы мониторинга дорожного движения, основанной на технологиях машинного зрения и методах кластерного анализа..	134

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

Верескун В.Д., Воробьев В.С., Купреева Н.Ю., Репина И.Б. Формирование развития транспортной сети Северо-Восточного региона РФ.....	146
Верескун В.Д., Гуда А.Н., Мамаев Э.А. Методы управления рисками и надежностью в транспортно-логистических цепях поставок.....	153
Ковалев К.Е., Новичихин А.В. Оценка рисков при эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий.....	161
Наурузбаев С.М. К вопросу оптимизации принятия решения об организации продвижения транспортных потоков на направлениях коридора «Север – Юг».....	173
Середов Е.А. Особенности перевозок пассажиров с транспортными средствами для личного пользования железнодорожным транспортом.....	184

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Бейн Д.Г., Цыганская Л.В., Таничева Н.А., Чернова Т.М. О недоиспользовании грузоподъемности универсальных вагонов-платформ при использовании съёмных многооборотных средств крепления грузов.....	192
Волчек Т.В., Томилов В.С. Совершенствование методов контроля состояния коллекторного тягового электродвигателя при его эксплуатации.....	202
Матяш Ю.И., Сергеев П.Б., Родченко А.Д. Совершенствование механической части тормозной системы применительно к инновационным грузовым вагонам.....	209
Поляков П.А., Яицков И.А., Ворон О.А., Талипова И.П., Кузькин А.А., Габдрахманов Н.Р. Влияние геометрии профиля диска на формирование контактирующих сил на рабочих площадках тормозного устройства.....	218
Шинкарук А.С., Кульков А.А., Рафиков Р.Х. Повышение эффективности технического обслуживания пассажирского подвижного состава.....	229

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Kolobov I.A. Evaluation of the wear resistance of a modified radial bearing design taking into account the compressibility of the lubricant	8
Bolshikh I.V., Ananko A.M., Sklifus Ya.K., Anikina E.D. Investigation of the adhesive strength of antifriction phenylene-based coatings.....	20
Ivanochkin P.G., Anikina E.D., Bolshikh E.P. Analysis of the state of the metal counterbody surface in interaction with an antifriction coating containing PTFE	28
Polyakov V.N. Methodology for determining the parameters of eccentricity of a hydrodynamic plain bearing.....	34
Ryzhov S.P. Experimental studies of the spectral composition of gear shaping machine noise...	41
Kolesnikov I.V., Shapovalov V.V., Kovalenko O.I., Polityko K.N., Kolodyazhny I.A. Application of wear-resistant PVD coatings on the friction surfaces of gears and gear couplings of a promising automatic transmission.....	49
Shapovalov V.V., Sayamova T.L., Gorin S.L., Ryabysh D.A., Kovalenko O.I. Development of a friction multi-disc connecting coupling for mobile power plants.....	60

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S., Tarutin N. A. Development of a hybrid neural network structure for the system of monitoring and fault identification of electrical substation.....	70
---	----

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

Logunova P.A. Organization of accounting of electricity consumption for train traction at traction substations of DC railways.....	80
Manikovskiy A.S., Yakovlev D.A., Mukhopad A.Yu. Improving the accuracy of methods for forecasting power consumption in the railway power supply management system.....	87

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION
AND TELECOMMUNICATIONS

Goncharenko V.A., Khomenko A.D., Abu Khasan Rakheb, Ermakov S.G., Khodakovskiy V.A. Towards assessing the reliability level and managing the configuration of RAID arrays of a data storage system based on fuzzy inference.....	94
Kovalev S.M., Butakova M.A., Guda A.N., Olgezyer I.A., Sukhanov A.V. Review of the proceedings of the IITI'24 conference	107
Pugachev I.N., Tormozov V.S. Development and analysis of a road traffic monitoring system based on machine vision technologies and cluster analysis methods.....	134

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

Vereskun V.D., Vorobyov V.S., Kupreeva N.Yu., Repina I.B. Formation of the development of the transport network of the North-Eastern region of the RF	146
Vereskun V.D., Guda A.N., Mamaev E.A. Risk and reliability management methods in transport and logistics supply chains	153
Kovalev K.E., Novichikhin A.V. Risk assessment in the operation of low-intensity railway lines.....	161
Nauruzbaev S.M. To the question of optimizing decision-making on organizing the promotion of transport flows in the directions of the "North – South" corridor.....	173
Seredov E.A. Features of passenger transportation with vehicles for personal use by rail.....	184

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY

Bein D.G., Tsyganskaya L.V., Tanicheva N.A., Chernova T.M. On underutilization of the loading capacity of universal flat cars using removable multi-turn cargo securing means.....	192
Volchek T.V., Tomilov V.S. Improvement of methods for monitoring the condition of a collector traction electric motor during its operation.....	202
Matyash Yu.I., Sergeev P.B., Rodchenko A.D. Improvement of the mechanical part of the braking system as applied to innovative freight cars	209
Polyakov P.A., Yaitkov I.A., Voron O.A., Talipova I.P., Kuzkin A.A., Gabdrakhmanov N.R. The influence of the geometry of the disk profile on formation of contacting forces on the working platforms of the braking device.....	218
Shinkaruk A.S., Kulkov A.A., Rafikov R.Kh. Improving the efficiency of maintenance of passenger rolling stock.....	229

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.822.17 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8

*Е. А. Болгова, М. А. Мукутадзе, И. А. Колобов***ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

Аннотация. Исследование включает разработку и анализ математической модели микрополярного смазочного материала в модифицированной конструкции подшипника скольжения с композиционным фторопластсодержащим покрытием на поверхности вала и канавкой, которая способствует улучшению распределения смазочного материала и повышению долговечности системы.

На основе уравнения движения, исследуемого жидкого смазочного материала, уравнения неразрывности и уравнения состояния получены новые математические модели, учитывающие дополнительно такой его параметр, как сжимаемость.

Новизна работы заключается в разработке методики инженерных расчетов конструкции радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием при учете наличия в нем канавки, а также зависимости вязкости от давления и сжимаемости смазочного материала, позволяющих определить величину основных триботехнических параметров.

Результаты исследования обеспечили снижение погрешностей по несущей способности и по коэффициенту трения модифицированного подшипника в сравнении с традиционными конструкциями. В результате удалось добиться увеличения срока службы радиальных подшипников, что имеет большое значение для их промышленного применения.

Ключевые слова: радиальный подшипник, оценка износостойкости, антифрикционное полимерное покрытие, канавка, гидродинамический режим, верификация.

Для цитирования: Болгова, Е. А. Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом сжимаемости смазочного материала / Е. А. Болгова, М. А. Мукутадзе, И. А. Колобов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8.

Введение

При разработке новых фторопластовых покрытий важная роль отводится процессу испытаний на износостойкость. Полифторированные углеводороды обладают отличной химической стабильностью и могут выдерживать воздействие агрессивных химических веществ, что делает их идеальным выбором для использования в агрессивных средах. Дополнительно проводятся анализы термостойкости покрытий, так как некоторые области их применения, например, авиа- и автомобилестроение [1], требуют устойчивости к высоким температурам.

Особое внимание уделяется изучению трибологических характеристик материалов покрытий, поскольку именно они оказывают непосредственное влияние на износостойкость и долговечность подшипников скольжения. Трибологические свойства определяются комплексом факторов, таких как трение, износ, адгезия и прочность покрытия. Проведение лабораторных испытаний позволяет выявить слабые места материалов и разработать рекомендации по улучшению их состава. Так, использование различных наполнителей, добавок и модификаторов [2] может значительно повысить эксплуатационные характеристики полимерных покрытий.

Методология оптимизации состава полимерных покрытий включает как экспериментальные, так и теоретические подходы. Экспериментальные методы базируются на тестировании различных композиций и параметров нанесения покрытий. В результате таких исследований выявляются закономерности и определяются оптимальные условия для получения высококачественных покрытий. Теоретические методы, в свою очередь, основаны на моделировании и численных расчетах. Они позволяют предсказать поведение покрытий в различных эксплуатационных условиях и сократить количество дорогостоящих и порой длительных экспериментальных испытаний.

Разработка моделей, описывающих процессы взаимодействия в системе «материал покрытия – базовый материал подшипника», является неотъемлемой частью проводимых исследований [3–5]. Такие модели позволяют детализировать механизмы взаимодействия между покрытием и подшипником, что, в свою очередь, способствует выяснению причин износа и разрушения материалов. Решение этих задач требует применения междисциплинарных подходов, объединяющих знания в области материаловедения, механики и трибологии. Интеграция результатов экспериментальных исследований и численных моделей способствует созданию новых высокоэффективных решений для применения в промышленности.

Так, авторы работ [6–8] сосредоточились на изучении оценки износостойкости по коэффициенту трения и нагрузочной способности трибоузлов с полимерными покрытиями и влияния эксплуатационных факторов: температуры, давления и скорости скольжения. При этом особое внимание уделено ими анализу изменений коэффициента трения при варьировании температурных режимов работы трибоузлов. Экспериментально было установлено, что повышение температуры приводит к значительному изменению физических и механических свойств полимерных покрытий, что, в свою очередь, сказывается на их износостойкости и коэффициенте трения.

Давление – еще один важный эксплуатационный фактор, влияющий на работу трибоузлов с полимерными покрытиями. Исследования показали, что увеличение давления на контактную поверхность приводит к уменьшению толщины полимерного слоя, что может вызывать его преждевременный выход из строя. Оптимизация давления позволяет не только продлить срок эксплуатации покрытия, но и улучшить нагрузочную способность трибоузлов.

В исследованиях [9–14] подробно изучены механизмы образования смазочной пленки при гидродинамическом и граничном трении. Основное внимание уделено полиамидным и полиуретановым покрытиям, которые широко применяются в различных видах подшипников благодаря своим уникальным свойствам. Результаты показали, что правильный выбор и применение данных покрытий может значительно улучшить эксплуатационные характеристики подшипников, снижая коэффициент трения и износ и тем самым повышая стабильность работы механизмов.

Моделирование процессов в зоне трения представляет собой ключевое направление в поиске способов повышения износостойкости и долговечности механических систем. В рамках исследований, проведенных в работах [15–20], акцент делается на взаимодействии геометрии поверхности подшипника и эксплуатационных характеристик смазочных материалов. Параметрическая оптимизация является важным инструментом, позволяющим находить оптимальные соотношения между геометрическими параметрами, механическими свойствами и режимами нагружения.

Исходя из вышеописанного можно заключить, что использование антифрикционных полимерных композиционных покрытий предоставляет новые возможности для улучшения надежности и производительности промышленного оборудования.

Методика расчета

Целью настоящего исследования является оценка износостойкости модифицированного радиального подшипника на основе разработки комплекса математических моделей и экспериментальных исследований.

Для оценки износостойкости рассматривается модифицированный радиальный подшипник. Задача выполняется при соблюдении ряда допущений, а именно: течение установившееся и ламинарное, жидкость сжимаемая и обладает микрополярными свойствами.

Запишем уравнения контуров вала с полимерным покрытием C_1 , вала без покрытия (с канавкой) C_0 , подшипниковой втулки C_2 в полярной системе координат (рис. 1) $r' \theta$ с полюсом в центре вала:

$$r' = r_0, \quad r' = r_0 - \tilde{h}, \quad r' = r_1(1 + H), \quad (1)$$

где r_0 – радиус вала с полимерным покрытием, м; r_1 – радиус подшипниковой втулки, м; \tilde{h} – высота канавки, м; $H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots$, $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$, ε – относительный эксцентриситет; e – эксцентриситет.

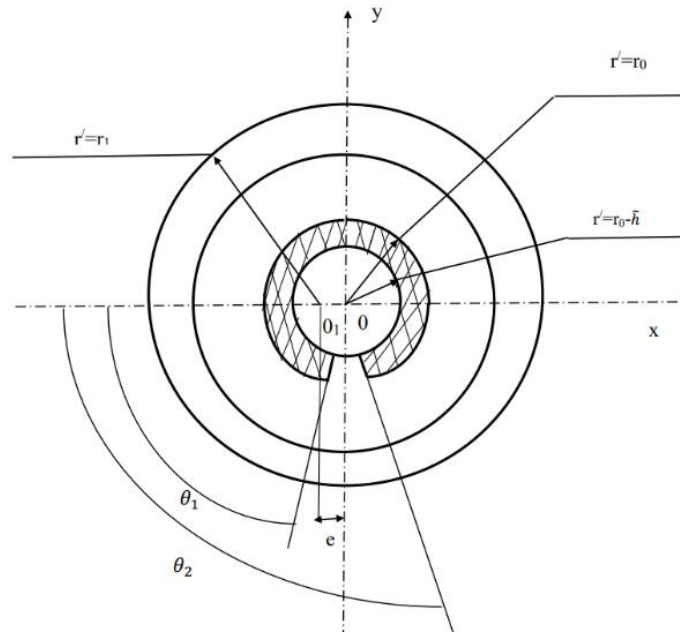


Рис. 1. Схема трибоконтакта

Микрополярная жидкость характеризуется тремя физическими константами μ' , κ' , γ' в отличие от ньютоновской жидкости, у которой лишь одна константа μ_0 .

Приведем выражения для вязкостных характеристик микрополярной жидкости:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{\alpha' p'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{\alpha' p'}, \quad (2)$$

где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала (параметр имеет размерность вязкости, поскольку он проявляется в результате учета микровращений, естественно, что его называют коэффициентом вязкости при вращательном движении), Нм/с^2 ; μ_0 – характерная вязкость ньютоновского смазочного материала, Нм/с^2 ; κ' , γ' – коэффициенты динамической вязкости микрополярного смазочного материала, Нм/с^2 ; κ_0 , γ_0 – характерная вязкость микрополярного смазочного материала, Нм/с^2 ; α' – экспериментальная постоянная величина; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое, Па.

Для разработки расчетной модели с учетом (2) в качестве исходных используем ряд уравнений. Первым уравнением является уравнение, которое описывает движение жидкости. В дополнение к этому нам понадобятся уравнение неразрывности [21] и уравнение состояния:

$$\begin{aligned} (2\mu' + \kappa') \left(\frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'} \right) &= \frac{1}{r'} \frac{dp'_i}{d\theta} - \kappa' \frac{\partial v'_{r'_i}}{\partial r'}, \\ \gamma' \left(\frac{\partial^2 v'_i}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_i}{\partial r'} \right) &= \kappa' v'_i + \kappa' \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'}, \quad \frac{\partial(\rho' v'_{r'_i})}{\partial r'} + \frac{(\rho' v'_{r'_i})}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial(\rho' v_{\theta_i})}{\partial \theta} = 0, \\ p' &= \frac{\lambda \Omega^2 r^2}{2} \rho', \end{aligned} \quad (3)$$

где v_{θ_i} , $v'_{r'_i}$ – компоненты вектора скорости смазочной среды, м/с.

Поведение скорости жидкости на границах исследуемого объема опишем рядом зависимостей:

$$\begin{aligned} v_{\theta} &= 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1(1+H); \\ v_{r'} &= 0, \quad v_{\theta} = \Omega(r_0 - \tilde{h}) \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h}; \\ v'_{r'} &= 0, \quad v_{\theta} = \Omega r_0 \quad \text{при} \quad r' = r_0; \\ p(0) &= p(\theta) = p_g; \quad r_0 - \tilde{h} = h^* \quad \text{при} \quad \theta_1 < \theta < \theta_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где θ_1 , θ_2 – соответственно угловые координаты канавки, градус.

Для удобства решения применяем стандартную методику перехода к безразмерным величинам:

$$\begin{aligned}
r' &= (r_0 - \tilde{h}) + \delta r, \quad \delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h}), \quad v_r = \Omega \delta u, \quad v_\theta = \Omega v (r_0 - \tilde{h}), \\
p' &= p^* p, \quad p^* = \frac{(2\mu_0 + \kappa_0) \Omega (r_0 - \tilde{h})^2}{2\delta^2}; \\
v' &= v, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad \kappa' = \kappa_0 \kappa, \quad \gamma' = \gamma_0 \gamma, \\
N^2 &= \frac{\kappa_0}{2\mu_0 + \kappa_0}, \quad N_1 = \frac{2\mu_0 l^2}{\delta^2 \kappa_0}, \quad l^2 = \frac{\gamma_0}{4\mu_0}. \quad \rho^* = \frac{2p_g}{\lambda \Omega^2 r_0^2}, \quad \rho' = \rho^* \rho.
\end{aligned} \tag{5}$$

Выполняя подстановку (5) в систему дифференциальных уравнений (3)–(4), получим:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} &= \frac{1}{\Lambda} \cdot e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} - \frac{v_i}{N_1} - \frac{1}{N_1} \cdot \frac{du_i}{dr} = 0, \\
\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} &= 0, \quad p = \rho.
\end{aligned} \tag{6}$$

$$u = 0, \quad v = 0, \quad \nu = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta = h(\theta);$$

$$u = 1, \quad \nu = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$u = 1, \quad \nu = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0 - \tilde{h}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*},$$

$$Q = \text{const}, \quad p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2), \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1),$$

$$\eta = \frac{e}{\delta}; \quad \Lambda = \frac{r_0^2 \mu \Omega}{p_g \delta^2}; \quad p = \frac{\Lambda \Omega^2 r_0^2}{2} \rho,$$

где Λ – параметр сжимаемости; $\eta = \frac{l}{\delta}$ – конструктивный параметр; Q – расход смазочного материала в единицу времени, $\text{см}^3/\text{ч}$.

Для сжимаемого смазочного материала пренебрежем $\frac{1}{N_1} \ll 1$, а также учтем малость зазора, тогда уравнение (6) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h} (2r - h) = \frac{1}{\Lambda} \cdot e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad v_i = \frac{1}{2h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho. \tag{7}$$

Введем обозначения $z = e^{-\alpha p}$, и в результате ряда преобразований система уравнений (7) примет вид

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r - h) &= -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \\
p = \rho, \quad v_i &= \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh)
\end{aligned} \tag{8}$$

с соответствующими граничными условиями

$$v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = h(\theta);$$

$$v = 0, \quad u = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0 = 0 \quad \text{при} \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$v = 0, \quad u = 1 \quad \text{при} \quad r = 0 - \tilde{h}(\theta) \quad \text{при} \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

$$z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}, \quad Q = \text{const}. \tag{9}$$

Автомодельное решение (8) ищем по известному методу [22–23]:

$$\begin{aligned}
\rho v_i &= \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), \quad \rho u_i = -\frac{\partial \Psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta), \\
\Psi_i(r, \theta) &= \tilde{\Psi}_i(\xi_i), \quad V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i), \\
U_i(r, \theta) &= -p \tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta), \\
\xi_i &= \frac{r_i}{h(\theta)} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi, \\
\xi_i &= \frac{r + \tilde{h}}{h(\theta) + \tilde{h}} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \\
u'_i(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \frac{1}{p} \frac{dp}{d\theta} - \xi_i \tilde{v}'_i(\xi_i) &= 0, \\
\frac{dz_i}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_i}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)} \right), \quad i=1,3, \\
\frac{dz_2}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right). \tag{10}
\end{aligned}$$

Интегрируя (10), имеем:

– значения поля скоростей:

$$\begin{aligned}
\tilde{\Psi}'_i(\xi_i) &= a_1 \frac{\xi_i}{2} (\xi_i - 1), \quad \tilde{u}_i(\xi_i) = b_1 \frac{\xi_i^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_i^3}{3} - \frac{\xi_i^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_1}{2} + 1 \right) \xi_i, \\
\tilde{\Psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, \quad \tilde{u}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_2}{2} + 1 \right) \xi_2 + 1; \\
\tilde{\Psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, \quad \tilde{u}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_3^3}{3} - \frac{\xi_3^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_3}{2} + 1 \right) \xi_3 + 1; \tag{11}
\end{aligned}$$

– значения гидродинамического давления находим методом последовательных приближений, ограничиваясь при этом двумя приближениями:

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

Зная формулы для гидродинамического давления и скорости, мы можем получить аналитические уравнения для расчетов несущей способности и силы трения:

$$\begin{aligned}
R_x &= \frac{6\mu_0 r_0^3 \Omega}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta + \right. \\
&+ \left. \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*} \right) \cos \theta d\theta \right]. \\
R_y &= \frac{6\mu_0 \omega r_0^3}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{p_g}{p^*} \right) \sin \theta d\theta + \right. \\
&+ \left. \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{p_g}{p^*} \right) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{p_g}{p^*} \right) \sin \theta d\theta \right]. \\
L_{тр} &= \mu \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_1'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \right. \right. \\
&+ \left. \left. \frac{\tilde{v}_2'(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right) d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(\theta)}{h(\theta)} + \frac{\tilde{v}_3'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta \right].
\end{aligned} \tag{13}$$

В табл. 1 представлены результаты численных проверок на основе предложенной теоретической модели. Для проверки точности и применимости модели в широком диапазоне сценариев были протестированы значения параметров сжимаемости $\Lambda = 0,1-0,9$, напряжения σ в диапазоне 4–20 МПа.

Таблица 1

Результаты теоретического исследования

№	σ , МПа	Параметр сжимаемости Λ				
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
		Коэффициент трения				
1	4	0,0095	0,0130	0,0091	0,0078	0,0052
2	8	0,0073	0,0074	0,0075	0,0058	0,0044
3	12	0,0050	0,0042	0,0041	0,00207	0,00204
4	16	0,0039	0,0041	0,0040	0,00201	0,00202
5	20	0,00208	0,0040	0,0039	0,00205	0,00201

Экспериментальная часть

Экспериментальное исследование состояло из верификации разработанной расчетной модели радиального подшипника скольжения с оптимальным сечением маслоподдерживающей канавки и определения величины погрешности, а также из комплекса экспериментальных исследований подшипника с усовершенствованной конструкцией опорной поверхности подшипниковой втулки. Это несущая поверхность с антифрикционным полимерным композиционным покрытием, имеющим маслоподдерживающую канавку.

В процессе исследований покрытий нового типа была установлена область их рационального применения. Исследуемые антифрикционные покрытия представляют собой гибридный композиционный материал, состоящий из трех типов полимеров различной физической природы. Это тканый каркас из фторопластовых нитей «полифен» (ТУ 6-06-9-7-81) и полиимидных нитей «аримид Т» (ТУ 6-06-9-11-80), пропитанный матричным связующим на основе фенольной смолы, модифицированной термостойким каучуком.

Триботехнические экспериментальные исследования радиальных подшипников скольжения проводились на модернизированной машине трения модели ИИ-5018 на образцах в виде частичных вкладышей. Колодки вырезались из кольцевой заготовки по центральному углу равному 60° . На их рабочие поверхности наносились полимерные композиционные покрытия и канавки вдоль оси трибосопряжения на глубину покрытия. Кроме того, в колодках предусмотрены отверстия для термопар.

Одним из наиболее важных элементов модернизации машины трения является блок установки частичного вкладыша (рис. 2).

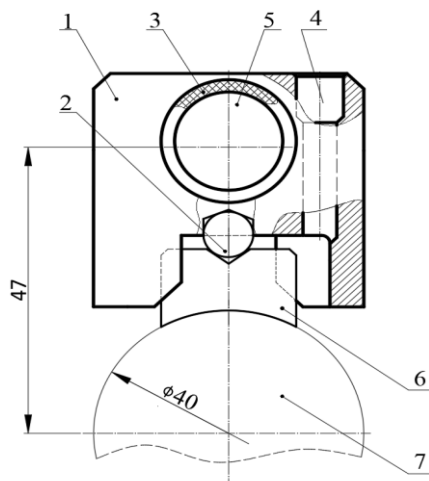


Рис. 2. Схема базирования и установки колодки [5M]:

1 – корпус колодкодержателя; 2 – опорный шарик; 3 – изолирующая втулка; 4 – канал для подачи жидкого смазочного материала; 5 – отверстие под вал каретки машины трения; 6 – колодка; 7 – ролик

Основные блоки экспериментальных исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные блоки экспериментальных исследований

№ п/п	Блок	Цель	Выход	Переменные факторы	Диапазон варьирования	Оборудование	Погрешность, %
1	Конструкция опорной поверхности	Обеспечение автоперехода на режим жидкостного трения	Параметры канавок	Ширина канавки	4,0 мм	Машина трения модели ИИ 5018 (модернизированная)	± 10 %
			Смазочный материал	Тип смазочного материала	Микрополярный		
			Опорный профиль	Контактное давление, скорость	$\sigma = 4-20$ МПа $V = 0,3-1,0$ м/с		
2	Эксплуатационные характеристики подшипников	Верификация теоретических моделей	Коэффициент трения f	Параметры канавок	Ширина, глубина, $B = 1-5$		
			Несущая способность σ , МПа	Тип смазочного материала	Вязкий		
			Температура °С	Марка смазочного материала	Тп22-С + 5 % Су		
		Определение трибопараметров	Коэффициент трения f	Нагружено-скоростные режимы	$\sigma = 4-20$ МПа $V = 0,3-1,0$ м/с		
			Вертикальная составляющая давления	Ширина канавки	4,0 мм		

Экспериментальные исследования проходили в два этапа. Первый этап предназначался для проверки теоретических моделей металлополимерного подшипника с оптимальным сечением маслоподдерживающей канавки при различных режимах эксплуатации, а также для определения погрешности, возникающей при расчетах по этим моделям. Второй этап представлял собой комплекс экспериментальных исследований металлополимерного подшипника, поверхность которого покрыта полимерным композицией, содержащим фторопласт, и имеет маслоподдерживающую канавку.

На подшипнике с маслосодержащей канавкой был выполнен ряд экспериментальных исследований. Эксперименты проводились в разных рабочих режимах (табл. 3), включая вариации скорости вращения, нагрузки и температурных условий.

Таблица 3

Сравнительный анализ результатов исследования

№ п/п	Режим		Теоретический результат	Экспериментальное исследование
	σ , МПа	V , м/с		
1	4	0,3	0,0152	0,0169
2	8	0,3	0,0178	0,0187
3	12	0,3	0,0186	0,0190
4	16	0,3	0,0188	0,0193
5	20	0,3	0,0190	0,0197

С учетом поставленной задачи подтверждается общая стратегия проведения экспериментальных исследований в соответствии с классическими однофакторными и полнофакторными планами.

На основе полученных данных был проведен анализ, позволяющий оценить точность расчетной модели подшипника. Результаты экспериментов показали, что расчетная модель демонстрирует высокую точность предсказания поведения конструкции. Все выявленные отклонения находятся в допустимых пределах, что подтверждает надежность и работоспособность модели в различных рабочих условиях.

Полученные в результате теоретического исследования уточненные данные имеют большое значение для выбора подшипника в различных технических системах. Учет сжимаемости микрополярного жидкого смазочного материала при выполнении инженерных расчетов обеспечил снижение погрешности по несущей способности до 5–7 % и снижение погрешности до 6–8 % по коэффициенту трения. В дальнейших исследованиях представляется целесообразным изучить влияние на работу подшипников скольжения таких факторов, как температурные условия, динамические нагрузки и взаимодействие с различными смазочными материалами, что даст возможность продолжить совершенствование конструкции таких подшипников и расширять области их применения.

Данные эксперимента показали наличие колебаний коэффициента трения, которое связано с динамическими изменениями в условиях контакта поверхностей и воздействиями внешних параметров. Такое поведение коэффициента трения при увеличении нагрузки указывает на сложность взаимодействий в системе, особенно с учетом того, что максимальная нагрузка достигала 20 МПа, что эквивалентно ступенчатому увеличению нагрузки в 5 раз.

Результаты проведенного исследования подтверждают эффективность разработанных теоретических моделей.

Выводы

1 Проведенное исследование может послужить значительному расширению возможностей практического использования расчетных моделей радиального подшипника скольжения и позволяет на практике оценивать его критически важные эксплуатационные характеристики.

2 Учет сжимаемости микрополярного жидкого смазочного материала, при выполнении инженерных расчетов обеспечил снижение погрешности по несущей способности до 5–7 % и снижение погрешности до 6–8 % по коэффициенту трения.

Список литературы

1 Хасьянова, Д. У. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами

References

1 Khasyanova, D. U. Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar

- и расплавами металлического покрытия / Д. У. Хасьянова, М. А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 4. – С. 46–53. – DOI 10.31857/S0235711922040101.
- 2 **Хасьянова, Д. У.** Исследование на износостойкость радиального подшипника с нестандартным опорным профилем с учетом зависимости вязкости от давления и температуры / Д. У. Хасьянова, М. А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – № 3. – С. 42–49. – DOI 10.52261/02346206-2023-3-42.
- 3 Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку / В. В. Василенко, В. И. Кирищикова, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – Vol. 22, No. 4. – P. 365–372. – DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372.
- 4 Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления / Х. Н. Абдулрахман, В. И. Кирищикова, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – № 4. – С. 9–17. – DOI 10.18323/2782-4039-2022-4-9-17.
- 5 **Polyakov, R.** The method of long-life calculation for a rotor – hybrid bearing friction couple / R. Polyakov, L. Savin // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, June 12–14, 2017. – P. 433–440. – EDN XXKOLJ.
- 6 Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov, S. Majorov, I. Kudryavcev, N. Krupenin // Vibroengineering Procedia : Vibration and Acoustics in Civil Engineering and Fault Diagnostics, Dubai, 2020. – Vol. 30 (3). – P. 61–67. – DOI 10.21595/vp.2020.21379.
- 7 Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication / E. P. Kornaeva, A. V. Kornaev, Yu. N. Kazakov, R. N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 734. – Article no. 012154. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012154.
- 8 **Shutin, D. V.** Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery / D. V. Shutin, R. N. Polyakov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – Article no. 032098. – DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
- 9 **Поляков, Р. Н.** Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным lubricants and metal coating melts / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze // Problems of mechanical engineering and machine reliability. – 2022. – No. 4. – P. 46–53. – DOI 10.31857/S0235711922040101.
- 2 **Khasyanova, D. U.** A study on the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile, taking into account the dependence of viscosity on pressure and temperature / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze // Problems of mechanical engineering and automation. – 2023. – No. 3. – P. 42–49. – DOI 10.52261/02346206-2023-3-42.
- 3 Investigation of the wear resistance of a sliding bearing with a polymer coating of a support ring having a groove / V. V. Vasilenko, V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze, V. E. Shvedova // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – Vol. 22, No. 4. – P. 365–372. – DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372.
- 4 Increasing the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer coating on the shaft surface, taking into account the dependence of viscosity on pressure / Kh. N. Abdulrahman, V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze, V. E. Shvedova // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – No. 4. – P. 9–17. – DOI 10.18323/2782-4039-2022-4-9-17.
- 5 **Polyakov, R.** The method of long-life calculation for a rotor – hybrid bearing friction couple / R. Polyakov, L. Savin // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, June 12–14, 2017. – P. 433–440. – EDN XXKOLJ.
- 6 Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov, S. Majorov, I. Kudryavcev, N. Krupenin // Vibroengineering Procedia : Vibration and Acoustics in Civil Engineering and Fault Diagnostics, Dubai, 2020. – Vol. 30 (3). – P. 61–67. – DOI 10.21595/vp.2020.21379.
- 7 Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication / E. P. Kornaeva, A. V. Kornaev, Yu. N. Kazakov, R. N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 734. – Article no. 012154. – DOI 10.1088/1757-899X/734/1/012154.
- 8 **Shutin, D. V.** Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery / D. V. Shutin, R. N. Polyakov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – Article no. 032098. – DOI 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
- 9 **Polyakov, R. N.** Mathematical model of contactless finger seal with active gap control / R. N. Polyakov,

- управлением зазором / Р. Н. Поляков, Л. А. Савин, А. В. Внукон // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 1 (327). – С. 66–71. – EDN XXRSCT.
- 10 Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения / С. С. Негматов, Н. С. Абед, Р. Х. Саидакмедов [и др.] // Пластические массы. – 2020. – № 7–8. – С. 32–36. – DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.
- 11 Исследование электропроводящих композиционных терморезистивных полимерных материалов и покрытий на их основе для триботехнического назначения / Г. И. Сайфуллаева, С. С. Негматов, Н. С. Абед, Д. И. Камалова // Universum: технические науки. Электронный научный журнал. – 2020. – № 12 (81). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (дата обращения: 20.08.2024).
- 12 Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья / В. Т. Ерофеев, И. В. Смирнов, П. В. Воронов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-5. – С. 911–924. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (дата обращения: 20.08.2024).
- 13 **Икромов, Н. А.** Объекты и методики исследования композиционных полимерных материалов / Н. А. Икромов, Д. Н. Расулов // Современные научные исследования и инновации. – 2020. – № 10. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (дата обращения: 20.08.2024).
- 14 Analysis of factors affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V. E. Zinoviev, P. V. Kharlamov, N. V. Zinoviev, R. A. Kornienko // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 900. – Article no. 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.
- 15 **Харламов, П. В.** Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» / П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1. – С. 122–129. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-1-122.
- 16 **Харламов, П. В.** Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела / П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3. – С. 37–45. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-3-37.
- L. A. Savin, A.V. Vnukov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2018. – № 1 (327). – P. 66–71. – EDN XXRSCT.
- 10 Research of viscoelastic and adhesive strength properties and development of effective vibration-absorbing composite polymer materials and coatings for mechanical engineering purposes / S. S. Negmatov, N. S. Abed, R. H. Saidakhmedov [et al.] // Plastic masses. – 2020. – No. 7–8. – P. 32–36. – DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.
- 11 Research of electrically conductive composite thermosetting polymer materials and coatings based on them for tribotechnical purposes / G. I. Saifulayeva, S. S. Negmatov, N. S. Abed, D. I. Kamalova // Universum: Technical Sciences. Electronic scientific journal. – 2020. – No. 12 (81). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (date of access: 08/20/2024).
- 12 Investigation of the resistance of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast / V. T. Erofeev, I. V. Smirnov, P. V. Voronov [et al.] // Fundamental Research. – 2016. – No. 11-5. – P. 911–924. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (date of access: 08/20/2024).
- 13 **Ikromov, N. A.** Objects and methods of research of composite polymer materials / N. A. Ikromov, D. N. Rasulov // Modern scientific research and innovations. – 2020. – No. 10. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (date of access: 08/20/2024).
- 14 Analysis of factors affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V. E. Zinoviev, P. V. Kharlamov, N. V. Zinoviev, R. A. Kornienko // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 900. – Article no. 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.
- 15 **Kharlamov, P. V.** Monitoring changes in elastic-dissipative characteristics for solving problems of studying tribological processes in the railway track – rolling stock system / P. V. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1. – P. 122–129. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-1-122.
- 16 **Kharlamov, P. V.** Application of a physico-chemical approach to study the mechanism of formation of secondary structures of frictional transfer on the surface of a counterbody / P. V. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 3. – P. 37–45. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-3-37.

- 17 **Харламов, П. В.** Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования / П. В. Харламов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 12. – С. 556–560. – DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560.
- 18 Применение антифрикционных полимерных композиционных полимерных покрытий в тормозной рычажной передаче локомотивов / П. Г. Иваночкин, И. В. Больших, Т. З. Талахадзе, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 16–22. DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16.
- 19 Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining / P. G. Ivanochkin [et al.] // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 713–719.
- 20 Modeling the mechanical characteristics of tribotechnical composites / T. V. Suvorova, O. A. Belyak, P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XV International Scientific-Technical Conference. – 2019. – Article no. 012018.
- 21 Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием / В. И. Киришчиева, И. А. Колобов, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (87). – С. 18–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_18.
- 22 **Киришчиева, В. И.** Исследование износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием, работающего на микрополярном смазочном материале / В. И. Киришчиева, М. А. Мукутадзе // Омский научный вестник. – 2022. – № 4 (184). – С. 41–45. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-184-41-45.
- 23 Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала / М. А. Мукутадзе, Х. Н. Абдулрахман, В. Е. Шведова [и др.] // Омский научный вестник. – 2023. – № 3 (187). – С. 5–14. – DOI 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14.
- 17 **Kharlamov, P. V.** Investigation of the formation of secondary structures of friction transfer on the surface of steel samples during the implementation of metal plating technology / P. V. Kharlamov // Assembly in mechanical engineering, instrumentation. – 2021. – No. 12. – P. 556–560. – DOI 10.36652/02-3350-2021-22-12-556-560.
- 18 The use of antifriction polymer composite polymer coatings in the brake lever transmission of locomotives / P. G. Ivanochkin, I. V. Bolshykh, T. Z. Talakhadze, E. P. Bolshykh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1 (85). – P. 16–22. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16.
- 19 Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining / P. G. Ivanochkin [et al.] // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 713–719.
- 20 Modeling the mechanical characteristics of tribotechnical composites / T. V. Suvorova, O. A. Belyak, P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XV International Scientific-Technical Conference. – 2019. – Article no. 012018.
- 21 Improving the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer coating / V. I. Kirishchieva, I. A. Kolobov, M. A. Mukutadze, V. E. Shvedova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 3 (87). – P. 18–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_18.
- 22 **Kirishchieva, V. I.** The study of wear resistance of a radial bearing with a polymer coating operating on a micropolar lubricant / V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze // Omsk Scientific Bulletin. – 2022. – No. 4 (184). – P. 41–45. – DOI 10.25206/1813-8225-2022-184-41-45.
- 23 Studies on the wear resistance of the radial bearing structure taking into account the rheological properties of a micropolar lubricant / M. A. Mukutadze, Kh. N. Abdulrahman, V. E. Shvedova [et al.] // Omsk Scientific Bulletin. – 2023. – No. 3 (187). – P. 5–14. – DOI 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14.

E. A. Bolgova, M. A. Mukutadze, I. A. Kolobov

EVALUATION OF THE WEAR RESISTANCE OF A MODIFIED RADIAL BEARING DESIGN TAKING INTO ACCOUNT THE COMPRESSIBILITY OF THE LUBRICANT

Abstract. The research includes the development and analysis of a mathematical model of a micropolar lubricant in a modified sliding bearing design with a composite fluoroplastic coating on the shaft surface and a groove that improves the distribution of lubricant and increases the durability of the system.

Based on the equation of motion of the liquid lubricant under study, the continuity equation and the equation of state, new mathematical models are obtained that additionally take into account such parameter as compressibility.

The novelty of the work lies in the development of a methodology for engineering calculations of the design of a radial sliding bearing with a polymer coating, taking into account the presence of a groove, as well as the dependence of viscosity on pressure and compressibility of the lubricant, allowing to determine the value of the main tribotechnical parameters.

The results of the study provided a decrease in errors in bearing capacity and in the coefficient of friction of the bearing in comparison with traditional designs. As a result, it was possible to achieve an increase in the service life of radial bearings, which is of great importance for their industrial applications.

Keywords: radial bearing, wear resistance assessment, antifriction polymer coating, groove, hydrodynamic mode, verification.

For citation: Bolgova, E. A. Evaluation of the wear resistance of a modified radial bearing design taking into account the compressibility of the lubricant / E. A. Bolgova, M. A. Mukutadze, I. A. Kolobov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8.

Информация об авторах

Болгова Екатерина Александровна

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

Мукутадзе Мурман Александрович

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

Колобов Игорь Анатольевич

Ростовский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
кандидат технических наук, доцент, декан факультета «Управление процессами перевозок»,
e-mail: Kolobowi@gmail.com

Information about the authors

Bolgova Ekaterina Alexandrovna

Rostov State Transport University,
Chair «Higher Mathematics»,
Postgraduate Student,
e-mail: bolgova_katya6@mail.ru

Mukutadze Murman Aleksandrovich

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

Kolobov Igor Anatolievich

Rostov State Transport University,
Chair «Operational Work Management»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Dean of the Faculty
«Transportation Process Management»,
e-mail: Kolobowi@gmail.com

И. В. Больших, А. М. Ананко, Я. К. Склифус, Е. Д. Аникина

ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ФЕНИЛОНА *

Аннотация. На сегодняшний день создание экономически эффективных и прочных фторсодержащих покрытий с высокой адгезионной прочностью к различным металлическим подложкам является актуальной задачей. Один из перспективных подходов заключается в создании многослойных покрытий, где фторсодержащий компонент формирует внешний слой, а внутренний слой, обогащенный армирующим компонентом, обеспечивает прочное сцепление с металлической подложкой. Механизм адгезии в таких композиционных материалах основан на оптимизации поверхностных взаимодействий. Стандартная методика оценки адгезионной прочности основана на измерении усилия, необходимого для отслаивания покрытия от субстрата при его отгибе на 180 градусов. Так как состав матричного связующего представляет собой трехкомпонентную систему, а их сумма равна 100 %, основой разработки стало использование симплекс-решетчатых планов типа состав-свойство.

Ключевые слова: полимерные материалы, матричное связующее, адгезионная прочность, фенилон, субстрат, порошок меди, трехкомпонентная система, симплекс-диаграмма.

Для цитирования: 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. – С. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_20.

Фторсодержащие полимерные материалы, несмотря на свои уникальные свойства, такие как высокая химическая инертность, устойчивость к воздействию агрессивных сред и низкий коэффициент трения, стоят значительно дороже аналогов. Это обусловлено сложностью синтеза фторсодержащих мономеров и полимеров, а также необходимостью использования специального оборудования и технологий для их переработки. Еще одним существенным недостатком является плохая адгезия к высокоэнергетическим поверхностям, в частности к металлам. Поверхностная энергия металлов, таких как сталь, достигает сотен мДж/м², значительно превышая поверхностную энергию фторсодержащих полимеров. Это различие в поверхностной энергии обуславливает слабое межмолекулярное взаимодействие между полимером и металлом, что приводит к низкой адгезионной прочности покрытия. Поэтому создание экономически эффективных и прочных фторсодержащих покрытий с высокой адгезионной прочностью к различным металлическим подложкам является актуальной задачей. Для решения этой проблемы активно разрабатываются различные композиционные материалы. Один из перспективных подходов заключается в создании многослойных покрытий, где фторсодержащий компонент формирует внешний слой, обеспечивающий гидрофобность, химическую стойкость и низкое трение, а внутренний слой, обогащенный нефторированным компонентом, обеспечивает прочное сцепление с металлической подложкой. Этот подход позволяет минимизировать количество дорогостоящего фторсодержащего компонента, сохраняя при этом желаемые свойства покрытия.

Механизм адгезии в таких композиционных материалах основан на оптимизации поверхностных взаимодействий. Низкое поверхностное натяжение фторсодержащего компонента способствует его миграции к поверхности, формируя внешний гидрофобный слой. В то же время нефторированный компонент, обладающий более высоким сродством к металлической подложке, обеспечивает прочную адгезию. Важно отметить, что скорость отверждения и плотность компонентов играют второстепенную роль по сравнению с поверхностными взаимодействиями, определяющими качество адгезии [1, 2].

Для достижения оптимального баланса между адгезией и гидрофобностью необходимо тщательно подбирать состав композиции и технологические параметры нанесения покрытия. Это включает в себя выбор фторсодержащего полимера (например, ПТФЭ, фторкаучуки, перфторалкилсодержащие

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (Соглашение от 10.01.2024. № 109-03-2024-007).

акрилаты), нефторированного компонента (например, эпоксидные смолы, полиуретаны, полиимиды) и возможных модификаторов поверхности. Технологии нанесения могут варьироваться от напыления и погружения до более сложных методов, таких как электрофоретическое осаждение или методы сополимеризации.

В данной работе используется армирующий каркас из органических волокон, включающий политетрафторэтиленовые (ПТФЭ) волокна и полиимидные нити. ПТФЭ-волокна обеспечивают гидрофобность и низкое трение, а полиимидные нити повышают прочность и адгезию композиционного материала. Выбор полиимидных нитей обусловлен их высокой термостойкостью, химической стойкостью и способностью к прочному взаимодействию с другими компонентами композиции. Включение армирующего каркаса позволяет создать покрытие с повышенной прочностью на изгиб и ударной вязкостью, что особенно важно для применения в условиях нагрузок и истирания. Геометрия и ориентация волокон в армирующем каркасе также влияют на механические свойства и адгезию покрытия. Для оптимизации этих параметров могут применяться различные методы формования композиционного материала, например прядение из расплава или раствора, термоформование [4].

Для обеспечения максимальной износостойкости и несущей способности раскрой ткани атласного переплетения производится с учетом направления скольжения. Фторопластовый и полиимидный утки ткани специально ориентируются вдоль вектора скорости скольжения. Этот технологический прием минимизирует износ и обеспечивает максимальную эффективность покрытия. Для определения величины прочности сцепления использовались стальные (сталь 45 – ГОСТ 1050-74) и латунные (Л63 – ГОСТ 15527-70) полоски толщиной 2 мм. Подбор материалов выполнялся из условия их универсальности в области машиностроения и возможности оценки эффективного использования разработанного покрытия на различных металлических субстратах [4].

Весь комплекс исследования адгезионной прочности разработанного антифрикционного покрытия на основе фенилона состоял из следующих этапов:

- подготовка матричного связующего;
- приготовление препрега;
- обработка поверхности металлических образцов;
- формирование покрытия и приготовление технологического пакета;
- испытание на отрыв.

На начальном этапе выполнялась подготовка матричного связующего. Благодаря ранее установленной концентрации фенилона и растворителя (диметилсульфоксида) было достигнуто оптимальное значение вязкости разработанного связующего, которая позволяла обеспечивать одновременно равномерную пропитку тканного каркаса и минимальную текучесть. После чего в матричную основу вводились модификаторы (мелкодисперсный порошок меди и масло), позволяющие улучшить триботехнические свойства связующего. Соединение всех компонентом происходило их тщательным и продолжительным перемешиванием. Варьирование компонентов матричного связующего находилось в интервалах, представленных в табл. 1 [5–7].

Таблица 1

Интервалы варьирования компонентов матричного связующего

№ п/п	Наименование	Диапазон варьирования в переменных, %	
		min	max
1	Фенилон	86	92
2	Масло	7	13
3	Порошок меди	1	7

В ходе проведения следующего этапа готовился препрег. Вдоль прочностных полиимидных нитей «аримид Т», вырезались полоски размером 12×45 мм. После чего на вырезанные полоски наносилось матричное связующее. Обязательным условием являлось нанесение связующего сначала на фторопластовые волокна, а затем на прочностные и укладка образцов волокнами политетрафторэтилена к низу. Это обеспечивало равномерную пропитку и распределение связующего по каркасу. Пропитанные образцы сушились при комнатной температуре 3 часа.

Этап подготовки поверхности заключался в обработке металлических образцов для нанесения композиционного покрытия при помощи наждачной бумаги Ф14А-25НМ с последующей очисткой нефрасом (ТУ 38.401-67-108-92) с целью удаления жировых отложений и загрязнений, а также сушкой и протиркой ацетоном (ГОСТ 27-62). По результатам обработки и очистки поверхности образцов удается достигнуть оптимальной величины шероховатости поверхности $Ra = 1,187\text{--}1,201\ \mu\text{м}$ (рис. 1). Благодаря выполненной процедуре подготовки достигается надежное сцепление покрытия с подложкой.

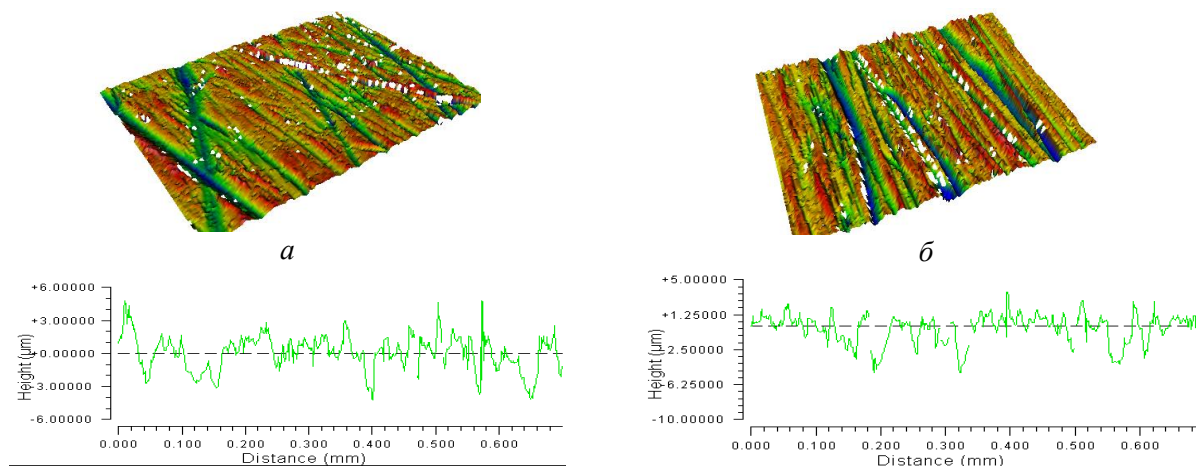


Рис. 1. Результаты исследования поверхности образцов для определения адгезионной прочности после подготовки:

a – сталь 45; *б* – латунь Л62

Нерабочую сторону препрега и место для наклейки на металлических образцах обрабатывали тонким слоем разработанного связующего. После чего соединяли подготовленные поверхности. Для предотвращения склеивания покрытия с оснасткой и образцами применяется антиадгезив – фторопластовая пленка. Формирование покрытия осуществлялось при помощи устройства для фиксации покрытия на образцах, представленного на рис. 2.



Рис. 2. Технологический пакет для нанесения покрытия на образцы

Прижимное приспособление состоит из нагрузочной пружины, верхней и нижней планок, стержней, распорных шайб и нагрузочных гаек для создания необходимой нагрузки. Использование тарированной пружины позволяет контролировать давление, обеспечивая равномерное отверждение и предотвращая образование внутренних напряжений, которые могут негативно влиять на адгезию [8].

Стандартная методика оценки адгезионной прочности основана на измерении усилия, необходимого для отслаивания покрытия от субстрата при его отгибе на 180 градусов. Схема установки, показанная на рис. 3, достаточно проста, но требует аккуратности в выполнении процедуры. Ключевым моментом является обеспечение равномерного контакта между покрытием и субстратом перед испытанием.

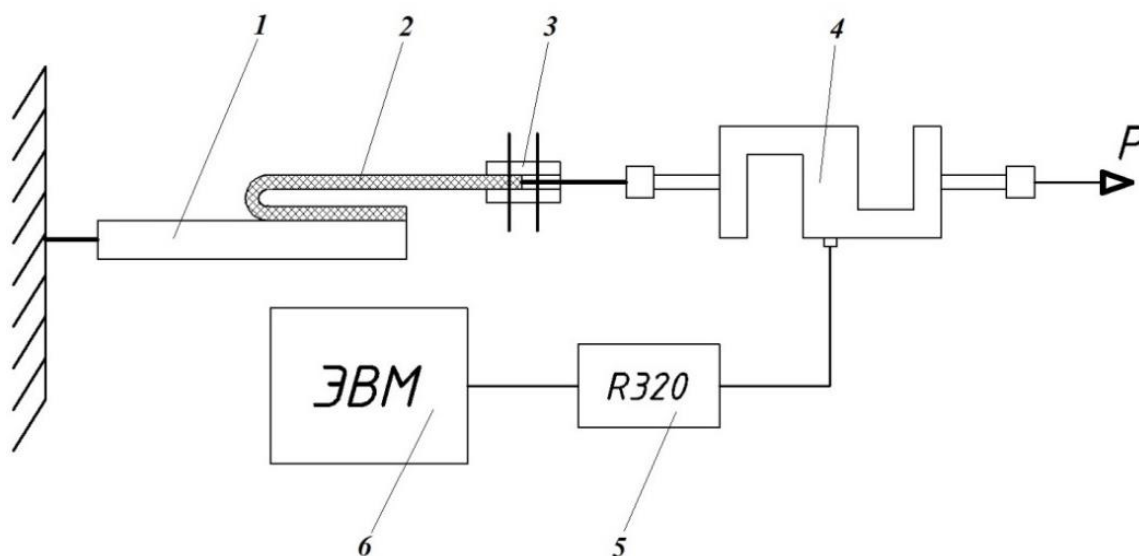


Рис. 3. Схема установки для определения адгезионной прочности покрытий:
1 – субстрат; 2 – покрытие; 3 – фиксатор; 4 – тензодатчик; 5 – индикатор R320; 6 – ЭВМ

Результаты разрушения адгезионного шва, представленные на рис. 4 в виде поверхностей металлических пластин и композитных полосок, позволяют выполнить качественную оценку состояния адгезионного контакта.



Рис. 4. Результаты разрушения адгезионного шва

Существенный интерес представляет адгезионная прочность исследуемых связующих на разных подложках, средние значения которой указаны в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Адгезионная прочность антифрикционного покрытия на стальном субстрате

Параметры	Сила отслаивания, Н									
	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10
Результаты опытов (среднее значение)	147,62	65,4	212,55	120,97	203,07	185,41	73,58	71,94	88,29	107,91
Адгезионная прочность, кН/м	13,02	5,45	18,76	10,08	16,9	15,45	6,13	5,995	7,36	8,99

Таблица 3

Адгезионная прочность антифрикционного покрытия на латунном субстрате

Параметры	Сила отслаивания, Н									
	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10
Результаты опытов (среднее значение)	226,45	88,29	297,57	156,96	232,74	222,44	122,63	95,65	101,37	179,4
Адгезионная прочность, кН/м	17,87	7,16	23,48	13,08	19,4	18,53	10,22	7,97	8,45	14,95

На основании анализа полученных данных после разрушения шва можно сделать следующие выводы:

- на образце из стали разрушение в основном происходит по субстрату, поскольку почти всё матричное связующее остается на покрытии;
- при разрушении адгезионного шва на латунной пластине наблюдается разрушение как по субстрату, так и по покрытию, но преимущественно по субстрату;
- адгезионная прочность шва на латунном субстрате на порядок выше, чем на стальном.

Так как состав матричного связующего представляет собой трехкомпонентную систему, а их сумма равна 100 %, основой разработки стало использование симплекс-решетчатых планов типа «состав – свойство». На рис. 5 показана симплекс-диаграмма.

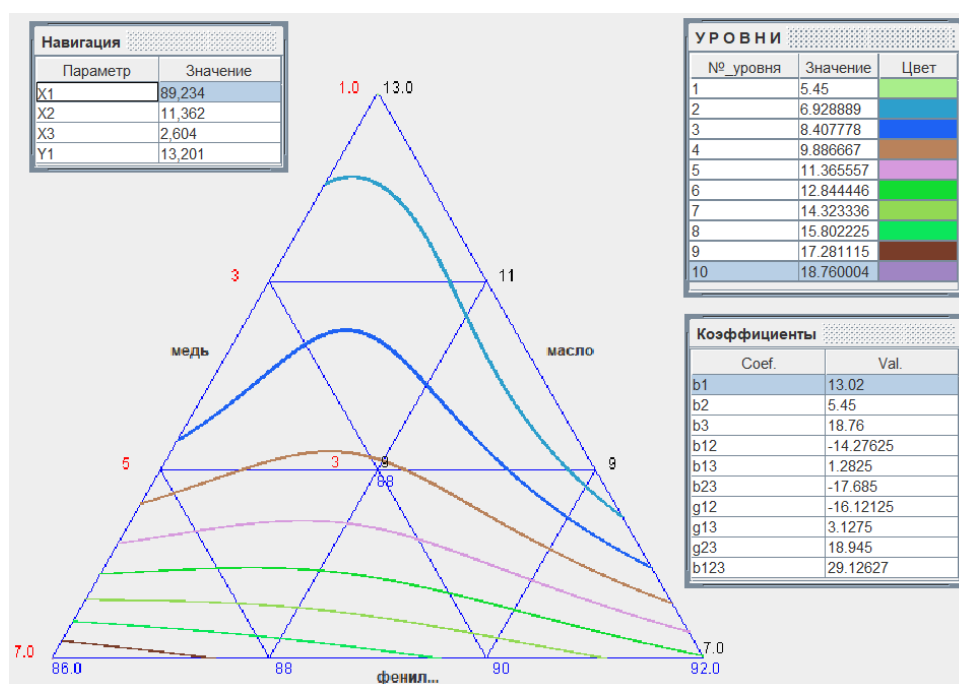


Рис. 5. Симплекс-диаграмма исследования адгезионной прочности на латунном субстрате

Выводы

1 Обнаружены возможности для повышения адгезионной прочности шва как за счет оптимизации вязкоупругих свойств связующих на основе фенилона, так и путем улучшения подготовки поверхности субстрата.

2 Полученные результаты подтверждают целесообразность применения модифицированного матричного связующего на основе фенилона, обладающего улучшенной термостойкостью.

3 Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния различных добавок и модификаторов на свойства покрытия, а также на разработку новых, более эффективных технологий его получения и нанесения.

4 Для поиска оптимального состава матричного связующего необходимо изучить влияние компонентов на вязкоупругие и триботехнические характеристики антифрикционного полимерного покрытия [9].

5 Анализируя симплекс-диаграмму, делаем вывод, что наибольшей адгезионной прочностью обладает образец с составом матричного связующего в т. 3 (86 % фенилона, 7 % индустриального масла и 7 % порошка меди).

Список литературы

1 The influence of surface nanostructures on the formation mechanism of the anti-friction layer at tribocontact / V. I. Kolesnikov, P. G. Ivanochkin, N. A. Myasnikova [et al.] // International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. – New York : Nova Science Publishers, 2017. – P. 121–131. – DOI 10.1007/978-3-319-56062-5_35.

2 **Колесников, И. В.** Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения : монография / И. В. Колесников ; отв. ред. Резер Семен Моисеевич ; Российская академия наук. – Москва : Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2017. – 381 с. – ISBN 978-5-902928-72-0.

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

4 **Кохановский, В. А.** Износостойкость металлополимерных систем с композиционным покрытием / В. А. Кохановский // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 1. – С. 13–19. – ISSN 1819-2092.

5 **Кохановский, В. А.** Адгезия антифрикционных полимерных покрытий / В. А. Кохановский, И. В. Больших, Д. С. Мантуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (68). – С. 16–20. – ISSN 0201-727X.

6 **Мантуров, Д. С.** Матричное связующее для антифрикционного полимерного композиционного покрытия / Д. С. Мантуров, И. В. Больших, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3 (95). – С. 36–42. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_36.

7 Эффективная полимерная фосфоромолибдатная присадка для смазочных материалов / М. А. Савенкова, С. А. Воляник, А. П. Сычев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). –

References

1 The influence of surface nanostructures on the formation mechanism of the anti-friction layer at tribocontact / V. I. Kolesnikov, P. G. Ivanochkin, N. A. Myasnikova [et al.] // International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. – New York : Nova Science Publishers, 2017. – P. 121–131. – DOI 10.1007/978-3-319-56062-5_35.

2 **Kolesnikov, I. V.** System analysis and synthesis of processes occurring in metal polymer friction units for frictional and antifriction purposes : monograph / I. V. Kolesnikov ; ed. Rezer Semyon Moiseevich ; Russian Academy of Sciences. – Moscow : All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, 2017. – 381 p. – ISBN 978-5-902928-72-0.

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

4 **Kokhanovsky, V. A.** Wear resistance of metal polymer systems with composite coating / V. A. Kokhanovsky // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2007. – No. 1. – P. 13–19. – ISSN 1819-2092.

5 **Kokhanovsky, V. A.** Adhesion of antifriction polymer coatings / V. A. Kokhanovsky, I. V. Bolshykh, D. S. Manturov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2017. – No. 4 (68). – P. 16–20. – ISSN 0201-727X.

6 **Manturov, D. S.** Matrix binder for antifriction polymer composite coating / D. S. Manturov, I. V. Bolshykh, E. P. Bolshykh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3 (95). – P. 36–42. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_36.

7 Effective polymer phosphoromolybdate additive for lubricants / M. A. Savenkova, S. A. Volyanik, A. P. Sychev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. –

C. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

8 **Кохановский, В. А.** Формирование антифрикционного композиционного покрытия. / В. А. Кохановский, Е. А. Бородин // Вестник ДГТУ. – 2001. – Т. 1, № 3 (9). – С. 155–159. – ISSN 1992-5980.

9 **Belyak, O. A.** Predicting the Mechanical Properties of Antifriction Composite Materials / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // Mechanics of Composite Materials. – 2021. – Vol. 57, No. 5. – P. 647–656. – DOI 10.1007/s11029-021-09986-7.

2023. – No. 2 (90). – P. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

8 **Kokhanovsky, V. A.** Formation of an antifriction composite coating. / V. A. Kokhanovsky, E. A. Borodin // Bulletin of DSTU. – 2001. – Vol. 1, No. 3 (9). – P. 155–159. – ISSN 1992-5980.

9 **Belyak, O. A.** Predicting the Mechanical Properties of Antifriction Composite Materials / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // Mechanics of Composite Materials. – 2021. – Vol. 57, No. 5. – P. 647–656. – DOI 10.1007/s11029-021-09986-7.

I. V. Bolshikh, A. M. Ananko, Ya. K. Sklifus, E. D. Anikina

INVESTIGATION OF THE ADHESIVE STRENGTH OF ANTIFRICTION PHENYLENE-BASED COATINGS

Abstract. Today, the creation of cost-effective and durable fluorinated coatings with high adhesive strength to various metal substrates is an urgent task. One of the promising approaches is to create multilayer coatings, where the fluorinated component forms the outer layer, and the inner layer, enriched with a reinforcing component, provides strong adhesion to the metal substrate. The adhesion mechanism in such composite materials is based on the optimization of surface interactions. The standard method for assessing adhesive strength is based on measuring the force required to peel the coating from the substrate when it is bent 180 degrees. Since the composition of the matrix binder is a three-component system, and their sum is 100%, the basis for the development was the use of simplex lattice plans of the composition-property type.

Keywords: polymer materials, matrix binder, adhesive strength, phenylene, substrate, copper powder, three-component system, simplex diagram.

For citation: Investigation of the adhesive strength of antifriction phenylene-based coatings / I. V. Bolshikh, A. M. Ananko, Ya. K. Sklifus, E. D. Anikina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_20.

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

Ананко Анатолий Михайлович

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

Склифус Ярослав Константинович

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

Information about the authors

Bolshikh Ivan Valerievich

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

Ananko Anatoly Mikhailovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Scientific and Educational Center of the Research
Department «Resource-Saving Technologies»,
Head of the Group,
e-mail: nypotilitailla@mail.ru

Sklifus Yaroslav Konstantinovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: yaroslav.sklifus@mail.ru

Аникина Елена Дмитриевна

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

Anikina Elena Dmitrievna

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

П. Г. Иваночкин, Е. Д. Аникина, Е. П. Больших

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОНТРТЕЛА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АНТИФРИКЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ, СОДЕРЖАЩИМ ПТФЭ *

Аннотация. Проведен анализ изменения состояния поверхности металлического контртела при взаимодействии с антифрикционным покрытием на основе ткани с волокном ПТФЭ при использовании термостойкого матричного связующего холодного отверждения на основе фенилона. Анализ проводился на основе трибологических испытаний на машине трения ИИ-5018 по схеме «вал – частичный вкладыш». Для оценки состояния поверхности был использован интерференционный микроскоп – оптический профилометр NewView-600 фирмы ZYGO. Показано, что после приработки величина среднего арифметического отклонения профиля от средней линии на протяжении всего периода работы трибосистемы сохраняет значение, не превышающее $R_a \leq 0,5$ мкм, что обеспечивает работоспособность трибосопрежения.

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, ткань с волокном ПТФЭ, связующее холодного отверждения, поверхность металлического контртела, трибологические испытания.

Для цитирования: Иваночкин, П. Г. Анализ состояния поверхности металлического контртела при взаимодействии с антифрикционным покрытием, содержащим ПТФЭ / П. Г. Иваночкин, Е. Д. Аникина, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 28–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_28.

Введение

Широкое применение в узлах трения антифрикционных самосмазывающихся композиционных материалов на основе полимеров основано на их способности обеспечивать требуемые трибологические характеристики и уменьшать ползучесть материала при том уровне температур, которые реализуются в узле трения, а также обеспечивать нормальный режим работы при неравномерной подаче смазки, что обусловлено их способностью формировать вторичные структуры на поверхности контртела. Особая роль среди этой группы материалов принадлежит композитам на основе тканых материалов. Композиционный материал на основе ткани с волокном ПТФЭ с фенолформальдегидным связующим выдерживает статическую нагрузку 560,0 МПа без проявления тенденций к холодному течению. При создании тканых антифрикционных покрытий на основе волокон ПТФЭ в качестве матрицы чаще всего применяются термореактивные полимерные клеи: фенолформальдегидные, эпоксидные, полиуретановые, полиэфирные и т.д. Однако нанесение таких покрытий обычно выполняется при горячем отверждении, что препятствует их использованию для крупногабаритных трибосистем. В работах [1, 2] была предложена технология создания композиционных покрытий с матричным связующим холодного отверждения на основе АФК-101 (ГИПК-114), однако это связующее работоспособно только до 250 °С (кратковременно до 300 °С), что существенно ограничивает скоростной режим работы узла трения. Целью проводимых исследований является установление возможности применения более термостойкого матричного связующего при сохранении или даже повышении адгезионной прочности покрытий. Представляется перспективным использовать для этого связующее на основе фенилона – ароматического полиамида (плавление при 430 °С).

Материалы и методы

Как было отмечено ранее, использование фторопластсодержащих антифрикционных покрытий позволяет обеспечить эффективную работу узлов трения и способствует повышению эксплуатационного ресурса и минимальных потерь на трение [3–5]. Отличительной особенностью работы этого класса покрытий является формирование в зоне контакта фрикционной пленки переноса, возникающей за счет переноса материала полимерного композита на поверхность металлического контртела.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (Соглашение от 10.01.2024. № 109-03-2024-007).

На машине трения ИИ-5018 были проведены трибологические испытания по схеме «вал – частичный вкладыш». Покрытие исследуемой структуры наносилось на внутреннюю поверхность частичного вкладыша (сегмент с углом раствора 60°). В качестве контртела использовался ролик из стали Ст45. Испытания проводились при скорости относительного скольжения 0,2 м/с и удельной нагрузке 5,0 МПа в течение 8 ч после приработки. По окончании проведения испытаний исследовали профилограмму поверхности ролика вдоль базовой линии (в направлении поперек дорожки трения) на трех участках по длине окружности.

Для описания топографии поверхности широко применяется геометрический подход, при котором оперируют понятиями волнистости, шероховатости и макроотклонений поверхностного рельефа [6–9]. Данный подход обычно используется для описания результатов механической обработки поверхности: строгание, фрезерование, точение и т.д. При таком подходе шероховатость поверхности обусловлена режимами обработки и является неким «следом» рабочего инструмента. Разработана система классов шероховатости, каждому классу шероховатости поставлены в соответствие параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии R_a , высота неровностей R_z , средний шаг неровностей профиля S_m , наибольшая высота неровностей профиля R_{max} .

В работе [10] изложены современные представления о формировании шероховатости, методах ее измерения и анализа. Детально исследованы подходы, используемые при описании шероховатости, отмечено, что наряду со статистическими методами анализа поверхностного рельефа сегодня находят применение методы анализа на базе нечеткой логики и машинного обучения, нейросетевых вычислений.

Для оценки состояния поверхности металлического контртела при взаимодействии с антифрикционным покрытием, содержащим ПТФЭ, был использован интерференционный микроскоп – оптический профилометр NewView-600 фирмы ZYGO. Обработку данных выполняли с помощью программного обеспечения MetroPro 9, позволяющего полученные результаты выводить на монитор и сохранять в виде файла данных и 3D-изображения. Для анализа использовались следующие характеристики поверхности: Profile Plot – профилограмма поверхности вдоль базовой линии, Amplitude Spectrum Plot – спектральный график амплитуды, Histogram Plot – распределение высот шероховатости поверхности и Autocovariance Plot – график ковариации.

Обсуждение и результаты

В работе [11] сделан вывод о том, что топография металлической контрповерхности является преобладающим фактором в определении величины скорости износа полимерных композитов в сильно различающихся условиях скольжения. Показано, что скорости износа полимеров по этим поверхностям изменяются обратно пропорционально среднему радиусу кривизны неровностей поверхности контртела, а форма изменения полимерного образца согласуется с усталостной теорией износа.

Подобный вывод сделан и в работах [12, 13], где отмечено, что на стадии установившегося износа в случае сухого трения металлополимерной пары величина шероховатости поверхности полимерного композита коррелирует с величиной весового износа.

Стальные ролики, используемые при испытаниях, имели следующие исходные параметры микрогеометрии: среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии $R_a = 0,9–1,2$ мкм, средняя высота неровностей $R_z = 1,26–2,8$ мкм, средний радиус микронеровностей $R_{n, \text{cp}} = 1,19$ мкм.

На триботехнические испытания большое влияние оказывает приработка, в ходе которой идет процесс перестройки поверхностных слоев, взаимодействующих тел. Приработка испытываемых покрытий характеризуется временем и толщиной приработанного слоя, стабилизацией микрорельефа поверхностей трения. В работе [14] отмечено, что для покрытий рассматриваемого типа рациональным давлением приработки является величина от 1,7 до 3,2 МПа, а в результате приработки в течение 60 мин параметры микрогеометрии роликов становятся следующими: $R_{max} = 3,0–5,0$ мкм, $R_z = 1,6–1,8$ мкм, средний радиус микронеровностей $R_{n, \text{cp}} = 4,0–5,8$ мкм.

В процессе приработки в зоне контакта происходит износ покрытия и формирование на поверхности контртела пленки фрикционного переноса, заключающееся в переносе материала покрытия на поверхность ролика и частичном заполнении впадин на его поверхности. Контакт осуществляется по вершинам выступов взаимодействующих тел, что приводит к отделению большого числа частиц неправильной формы с поверхности более мягкого покрытия, которые способствуют равномерному заполнению впадин и осаждению тонкого слоя полимера на поверхности ролика [15]. Важным параметром, влияющим на процессы изнашивания, является наклон сторон пиков неровностей. В вышеупомянутой работе было показано, что наклон сторон пиков прямо пропорционален среднеквадратичному отклонению профиля шероховатости.

Следует иметь в виду, что процесс трения представляет собой нелинейный неравновесный процесс, характеризующийся возникновением диссипативных структур и обусловленный притоком энергии при трении. Возникает эффект группового воздействия на обрабатываемую поверхность, связанный с появлением в зоне контакта вторичных структур, оказывающих влияние во множестве точек взаимодействия пары трения.

В работе [16] исследована кинетика образования пленки фрикционного переноса во фторопластсодержащих антифрикционных покрытиях рассматриваемой структуры. В первый период трения на поверхность контртела переносятся продукты фенилона, а затем за счет электрического взаимодействия на поверхность фенилона переносится политетрафторэтилен. В результате на поверхности контртела формируется двухслойная структура, обеспечивающая снижение коэффициента трения и приводящая к сглаживанию поверхности металлического контртела, что, в свою очередь, способствует снижению скорости изнашивания пары трения. Скольжение в течение 8 ч приводит к заполнению впадин и осаждению равномерного слоя полимера. В результате происходит контакт между пленкой вторичных структур на поверхности металлического контртела и внутренней поверхностью частичного вкладыша. При этом создаются условия для стационарного режима изнашивания.

Результаты исследования поверхности ролика вдоль базовой линии (в направлении поперек дорожки трения) после проведения трибологических испытаний на трех участках по длине окружности приведены в таблице.

Шероховатости роликов после трения с фторопластсодержащим композитом

Материал композита	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Среднее
Композиционный материал на основе ткани с волокном ПТФЭ со связующим на основе фенилона	0,309	0,525	0,409	0,414

Выводы

Анализ проведенных исследований показывает эффективность применения связующего холодного отверждения на основе фенилона для создания композиционного материала на основе ткани с волокном ПТФЭ. Соотношение полимерное связующее – техническая ткань в рассматриваемых композициях иначе влияет на служебные свойства материалов. Отличительной особенностью используемых покрытий является необходимость обеспечения не только требуемых механических свойств композита, но и показателей шероховатости металлического контртела.

Топография поверхности контртела в период приработки изменяется в результате переноса полимерного композита на металлическую поверхность. В режиме стационарного изнашивания поверхность контртела, сформированная в результате переноса, остается неизменной.

Разница в жесткости полимерного покрытия и металлического контртела способствует тому, что для эффективной работоспособности сопряжения требуется обеспечить после приработки значение среднего арифметического отклонения профиля от средней линии не более $R_a \leq 0,5$ мкм.

Список литературы

- 1 **Больших, И. В.** Матричный материал для антифрикционного полимерного композита / И. В. Больших, В. А. Кохановский // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 5. – С. 33–37. – ISSN 1818-5509.
- 2 **Больших, И. В.** Нанесение полимерных покрытий с матрицей холодного отверждения / И. В. Больших, В. А. Кохановский, А. В. Илларионов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3. – С. 11–16. – ISSN 1818-5509.

References

- 1 **Bolshikh, I. V.** Matrix material for antifriction polymer composite / I. V. Bolshikh, V. A. Kokhanovsky // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2014. – No. 5. – P. 33–37. – ISSN 1818-5509.
- 2 **Bolshikh, I. V.** Application of polymer coatings with a cold-curing matrix / I. V. Bolshikh, V. A. Kokhanovsky, A. V. Illarionov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2016. – No. 3. – P. 11–16. – ISSN 1818-5509.

3 **Машков, Ю. К.** Полимерные композиционные материалы в триботехнике : монография / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, М. Ю. Байбарацкая. – Москва : Недра, 2004. – 262 с. – ISBN 5-8365-0188-2.

4 Наноконпозиционные машиностроительные материалы : опыт разработки и применения / С. В. Авдейчик [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2006. – 403 с. – ISBN 985-417-779-3.

5 **Кохановский, В. А.** Трение и изнашивание фторопластсодержащих композитов (обзор) / В. А. Кохановский, Ю. А. Петров // Вестник Донского государственного технического университета, 2009. – Т. 9, № 1 (40). – С. 30–35. – ISSN 1992-5980.

6 **Демкин, Н. Б.** Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 244 с.

7 **ГОСТ Р ИСО 4287–2014.** Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности : профильный метод. Термины, определения и параметры структуры : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : дата введения 2016-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 21 с.

8 **Томас, Т. Р.** Топографические параметры шероховатости / Т. Р. Томас, О. А. Горленко // Трение и износ. – 1990. – Т. 11, № 3. – С. 551–555. – ISSN 0202-4977.

9 **Хусу, А. П.** Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Виттенберг, В. А. Пальмов. – Москва : Наука, 1975. – 344 с.

10 **Григорьев, А. Я.** Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А. Я. Григорьев. – Минск : Белорусская наука, 2016. – 247 с. – ISBN 978-985-08-1999-4.

11 **Hollander, A. E.** An application of topographical analysis to the wear of polymer / A. E. Hollander, J. K. Lancaster // Wear. – 1973. – Vol. 25, No. 2. – P. 155–170. – ISSN 0043-1648.

12 Role of micro- and nanofillers in abrasive wear of composites based on ultra-high molecular weight polyethylene / S. V. Panin, L. A. Kornienko, L. R. Ivanova, S. V. Shilko // Advanced Materials Research. – 2014. – No. 1040. – P. 148–154. – ISSN 1662-8985.

13 Анализ влияния наполнения композита маслом на состояние поверхности металлического контртела / П. Г. Иваночкин, Е. С. Новиков, А. И. Азоян, М. Д. Аникина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018 – № 3 (71). – С. 16–22. – ISSN 0201-727X.

3 **Mashkov, Yu. K.** Polymer composite materials in tribology : monograph / Yu. K. Mashkov, Z. N. Ovchar, M. Yu. Baibaratskaya. – Moscow : Nedra, 2004. – 262 p. – ISBN 5-8365-0188-2.

4 Nanocomposite engineering materials : experience of development and application / S. V. Avdeychik [et al.]. – Grodno : Grodno State University, 2006. – 403 p. – ISBN 985-417-779-3.

5 **Kokhanovsky, V. A.** Friction and wear of fluoroplastic-containing composites (review) / V. A. Kokhanovsky, Yu. A. Petrov // Bulletin of Don State Technical University. – 2009. – Vol. 9, No. 1 (40). – P. 30–35. – ISSN 1992-5980.

6 **Demkin, N. B.** Surface quality and contact of machine parts / N. B. Demkin, E. V. Ryzhov. – Moscow : Mashinostroenie, 1981. – 244 p.

7 **GOST R ISO 4287–2014.** Geometrical characteristics of products. Surface structure : profile method. Terms, definitions and parameters of structure : national standard of the Russian Federation : official edition : date of introduction 2016-01-01. – Moscow : Standartinform, 2019. – 21 p.

8 **Thomas, T. R.** Topographic parameters of roughness / T. R. Thomas, O. A. Gorlenko // Friction and wear. – 1990. – Vol. 11, No. 3. – P. 551–555. – ISSN 0202-4977.

9 **Khusu, A. P.** Surface roughness (probability-theoretical approach) / A. P. Khusu, Yu. R. Wittenberg, V. A. Palmov. – Moscow : Nauka, 1975. – 344 p.

10 **Grigoriev, A. Ya.** Physics and microgeometry of technical surfaces / A. Ya. Grigoriev. – Minsk : Belarusian Science, 2016. – 247 p. – ISBN 978-985-08-1999-4.

11 **Hollander, A. E.** An application of topographical analysis to the wear of polymer / A. E. Hollander, J. K. Lancaster // Wear. – 1973. – Vol. 25, No. 2. – P. 155–170. – ISSN 0043-1648.

12 Role of micro- and nanofillers in abrasive wear of composites based on ultra-high molecular weight polyethylene / S. V. Panin, L. A. Kornienko, L. R. Ivanova, S. V. Shilko // Advanced Materials Research. – 2014. – No. 1040. – P. 148–154. – ISSN 1662-8985.

13 Analysis of the influence of filling a composite with oil on the surface condition of a metal counterbody / P. G. Ivanochkin, E. S. Novikov, A. I. Azoyan, M. D. Anikin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2018 – No. 3 (71). – P. 16–22. – ISSN 0201-727X.

14 Композиционные материалы для узлов трения подвижного состава на основе технических тканей и их триботехнические характеристики / В. И. Колесников [и др.] // Труды ЮНЦ РАН. – Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2007. – Т. 2 : Физика. Механика. Техника. – С. 9–20. – ISSN 1993-6621.

15 Джейн, В. К. Изменения поверхностной топографии полимера и металла при скольжении. Ч. 1 / В. К. Джейн, С. Бахадур // Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия F. Проблемы трения и смазки. – 1980. – Т. 102, № 4. – С. 111–117. – ISSN 0201-8160.

16 Повышение износостойкости металлических и металлополимерных трибосистем путем формирования структуры и свойств их поверхностного слоя / И. В. Колесников, П. Д. Мотренко, В. И. Колесников, Д. С. Мантуров. – Москва : ВИНТИ РАН, 2021. – 168 с. – ISBN 978-5-902928-92-8.

14 Composite materials for friction units of rolling stock based on technical fabrics and their tribotechnical characteristics / V. I. Kolesnikov [et al.] // Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – Rostov-on-Don : Publishing House of the SSC of the RAS, 2007. – Vol. 2 : Physics. Mechanics. Engineering. – P. 9–20. – ISSN 1993-6621.

15 Jain, V. K. Changes in surface topography of polymer and metal during sliding. Part 1 / V. K. Jain, S. Bahadur // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Series F. Problems of Friction and Lubrication. – 1980. – Vol. 102, No. 4. – P. 111–117. – ISSN 0201-8160.

16 Increasing the wear resistance of metal and metal-polymer tribosystems by forming the structure and properties of their surface layer / I. V. Kolesnikov, P. D. Motrenko, V. I. Kolesnikov, D. S. Manturov. – Moscow : VINITI RAS, 2021. – 168 p. – ISBN 978-5-902928-92-8.

P. G. Ivanochkin, E. D. Anikina, E. P. Bolshikh

ANALYSIS OF THE STATE OF THE METAL COUNTERBODY SURFACE IN INTERACTION WITH AN ANTIFRICTION COATING CONTAINING PTFE

Abstract. The analysis of the change in the state of the metal counterbody surface in interaction with an antifriction coating based on fabric with PTFE fiber using a heat-resistant matrix binder of cold curing based on phenylone was carried out. The analysis was carried out on the basis of tribological tests on the friction machine II-5018 according to the scheme "shaft-partial liner". To assess the surface condition, an interference microscope - optical profilometer "NewView-600" from ZYGO was used. It is shown that after running-in, the value of the average arithmetic deviation of the profile from the mean line throughout the entire period of operation of the tribosystem retains a value not exceeding $Ra \leq 0.5 \mu\text{m}$, which ensures the operability of the tribocoupling.

Keywords: antifriction coating, fabric with PTFE fiber, cold-curing binder, surface of metal counterbody, tribological tests.

For citation: Ivanochkin, P. G. Analysis of the state of the metal counterbody surface in interaction with an antifriction coating containing PTFE / P. G. Ivanochkin, E. D. Anikina, E. P. Bolshikh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 4. – P. 28–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_28.

Сведения об авторах

Иваночкин Павел Григорьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru

Аникина Елена Дмитриевна

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

Information about the authors

Ivanochkin Pavel Grigoryevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru

Anikina Elena Dmitrievna

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

Больших Елизавета Павловна

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

Bolshikh Elizaveta Pavlovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Postgraduate Student,
e-mail: elizaveta.mz@yandex.ru

В. Н. Поляков

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

Аннотация. Настоящая статья посвящена новой разработанной методике расчета основных параметров эксцентриситета радиального подшипника скольжения с учетом минимальной величины пленки жидкого смазочного материала, а также значению дополнительной угловой координаты, определяющей положение эксцентриситета вала относительно вектора нагрузки в рабочем зазоре рассматриваемой трибосистемы. Экспериментальные исследования, полностью подтверждающие итоги теоретических результатов, проводились на стандартной модернизированной машине трения модели ИИ-5018 типа «Амслер». На основе разработанной расчетной методики, проверенной на точность результатов в сравнении с итогами экспериментальных исследований, был получен новый, отличный от стандартного, алгоритм уточненного расчета параметров подшипника скольжения, работающего в гидродинамическом режиме смазывания.

Ключевые слова: подшипник скольжения, машина трения, жидкостное трение, эксцентриситет, угловая координата эксцентриситета, толщина смазочного слоя.

Для цитирования: Поляков, В. Н. Методика определения параметров эксцентриситета гидродинамического подшипника скольжения / В. Н. Поляков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 34–40. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_34.

Во всех современных машинах широко применяются подшипники скольжения, работающие в гидродинамическом режиме смазывания. Однако даже стандартизированные методики инженерного расчета подшипников при их проектировании выполняются со значительным числом упрощающих допущений [1]. Сокращение объема этих упрощений в инженерных расчетах представляется актуальным и перспективным.

Одним из путей повышения точности проектирования, а значит, и эффективности работы подшипников является представленная в настоящей работе уточненная методика расчета. Она базируется на материально-агрегатной модели рассматриваемого подшипника скольжения. Это связано с возможностью определения на стандартной, но модернизированной машине трения ИИ-5018 таких основных эксплуатационных параметров подшипника, как: толщина пленки жидкого смазочного материала, относительная величина и угловая координата эксцентриситета [2]. Экспериментальное определение этих параметров позволяет оценить точность их теоретических расчетов. При этом учитывается максимальное давление в слое жидкого смазочного материала, его вязкостно-скоростные характеристики, а также несущая способность [3–5].

Задачей выполнения теоретических исследований является определение положения вала в опорном кольце радиального подшипника скольжения, работающего в гидродинамическом режиме смазывания. Это положение характеризуется двумя параметрами: величиной эксцентриситета и его угловой координатой. Рабочая схема расчетов (рис. 1) базируется на модели подшипника «вал – колодка», реализуемой на модернизированной машине трения [6].

Одним из основных параметров гидродинамического подшипника, обеспечивающего его работоспособность, является минимальная толщина пленки смазочного материала [1, 2], определение которой зависит от параметров эксцентриситета [3, 7]:

$$h_{\min} = \frac{\Delta}{2} - e = r \cdot \psi(1 - \varepsilon), \quad (1)$$

где $e = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ – абсолютная величина эксцентриситета;

ψ – относительный зазор;

ε – относительный эксцентриситет;

Δ – диаметральный зазор;

r – радиус вала.

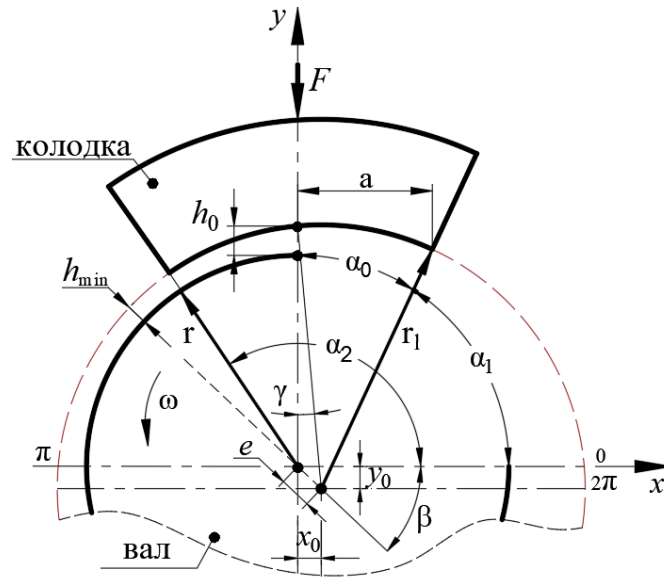


Рис. 1. Схема расчетной модели радиального подшипника

На схеме обозначено: F – нагрузка; ω – скорость вращения вала; r , r_1 – радиусы вала и колодки; e – величина эксцентриситета; h_0 , h_{\min} – средняя и минимальная толщина смазочной пленки; α_1 , α_2 – начальная и конечная угловые координаты дуги контакта; α_0 – половина дуги контакта; a – длина контакта; β – угловая координата эксцентриситета; γ – угловая координата равнодействующей гидродинамического давления.

В соответствии с рисунком расчетной модели 1 параметры смещения центра втулки по координатным осям x и y имеют вид:

$$x_0 = r \sin \gamma; \quad (2)$$

$$y_0 = r + h_0 - r_1 \cos \gamma. \quad (3)$$

Исследования [4] позволили установить, что эксцентриситет зависит от соотношения угловой координаты β и угловой координаты γ смещения силы положения гидродинамического давления, определяемая через коэффициент трения $\arctg(f)$, которая является равнодействующей.

Запишем уравнение угловой координаты β :

$$\beta = \arctg\left(\frac{y_0}{x_0}\right) = \arcsin\left(\frac{y_0}{e}\right) = \frac{\pi}{2} - \arctg(f), \text{ рад.} \quad (4)$$

Угловую координату смещения нагружающей силы γ определим, используя стандартную программу символьных и числовых вычислений MAPLE. С помощью функции *fsolve* найдем численное решение угловой координаты γ в следующем виде:

$$\gamma = \text{fsolv}\left(\frac{y_0}{x_0} = \text{tg}(\beta), \gamma\right), \text{ рад.} \quad (5)$$

Выражение (5) может быть представлено и в следующей форме, где γ также определяется численно в виде:

$$\gamma = \arctg\left(\frac{-h_0 \cdot r \cdot \text{tg}(\beta) - r^2 \cdot \text{tg}(\beta) + \sqrt{\text{tg}(\beta)^2 \cdot r^2 \cdot r_1^2 - 2h_0 \cdot r \cdot r_1^2 - r^2 \cdot r_1^2 + r_1^4}}{r^2 \cdot \text{tg}(\beta)^2 + r_1^2}\right), \text{ рад.} \quad (6)$$

Разработанная методика расчетов выполняется при соблюдении диапазона условий (7), которые используются также при расчетах по стандартной методике и при заключительных контрольных экспериментах:

$$0 < h_0 < \frac{\Delta}{2}; h_{\min} > 0; 0 \leq \varepsilon \leq 1; 0^\circ < \beta \leq 90^\circ. \quad (7)$$

Проведенный комплекс теоретических исследований позволяет рассмотреть структурную схему модели радиального подшипника скольжения «вал – колодка» с применением полученных формул (1)–(6) при строгом выполнении условий (7).

Известно, что для модели подшипника скольжения с круговым профилем опорной поверхности втулки форма зазора определяется уравнением:

$$h(\alpha) = r_1 - \sqrt{r^2 + e^2 - 2r \cdot e \cdot \cos(\alpha(l))}, \quad (8)$$

где $\alpha(l) = -|\beta| - \frac{l}{r}$ – функция угла, а $l = \alpha \cdot r$ – длина дуги, соответствующая углу α (рис. 1).

Тогда:

$$\alpha_{h_{\min}} = (\pi - |\beta|), \quad (9)$$

а длина дуги положения минимальной толщины слоя смазки:

$$l_{h_{\min}} = \alpha_{h_{\min}} \cdot r. \quad (10)$$

Подставляя (9, 10) в (8), находим значение минимальной толщины смазочного слоя.

Для определения контактных давлений и несущей способности смазочного материала воспользуемся уравнением Рейнольдса. С учетом $v = \omega \cdot r$ уравнение может быть представлено в виде:

$$\frac{dp(l)}{dl} = 6\mu_0 \cdot \omega \cdot r \cdot \sin\left(\frac{l}{r}\right) \cdot \frac{h(l) - h_{\min}}{h(l)^3}. \quad (11)$$

Для сравнения предлагаемой теоретической методики с имеющейся стандартизированной [1] выполнен расчет радиального подшипника со следующими параметрами: $F = 2000$ Н – радиальная нагрузка; $\omega = 240$ об/мин – скорость вращения вала; $r = 0,02$ м – радиус вала; $a = 0,01$ м – длина половины контакта; $s = 0,01$ м – ширина контакта; $\mu(60) = 0,0134$ Па·с – динамическая вязкость масла Тп-22С при температуре 60°C ; $f = 0,0329$ – коэффициент трения. Полученные результаты теоретических исследований сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение результатов методик теоретических исследований

Зазор Δ , мкм	Стандартная методика			Предлагаемая методика			Расхождение, %		
	ε	β , град	h_{\min} , мкм	ε	β , град.	h_{\min} , мкм	ε	β ,	h_{\min} ,
128	0,969	78,5	1,93	0,956	88,12	2,76	1,36	10,9	30
64	0,928	82,3	2,28	0,908	88,11	2,92	2,32	6,6	21,9
32	0,835	66,3	2,63	0,826	88,11	2,78	1,07	24,7	5,4

Сравнительный анализ полученных результатов по расчету угловой координаты положения эксцентриситета показал, что использование разработанной методики расчета, уточненной вводом дополнительного параметра γ , значительно отличается от данных, полученных по стандартизированной методике. Если расхождения относительного эксцентриситета не превышают 2,32 %, то величина минимальной толщины смазочной пленки достигает 30 %. Последнее обстоятельство не может не сказаться на основных эксплуатационных параметрах трибосистемы.

Кроме того, при равном контактном давлении и одинаковом изменении зазора трибосопряжения расчет минимальной толщины смазочной пленки по стандартной методике дает разность в 36 %, для тех же условий предлагаемая методика дает разность в 7 %. При этом уменьшение зазора в стандартной методике увеличивает минимальную толщину слоя смазочного материала, что не соответствует реальному состоянию контакта.

Для выполнения окончательной сравнительной оценки преимуществ предлагаемой методики полученные результаты расчета сравнивались с результатами экспериментальных исследований при соблюдении всех условий, учтенных при выполнении расчета.

Для экспериментальной верификации выполненных теоретических расчетов использовалась модернизированная современная испытательная машина трения типа «Амслер» модели ИИ-5018 [6, 8, 9]. Дополнительная модернизация машины включала шаровую опору частичного вкладыша (колодки) и установку специальной измерительной системы, представленной схемой на рис. 2. Она позволяет определять изменение пространственного положения II колодки I относительно статического горизонтального I. Кроме того, модернизация позволяет измерять величину угла гидродинамического клина в работающем подшипнике скольжения в процессе его жидкостного режима смазывания.

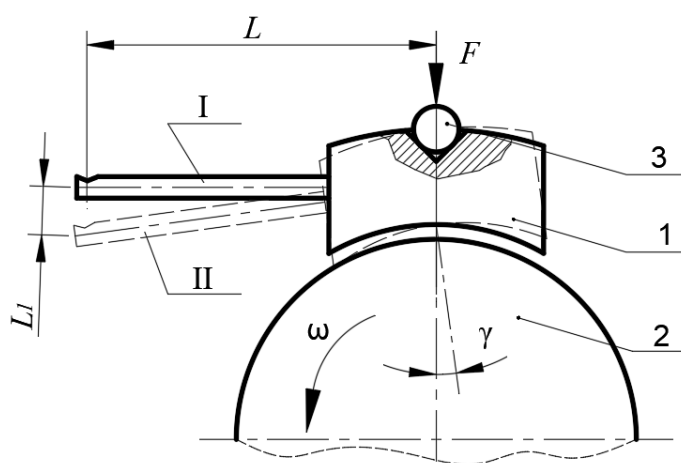


Рис. 2. Схема измерения положения угла γ при трибологических исследованиях:

I – колодка; 2 – вал; 3 – шаровая опора; F – нагрузка; ω – угловая скорость вала;
 γ – угловая координата равнодействующего положения гидродинамического давления в контакте;
 L, L_1 – размерные параметры горизонтальной оси в статике и динамике;
 I – ось в горизонтальном положении; II – ось в рабочем положении

В связи с одновременным действием нагружающего усилия F , передаваемого через металлический шарик 3, и момента трения с угловой скоростью вала 2 изменяется начальный угол на входе гидродинамического клина и образуется эксцентриситет. Под действием гидродинамического давления в контакте в пределах посадочного зазора колодка I занимает равновесное положение, которое измеряется угловой координатой γ . Полученные результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований						
Входные параметры			Выходные параметры			
ω , об/мин;	Δ , мкм;	P , МПа	f	h_{\min} , мкм	T , °С	γ , 10^{-2} град.
240	128	0,59	0,019	5,13	28	0,32
		1,18	0,029	3,93	35	0,49
		2,35	0,036	2,76	76	0,63
		4,06	0,049	1,7	85	0,87

На основе данных экспериментальных исследований (табл. 2), полученных на модели подшипника скольжения «вал – колодка», выполнен расчет параметров эксцентриситета и толщины слоя смазочного материала по различным методикам. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели эффективности методики расчетов

I		II		III		IV	
Эксперимент		Расчеты по Рейнольдсу		Расчеты по новой методике		Расчеты по ГОСТ [11]	
ε	h_{\min} , МКМ	ε	h_{\min} , МКМ	ε	h_{\min} , МКМ	ε	h_{\min} , МКМ
0,919	5,13	0,773	14,49	0,862	8,83	0,759	15,39
0,938	3,93	0,853	9,38	0,905	6,02	0,844	9,92
0,956	2,76	0,951	3,16	0,959	2,58	0,963	2,34
0,973	1,7	0,969	1,92	0,972	1,79	0,987	1,49
Погрешность при сравнении, %		I – II		I – III		I – IV	
		15,9	64,6	6,2	41,9	17,4	66,7
		9,1	58,1	3,5	34,9	10,0	60,4
		0,5	12,6	0,3	6,8	0,7	15,2
Среднее значение		6,46	36,7	2,53	22,1	7,36	38,5

Анализ табличных данных позволяет установить следующее:

1 Предлагаемая методика даёт возможность значительно уточнить расчетные величины угловой координаты β эксцентриситета и толщины слоя смазочного материала в контакте, с использованием дополнительной координаты γ на основе коэффициента трения.

2 Толщина масляной пленки, рассчитанная по предлагаемой методике, наиболее близко соответствует экспериментальным результатам во всем исследованном диапазоне параметров. Наиболее эффективное ее применение имеет место в диапазоне нагрузок свыше 2,35 МПа, что показано на рис. 3 для толщины масляной пленки.

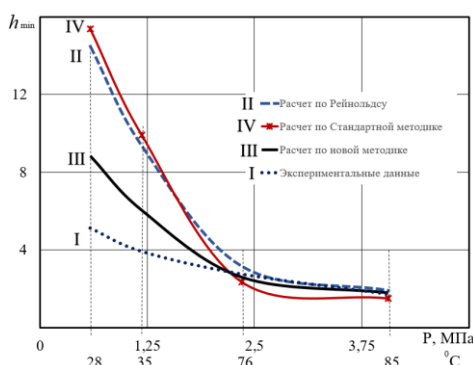


Рис. 3. График эффективности методики расчетов

3 Значительное снижение отличия минимальной толщины смазочного слоя при расчете по новой методике в сравнении с другими методами может быть объяснено табулированием исходных величин в ГОСТе и отличием исследованной модели от реального подшипника скольжения в любом агрегате. Уточнение величины относительного эксцентриситета в предлагаемой методике определяется введением в расчеты дополнительной угловой координаты γ .

Выводы

Таким образом, в результате теоретических исследований методик гидродинамического расчета подшипника скольжения и их экспериментальной проверки на основе агрегатно-материальной модели, выполненной на базе модернизированной машины трения ИИ-5018, разработана эффективная методика уточненных проектировочных инженерных расчетов.

Представляется актуальным продолжение этих исследований на реальных подшипниках в расширенном диапазоне эксплуатационных режимов.

Список литературы

- 1 **ГОСТ ИСО 7902-2-2001.** Гидродинамические радиальные подшипники скольжения, работающие в стационарном режиме. Круглоцилиндрические подшипники. Ч. 1–3. Дата введения 01.07.2002. — URL : <https://meganorm.ru/Data2/1/4294815/4294815829> (дата обращения: 17.11.2024).
- 2 Современная трибология: Итоги и перспективы / Э. Д. Браун, И. А. Буяновский, Н. А. Воронин [и др.] ; под редакцией К. В. Фролова. — Москва : Издательство ЛКИ, 2008. — 480 с. — ISBN 978-5-382-00518-8.
- 3 Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учебник для технических вузов / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше [и др.] ; под общей редакцией ред. А. В. Чичинадзе. — Москва : Машиностроение, 2001. — 664 с. — ISBN 5-217-03053-4.
- 4 Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 1 / под общей редакцией М. Хебды, А. В. Чичинадзе // Теоретические основы. — Москва : Машиностроение, 1989. — 400 с.
- 5 Расчетная модель радиального подшипника с нестандартным опорным профилем / В. Н. Багрова, В. В. Василенко, В. И. Киришчиева, М. А. Мукутадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 2. — С. 17–24. — DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_17.
- 6 **Елманов, И. М.** Особенности градуировки машин трения типа «Амслер» / И. М. Елманов, Г. В. Даровской. — Ростов-на-Дону : РГУПС, 2010. — 155 с. — ISBN 978-5-88814-293-6.
- 7 **Поляков, В. Н.** Параметры эксцентриситета гидродинамического подшипника скольжения / В. Н. Поляков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 2. — С. 188–193. — DOI 10.46973/0201727X_2024_2_188.
- 8 **Даровской, Г. В.** Методика измерения толщины смазочной пленки емкостным методом на машинах трения типа «Амслер» / Г. В. Даровской, В. Н. Поляков, А. Н. Опацких // Трибология — машиностроению : труды XIII Международной научно-технической конференции. — 2020. — С. 100–104. — ISBN 978-5-904282-10-3.
- 9 **Кохановский, В. А.** Опорный профиль трибосистем скольжения / В. А. Кохановский, В. Н. Поляков // Вестник машиностроения. — 2021. — № 3. — С. 53–56. — DOI 10.36652/0042-4633-2021-3-53-56.

References

- 1 **GOST ISO 7902-2-2001.** Hydrodynamic journal plain bearings operating in steady-state mode. Circular cylindrical bearings. P. 1–3. Date of introduction 01.07.2002. — URL : <https://meganorm.ru/Data2/1/4294815/4294815829> (date of access: 11/17/2024).
- 2 Modern tribology : Results and prospects / E. D. Brown, I. A. Buyanovsky, N. A. Voronin [et al.] ; edited by K. V. Frolov. — Moscow : LKI Publishing House, 2008. — 480 p. — ISBN: 978-5-382-00518-8.
- 3 Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication) : textbook for technical universities / A. V. Chichinadze, E. D. Braun, N. A. Bushe [et al.] ; edited by A. V. Chichinadze. — Moscow : Mashinostroenie, 2001. — 664 p. — ISBN 5-217-03053-4.
- 4 Handbook of tribological engineering. In 3 volumes. Vol. 1 / edited by M. Hebda, A. V. Chichinadze // Theoretical basis. — Moscow : Mechanical Engineering, 1989. — 400 p.
- 5 Calculation model of a radial bearing with a non-standard support profile / V. N. Bagrova, V. V. Vasilenko, V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. — 2021. — No. 2. — P. 17–24. — DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_17.
- 6 **Elmanov, I. M.** Features of the calibration of friction machines of the "Amsler" type / I. M. Elmanov, G. V. Darovskoy. — Rostov-on-Don : RGUPS, 2010. — 155 p. — ISBN 978-5-88814-293-6.
- 7 **Polyakov, V. N.** Eccentricity parameters of a hydrodynamic plain bearing / V. N. Polyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. — 2024. — No. 2. — P. 188–193. — DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_180.
- 8 **Darovskoy, G. V.** Procedures for measuring the thickness of a lubricating film using the capacitive method on Amsler-type friction machines / G. V. Darovskoy, V. N. Polyakov, A. N. Opatskikh // Tribology — mechanical engineering: proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference. — 2020. — P. 100–104. — ISBN 978-5-904282-10-3.
- 9 **Kokhanovsky, V. A.** Supporting profile of sliding tribosystems / V. A. Kokhanovsky, V. N. Polyakov // Bulletin of Mechanical Engineering. — 2021. — No. 3. — P. 53–56. — DOI 10.36652/0042-4633-2021-3-53-56.

V. N. Polyakov

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF ECCENTRICITY OF A HYDRODYNAMIC PLAIN BEARING

Abstract. This article is devoted to a newly developed method for calculating the main parameters of the eccentricity of a journal plain bearing taking into account the minimum film size of the liquid lubricant, as well as the value of the additional angular coordinate that determines the position of the shaft eccentricity relative to the load vector in the working gap of the tribosystem under consideration. Experimental studies that fully confirm the results of the theoretical results were carried out on a standard modernized friction machine model II5018 of the “Amsler” type. Based on the developed calculation method, checked for the accuracy of the results in comparison with the results of the experimental studies, a new algorithm, different from the standard one, was obtained for the refined calculation of the parameters of a plain bearing operating in the hydrodynamic lubrication mode.

Keywords: plain bearing, friction machine, fluid friction, eccentricity, angular coordinate of eccentricity, thickness of lubricant layer.

For citation: Polyakov, V. N. Methodology for determining the parameters of eccentricity of a hydrodynamic plain bearing / V. N. Polyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 34–40. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_4_34.

Сведения об авторах

Поляков Владимир Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
строительный факультет,
инженер,
e-mail : vovapolyakov@mail.ru

Information about the authors

Polyakov Vladimir Nikolaevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Construction Department,
Engineer,
e-mail : vovapolyakov@mail.ru

С. П. Рыжов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ШУМА ЗУБОДОЛБЕЖНЫХ СТАНКОВ

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований спектров шума и вибраций, проявляющихся в зубодолбежных станках при их промышленной эксплуатации под различными технологическими нагрузками. В зависимости от технических параметров этих станков в процессе выполнения работ согласно технологическому регламенту идентифицируются источники, создающие повышенные уровни шума, а именно резец и заготовка, тогда как влияние станины можно проигнорировать. Это подтверждается теоретическими выводами о закономерностях формирования виброакустических характеристик зубодолбежных станков. На основании проведенных исследований удалось выделить ключевые факторы, влияющие на величину шумов и вибраций в зубодолбежных станках. В первую очередь это конструктивные особенности резца и материала заготовки. Различные геометрические параметры резца, такие как угол заострения, форма и степень заточки, существенно изменяют картину распределения вибраций в процессе резания. Более того, материалы с более высоким модулем упругости и плотностью способствуют повышению общей амплитуды вибраций, что отражается на спектре шума.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, уровни звука, октавные уровни звукового давления и вибраций, зубодолбежные станки.

Для цитирования: Рыжов, С. П. Экспериментальные исследования спектрального состава шума зубодолбежных станков / С. П. Рыжов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 41–48. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_41.

Введение

Зубчатое колесо стало неотъемлемым атрибутом, так как практически все машины содержат в себе зубчатые передачи, которые отличаются универсальностью и способностью выдерживать большие нагрузки, а также удобны в сборке и обслуживании. Зубодолбежные станки предназначены для формирования прямых и косых зубьев на колесах цилиндрической формы, имеющих наружное и внутреннее расположение зубьев. С помощью станков данной группы обрабатываются цилиндрические колеса с зубьями различных типов зацеплений, их блоки, зубчатые муфты, рейки, зубчатые секторы, шлицевые валики, храповики и т.д. Обработка производится методом обкатки (рис. 1). При нарезании косозубых колес долбяку сообщается дополнительное вращательное движение от соответствующих направляющих.



Рис. 1. Особенности обработки на зубодолбежном станке обкатного типа

Зубодолбежные станки осуществляют процесс резания возвратно-поступательным движением инструмента, а при наличии специальных долбяков можно обрабатывать плоские фасонные детали.

Экспериментальные исследования спектров шума зубодолбежных станков

Экспериментальные исследования спектров шума и вибраций проводились для станков с кривошипным и гидравлическим приводом главного двигателя как на холостом ходу, так и при реализации технологического процесса, как указывалось выше, для ситуаций с максимальным значением превышения уровня звука над нормативной величиной [1–5]. Спектры шума вертикального зубодолбежного станка модели 5111 представлены на рис. 2 и 3.

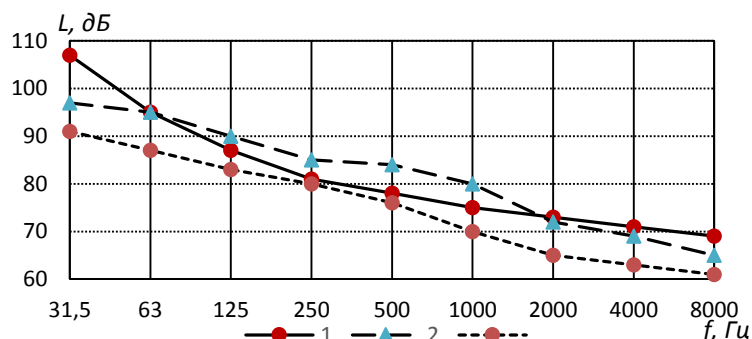


Рис. 2. Спектры шума для станка модели 5111 с кривошипным приводом при работе на холостом ходу:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – при частоте 1600 двойных ходов в минуту;
3 – при частоте 250 двойных ходов в минуту

При анализе характерных особенностей шума станка на холостом ходу при различных режимах работы важно учитывать изменение звукового давления в зависимости от частоты. Измерения шума станка на холостом ходу показали, что при 1600 двойных ходах в минуту возникает значительное акустическое воздействие, превышающее допустимые нормы на 3–6 дБ в частотном диапазоне 250–1000 Гц и особенно в пятой октаве. Спектр, образующийся при таком режиме, характеризуется относительно равномерным спадом звуковой интенсивности с увеличением частоты. В диапазоне частот от 31,5 до 1000 Гц интенсивность звуковой энергии падает на 2–3 дБ на октаву, и только при переходе от шестой к седьмой октаве уровень звукового давления снижается на 10 дБ. В восьмой и девятой октавах уменьшение уровней звукового давления достигает 2–3 дБ. При 250 двойных ходах в минуту уровни звукового давления остаются в пределах допустимых значений по всему регулируемому частотному диапазону.

Разница в уровнях звукового давления, в зависимости от числа двойных ходов в минуту, колеблется в пределах 6–10 дБ. Теоретически рассчитанное значение составляет:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{n_1}{n_2} = 10 \lg \frac{1600}{250} = 8 \text{ дБ.}$$

Процесс обработки зубчатого колеса изменяет интенсивность спектральных составляющих шума (рис. 3), однако его характер при этом соответствует спектру шума холостого хода.

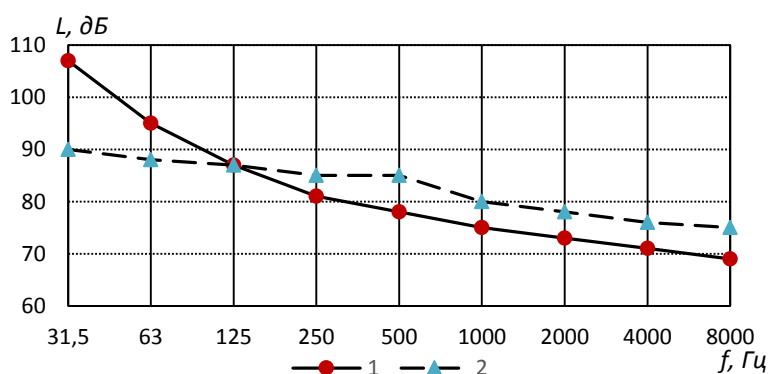


Рис. 3. Спектр шума станка модели 5111:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – шум при обработке зубчатых колёс

При обработке зубчатого колеса диаметром 80 мм, модулем 1 мм, при $n = 1600$ дв. ход/мин, уровни звукового давления составляют от 5 до 10 дБ. Максимальное значение превышения зафиксировано в пятой октаве. В шестой – девятой октавах уровни звукового давления превышают норматив на 6 дБ. Анализируя спектры звукового давления, следует обратить внимание на характерные особенности изменений в отдельных октавных полосах. Повышенный уровень шума в пятой октаве может быть связан с резонансными явлениями в системе «станок – заготовка», что, в свою очередь, может повлиять на точность и качество обработки. Учитывая, что модуль зубчатого колеса составляет 1 мм, важно рассмотреть динамические характеристики станка и возможность их оптимизации для снижения шума.

Исследование и анализ шумовых спектров холостого хода зубодолбежных станков моделей 5122 и 5122В, представленных на рис. 4, выявляет значимые отклонения в уровне звукового давления. Превышение нормативных значений уровней звукового давления на 2–3 дБ зафиксировано в полосах пятой и шестой октавах.

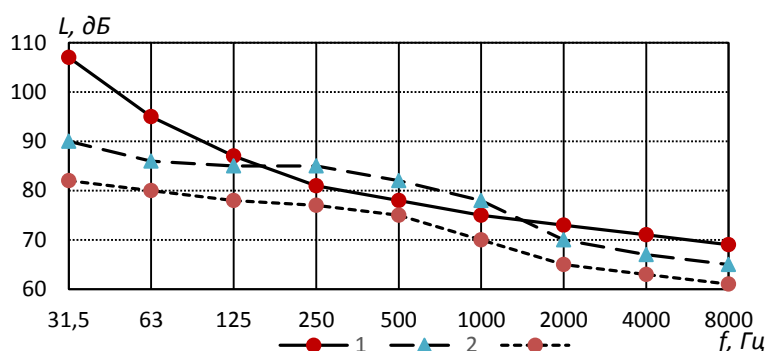


Рис. 4. Спектры шума при холостом ходе зубодолбежных станков моделей 5122 и 5122В:
1 – предельно допустимый спектр; 2 – при числе 850 двойных ходов в минуту;
3 – при числе 200 двойных ходов в минуту

При сопоставлении уровней шума при наибольшем и наименьшем количестве двойных ходов, можно сказать, что разница в уровнях звукового давления согласно экспериментальным данным составляет 5–8 дБ, это подтверждается и теоретическими расчетами:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{850}{250} = 6 \text{ дБ.}$$

Уровни шума, генерируемые на холостом ходу зубодолбежного вертикального станка модели 5122Б, приведены на рис. 5.

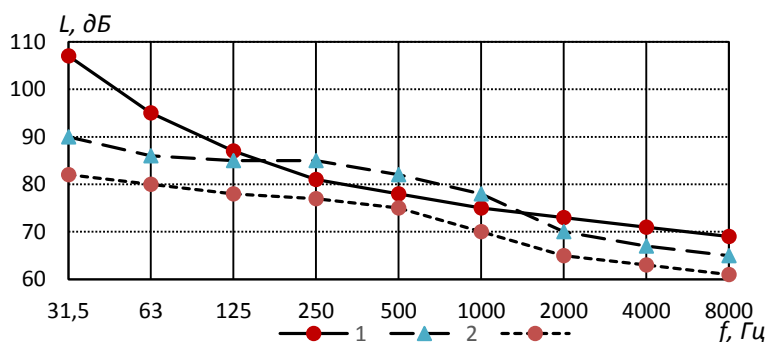


Рис. 5. Спектры шума холостого хода станка модели 5122Б:
1 – предельно допустимый спектр; 2 – при числе 1200 двойных ходов в минуту;
3 – при числе 280 двойных ходов в минуту

Уровни звукового давления холостого хода зубодолбежного станка модели 5122Б выше, чем у станков 5122 и 5122В, и ниже, чем у станка 5111. Эта закономерность подтверждается соотношением числа двойных ходов в минуту $\Delta L = 10 \lg \Delta n$, где Δn – отношение числа двойных ходов в минуту. Уровни

звукового давления превышают нормативные значения в четвертой – шестой октавах, а величины превышения составляют 3–4 дБ.

Спектральные характеристики шума, полученные при обработке зубчатых колес диаметром 200 мм, с модулем 4,5 мм на зубодолбежных станках моделей 5122, 5122В и 5122Б, при максимальных показателях числа двойных ходов, представлены на рис. 6.

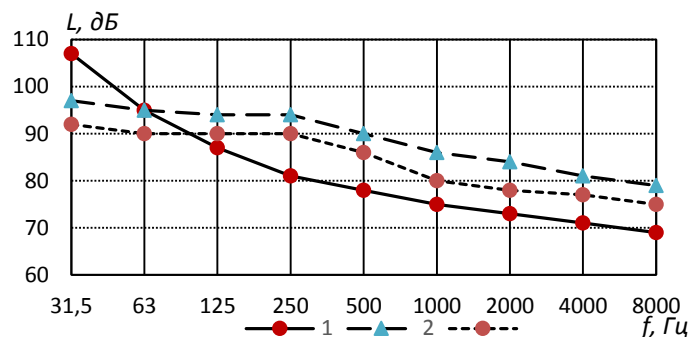


Рис. 6. Спектры шума станков в рабочем режиме:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – модели 5122Б; 3 – модели 5122 и 5122В

Как видно из полученных результатов измерений при обработке зубчатых колес у станков 5122Б, 5122 и 5122В превышения уровней звукового давления составляют 4–5 дБ. Эти данные с достаточно высокой точностью подтверждаются теоретическими расчётами $\Delta L = 10 \lg \Delta N n$ (где N – мощностью резания, кВт; n – число двойных ходов в минуту).

$$\Delta L = 10 \lg \Delta \frac{3,7 \cdot 1200}{3,1 \cdot 850} = 2,4 \text{ дБ};$$

$$\Delta L = 10 \lg \Delta \frac{3,7 \cdot 1200}{2,1 \cdot 850} = 4 \text{ дБ}.$$

В результате уровень звукового давления для станков указанных моделей превышает норму в диапазоне третьей – девятой октав. Для станка модели 5122Б величина превышения уровней звукового давления составляет 8–15 дБ, а для станков моделей 5122 и 5122В – 4–10 дБ.

При замерах звукового давления на зубодолбежных станках моделей 5140 и 5М150 в режиме холостого хода обнаружилось, что разница составляет 2 дБ, что практически соответствует погрешностям проведения эксперимента. Измеренные уровни звукового давления станка модели 5140 выше, чем у станка 5М150, что подтверждается теоретическими расчетами:

$$\Delta L = 10 \lg \Delta \frac{450}{212} = 3 \text{ дБ}.$$

Вследствие снижения количества числа двойных ходов в минуту (в сравнении со станками модельного ряда 5111 и гаммы станков 5122) уровни звукового давления находятся в пределах санитарных норм (рис. 7).

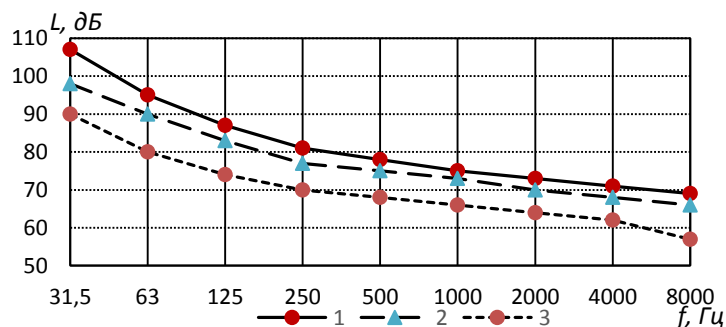


Рис. 7. Спектры шума холостого хода зубодолбежных станков моделей 5140 и 5М150:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – при числе 450 двойных ходов в минуту; 3 – при числе 65 двойных ходов в минуту

Разница в уровнях звукового давления на зубодолбежном станке модели 5140, при обработке зубчатых колес диаметром 500 мм при модуле 3 мм и диаметром 800 мм при модуле 12 мм, составляет 3–5 дБ (рис. 8).

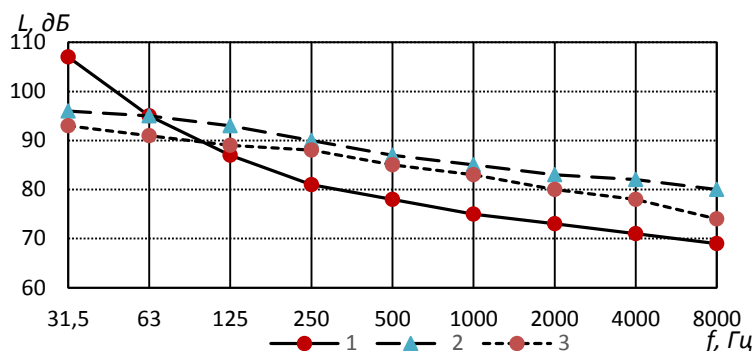


Рис. 8. Спектры шума станков в рабочем режиме:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – модели 5M150; 3 – модели 5140

Важно подчеркнуть, что уровни звукового давления станка модели 5M150 выше, чем у станка 5140. Объясняется это соотношением мощностей приводов главного движения и диаметром зубчатых колес, подвергающихся обработке. В результате уровни звукового давления в интервале 125–8000 Гц превышают нормативные значения на 8–13 дБ для станка модели 5M150 и на 3–10 дБ для станка модели 5140.

У станка модели 5M150, который является наиболее «шумным» из всей гаммы рассматриваемых станков, звуковое давление в точках по обе стороны от рабочего места практически идентично и не превышает 84 дБ на частотах от 500 до 8000 Гц (рис. 9).

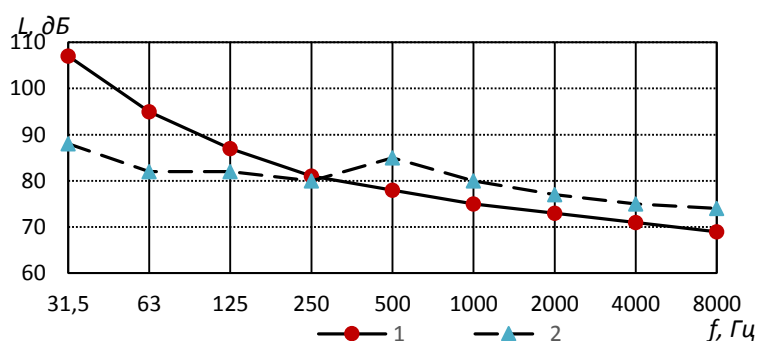


Рис. 9. Спектры шума в рабочем режиме станка модели 5M150:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – в точках справа и слева от рабочего места

Измерение уровней шума гаммы зубодолбежных станков с гидрофицированным приводом главного движения показало, что на холостом ходу уровни звукового давления не превышают санитарных норм. На рис. 10 представлены результаты измерений на примере наиболее «шумного» на холостом ходу станка модели 5111.

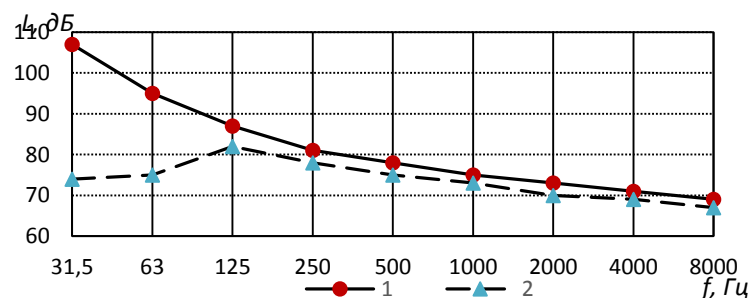


Рис. 10. Спектры шума холостого хода станка модели 5111:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – с гидрофицированным приводом долбяка

Спектры шума при реализации аналогичных технологических процессов обработки колес гидрофицированных зубодолбежных станков приведены на рис. 11

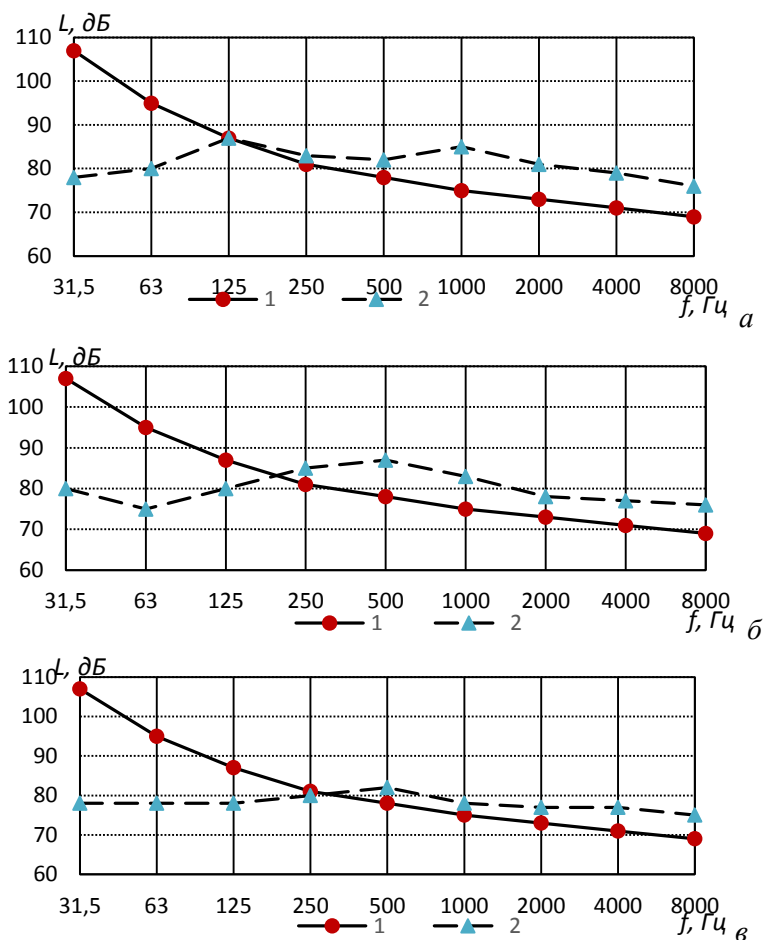


Рис. 11. Спектры шума гидрофицированных станков в рабочем режиме:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – экспериментальные значения спектров шума на станках:
 а – модели 5111; б – модели 5122Б; в – модели 5M150

Проведенные исследования показали, что при частотах до 500 Гц наблюдается снижение уровней звукового давления на 8–10 дБ. Это связано с уменьшением влияния динамических свойств кривошипного механизма долбяка. На средних частотах 500 и 1000 Гц спектр шума остается практически неизменным. Однако по мере увеличения частоты 2000 Гц и выше наблюдается заметное снижение звукового давления. Это связано с резонансными явлениями в конструкции долбяка, а также с уменьшением амплитуды колебаний отдельных элементов механизма. При частотах свыше 2000 Гц уровни звукового давления могут уменьшаться на 10–15 дБ, что делает возможным применение дополнительных методов шумоизоляции и демпфирования.

Заключение

Исследования, выполненные экспериментальным путем, наглядно показали, что основными источниками шумового дискомфорта, существенно влияющими на звуковое поле, формирующееся на рабочем месте операторов зубодолбежных станков, являются узлы резания и обрабатываемые зубчатые колеса. Кроме того, выявлено, что уровень шума может значительно варьироваться в зависимости от типа обработки и характеристик используемых режущих инструментов [6–10], так как более острый инструмент создает меньшую вибрацию, а значит, и меньший звуковой фон по сравнению с тупыми или поврежденными режущими краями. Специфика материала обрабатываемой заготовки также играет важную роль: твердые металлические материалы часто генерируют более интенсивный шум, нежели мягкие, такие как алюминий или пластик.

В первую очередь это относится к узлу резания, который является главным источником акустических волн в процессе обработки. Вибрации, возникающие в процессе резания металла, передаются

через конструкцию станка и распространяются в окружающее пространство, создавая звуковое поле, которое может достигать критических уровней на рабочем месте.

Другим важным источником шума являются приводы и трансмиссионные механизмы станков. Трение в подшипниках, динамические нагрузки на валы и передачи, а также резонансные явления в элементах конструкции способствуют увеличению общего уровня акустического дискомфорта. Неточные настройки или износ отдельных компонентов могут усугубить ситуацию, вызывая дополнительные вибрации и, соответственно, повышая уровень шума.

Список литературы

1 **Баланова, М. В.** Методика и техническое обеспечение проведения экспериментальных исследований по определению шума на рабочих местах / М. В. Баланова, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (46). – С. 5–7. – ISSN 1818-5509.

2 **Финоченко, Т. А.** Методика проведения экспериментальных исследований шума прутковых токарных автоматов / Т. А. Финоченко // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии : материалы IV Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2012. – С. 263–268. – EDN JDVMJB.

3 Безопасность жизнедеятельности : учебное пособие / И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков [и др.] ; ФГБОУ ВО РГУПС. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону, 2019. – 308 с. – ISSN 978-5-88814-843-3.

4 **Финоченко, Т. А.** Методика проведения экспериментальных исследований шума прутковых токарных автоматов / Т. А. Финоченко // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии : Министерство промышленности и энергетики. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2012. – С. 263–268. – EDN JDVMJB.

5 **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.

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 **Месхи, Б. Ч.** Математическое моделирование шумообразования системы инструмент–заготовка при фрезеровании и шлифовании / Б. Ч. Месхи, В. А. Гергерт // Строительство-2003 : материалы Международной научно-

References

1 **Balanova, M. V.** Methodology and technical support for conducting experimental studies to determine noise in the workplace / M. V. Balanova, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 1 (46). – P. 5–7. – ISSN 1818-5509.

2 **Finochenko, T. A.** Methodology for conducting experimental studies of the noise of bar turning machines / T. A. Finochenko // Innovative technologies in mechanical engineering and metallurgy : Proceedings of the IV International scientific and practical conference. – Rostov-on-Don : Don State Technical University, 2012. – P. 263–268. – EDN JDVMJB.

3 Life safety : textbook / I. G. Pereverzev, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov [et al.] ; FSBEI VO RSTU – 2nd ed., rev. and add. – Rostov-on-Don, 2019. – 308 p. – ISSN 978-5-88814-843-3.

4 **Finochenko, T. A.** Methodology for conducting experimental studies of the noise of bar turning machines / T. A. Finochenko // Innovative technologies in mechanical engineering and metallurgy : Ministry of Industry and Energy. – Rostov-on-Don : DSTU Publishing Center, 2012. – P. 263–268. – EDN JDVMJB.

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

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 **Meskhi, B. Ch.** Mathematical modeling of noise generation in the tool-workpiece system during milling and grinding / B. Ch. Meskhi, V. A. Gergert // Construction-2003 : materials of the International Scientific-Practical Conference

практической конференции / РГСУ. – Ростов на-Дону, 2003. – С. 50–57. – EDN VIHKAD.

8 **Рыжов, С. П.** Обоснование акустических моделей систем «зубчатые колеса-оправки» зубодолбежных и зубострогальных станков / С. П. Рыжов, А. Н. Чукарин, Т. А. Финоченко // Noise Theory and Practice. – 2022. – Т. 8, № 4 (31). – С. 77–85. – EDN HHARVQ.

9 **Месхи, Б. Ч.** Исследование виброакустических характеристик малошумного механизма поддержки прутка / Б. Ч. Месхи, Т. А. Финоченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 4. – С. 27–30. – ISSN 0201-727X.

10 Характеристики шумового дискомфорта в рабочей зоне прутковых токарных станков / С. А. Раздорский, Т. А. Финоченко, А. Н. Чукарин, И. А. Яицков // Мониторинг. Наука и технологии. – 2018. – № 3(36). – С. 81–84. – EDN YCMIFF.

/ RSUCE. – Rostov-on-Don, 2003. – P. 50–57. – EDN VIHKAD.

8 **Ryzhov, S. P.** Justification of acoustic models of "gear – mandrels" systems of gear shaping and gear planing machines / S. P. Ryzhov, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko // Noise Theory and Practice. – 2022. – Vol. 8, No. 4 (31). – P. 77–85. – EDN HHARVQ.

9 **Meskhi, B. Ch.** Study of vibroacoustic characteristics of low-noise rod support mechanism / B. Ch. Meskhi, T. A. Finochenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2009. – No. 4. – P. 27–30. – ISSN 0201-727X.

10 Characteristics of noise discomfort in the working area of bar turning machines / S. A. Razdorsky, T. A. Finochenko, A. N. Chukarin, I. A. Yaitsov // Monitoring. Science and Technology. – 2018. – No. 3 (36). – P. 81–84. – EDN YCMIFF.

S. P. Ryzhov

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF GEAR-SHAPING MACHINE NOISE

Abstract. The article presents the results of experimental studies of noise and vibration spectra that occur in gear-shaping machines during their industrial operation under various process loads. Depending on the technical parameters specifications of these machines, during the execution of work according to the process regulations, the sources that create increased noise levels are identified, namely the cutter and the workpiece, while the influence of the frame can be ignored. This is confirmed by theoretical conclusions about the patterns of formation of vibroacoustic characteristics of gear-shaping machines. Based on the conducted studies, it was possible to identify the key factors that affect the magnitude of noise and vibration in gear-shaping machines. First of all, these are the design features of the cutter and the workpiece material. Various geometric parameters of the cutter, such as sharpening angle, shape and degree of sharpening, significantly change the pattern of vibration distribution during the cutting process. Moreover, materials with a higher modulus of elasticity and density contribute to an increase in the overall vibration amplitude, which is reflected in the noise spectrum.

Keywords: experimental studies, sound levels, octave levels of sound pressure and vibrations, gear shaping machines.

For citation: Ryzhov, S. P. Experimental studies of the spectral composition of gear shaping machine noise / S. P. Ryzhov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 4. – P. 41–48. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_41.

Сведения об авторах

Рыжов Сергей Петрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
соискатель,
e-mail: ryzhov_2014@mail.ru

Information about the authors

Ryzhov Sergey Petrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Life Safety»,
The Degree Applicant,
e-mail: ryzhov_2014@mail.ru

И. В. Колесников, В. В. Шаповалов, О. И. Коваленко, К. Н. Политыко, И. А. Колодяжный

НАНЕСЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ PVD-ПОКРЫТИЙ НА ФРИКЦИОННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ШЕСТЕРЕН И МУФТ-ШЕСТЕРЕН ПЕРСПЕКТИВНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ *

Аннотация. Рассмотрена перспективная силовая автоматическая трансмиссия, разработанная учеными РГУПС. В устройстве данной автоматической коробки переключения передач (АКПП) используется оригинальная, не имеющая аналогов муфта-шестерня, используемая в качестве фрикционного усилительного звена. Ввиду отсутствия разрывов потока передаваемой с помощью данной муфты-шестерни мощности и, как следствие, увеличения скорости включения передач удалось увеличить коэффициент полезного действия АКПП. В процессе длительной эксплуатации компоненты и детали данного агрегата, в частности шестерни, подвергаются износу. Одним из способов повышения их износостойкости является нанесение вакуумных покрытий, защищающих поверхности от их интенсивного изнашивания. Для реализации данной задачи методом магнетронного распыления получено высокоэнтропийное покрытие CuCrMnFeCoNi на подложке из стали 40XH2MA, обладающее однородной структурой и плотным прилеганием к подложке. Трибологические исследования позволили установить низкий коэффициент трения $\mu = 0,12$, который значительно ниже значений подложки из стали. Разработанное покрытие позволит уменьшить коэффициент трения и износ муфты-шестерни.

Ключевые слова: трибология, автоматическая коробка переключения передач, шестерня, муфта-шестерня, фрикционное усилительное звено, КПД, механические и трибологические свойства, PVD, ВЭС, покрытие, магнетрон.

Для цитирования: Нанесение износостойких PVD-покрытий на фрикционные поверхности шестерен и муфт-шестерен перспективной автоматической коробки передач / И. В. Колесников, В. В. Шаповалов, О. И. Коваленко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 49–59. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_49.

Введение и постановка задачи

В современном мире автоматические трансмиссии получили достаточно широкое распространение. Сегодня, согласно статистике продаж новых автомобилей, доля автомашин, оснащенных различного типа автоматическими коробками перемены передач (АКПП), значительно превышает количество автомобилей, оснащенных механическими трансмиссиями.

Автоматические коробки передач бывают различных видов, самые распространенные из них – гидромеханические коробки передач, роботизированные КПП, вариаторы различных типов, секвентальные коробки и др. Помимо очевидных преимуществ, все они не лишены ряда недостатков. Например, гидромеханическая коробка передач имеет минусы в виде низкой скорости переключения передач по сравнению с роботизированной, но в то же время она надежна за счет своей относительно простой конструкции и имеет большой ресурс. Роботизированная коробка переключения передач (РКПП) с двумя сцеплениями состоит из двух объединенных механических коробок передач в одном корпусе. Данный агрегат технологичен, обладает высокой скоростью смены передач, компактными размерами и позволяет экономить топливо. Однако у его управляющего блока – мехатроника – случаются отказы и поломки; кроме того, особенностью устройства РКПП является узел сцеплений, который со временем изнашивается и требует замены, в отличие от гидромеханической АКПП [1–3]. Коробки передач с вариаторами CVT также имели свои изъяны в виде некорректного софта, что приводило к интенсивному износу конусов и ремней. Также рано выходили из строя подшипники первичного и вторичного валов, и только в процессе многочисленных ревизий они обрели повышенную надежность.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30007).

Сегодня массовую популярность начали получать трансмиссии с гибридным приводом, имеющие в своей конструкции электродвигатель, который позволяет автомобилю передвигаться исключительно на электротяге или же в комбинированном – гибридном режиме, когда транспортное средство приводится в движение тандемом двигателя внутреннего сгорания (ДВС), работающего на органическом топливе, и электромотора, запитанного от батареи. Иными словами, эволюция коробок передач не стоит на месте, а работа над их усовершенствованием ведется и сегодня.

Специалистами РГУПС в рамках программы по импортозамещению был разработан прототип отечественной коробки передач, в конструкции которой применены не имеющие аналогов инновационные муфты-шестерни, являющиеся одними из ключевых компонентов данного агрегата и выполняющие роль фрикционного усилительного звена (ФУЗ) [4].

Схема и 3D-модель муфты-шестерни для быстроходных мобильных технических систем (легковых автомобилей, путевых машин) приведены на рис. 1.

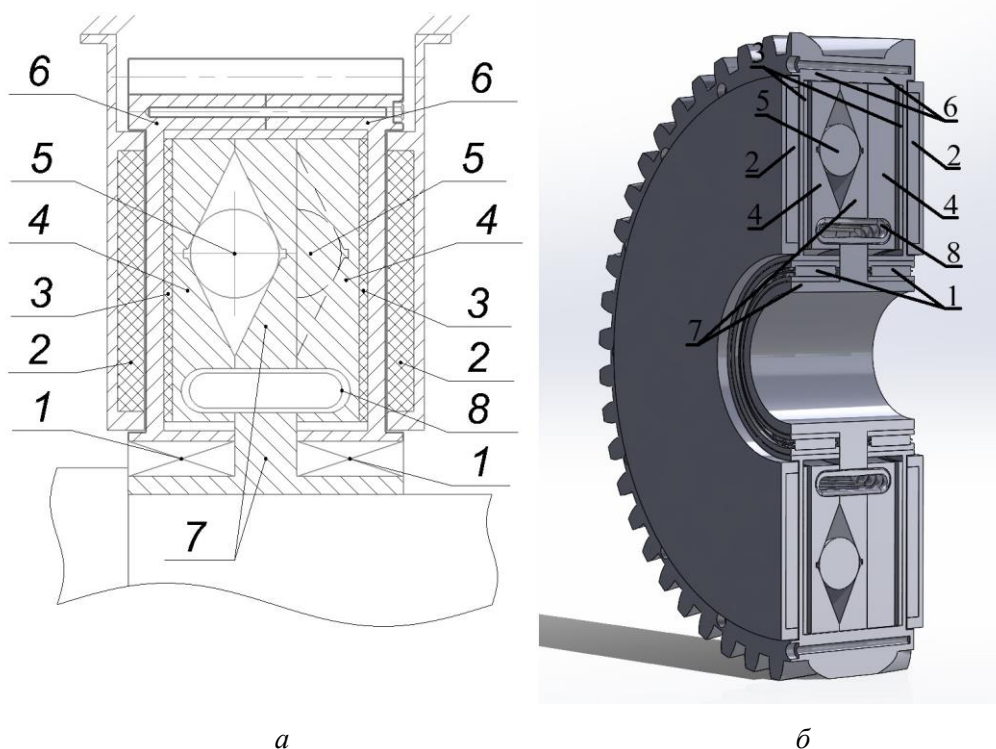


Рис. 1. Схема (а) и 3D-модель (б) муфты-шестерни для быстроходных МТС, созданная в программе Solidworks:

- 1 – игольчатые подшипники; 2 – электромагниты; 3 – стальные диски с металлокерамическими накладками; 4 – ведомые диски включения; 5 – тело качения; б – двухсоставной корпус;
7 – ведущий диск включения; 8 – гаситель крутильных колебаний

Концепция работы данного фрикционного усилительного звена для быстроходных мобильных технических систем реализована следующим образом: осуществляется подача антирезонансного напряжения на электромагниты 2, расположенные на боковых гранях механизма, те, в свою очередь, начинают притягивать ведомые диски включения 4 по направлению к двухсоставному корпусу б муфты-шестерни [5]. При вступлении во фрикционный контакт стальных дисков с металлокерамическими накладками 3, расположенными на внутренних стенках двухсоставного корпуса б муфты-шестерни, ведомые диски включения 4 передают крутящий момент на двухсоставной корпус б от ведущего диска включения 7, закрепленного на валу, посредством скатывающего усилия. При подаче резонансного напряжения на электромагниты 2 стальные ведомые диски включения 4 отсоединяются от стальных дисков с металлокерамическими накладками 3, а затем возвращаются в исходное положение.

В основе конструкции перспективной трансмиссии лежит двухвальная схема с шестью передачами (рис. 2): на ведущем валу для первых трех передач используются стандартные шестерни, а на ведомом валу применяются оригинальные муфты-шестерни. На последующих, высших передачах, наоборот, на ведущем валу задействуются муфты-шестерни, а на ведомом – обыкновенные шестерни. Такое

конструктивное решение применено для равномерного распределения нагрузки на агрегат и его сбалансированности. Его устройство реализовано таким образом, что во время включения первой передачи уже подготовлена к работе вторая, после активации второй ступени готова к включению третья передача и т. д. Важнейшим условием для выбора варианта шестерней и зубчатых колес для работы коробок передач, имеющих высокий КПД, является их вид, а также тип их зацепления. Наиболее оптимальным вариантом по эффективности работы и затратам в производстве является косозубая механическая передача с зацеплением Новикова [5, 6]. Это обусловлено тем, что данный тип зацепления снижает уровень шума, обладает более высокой нагрузочной способностью по контактным напряжениям и имеет большие передаточные числа.

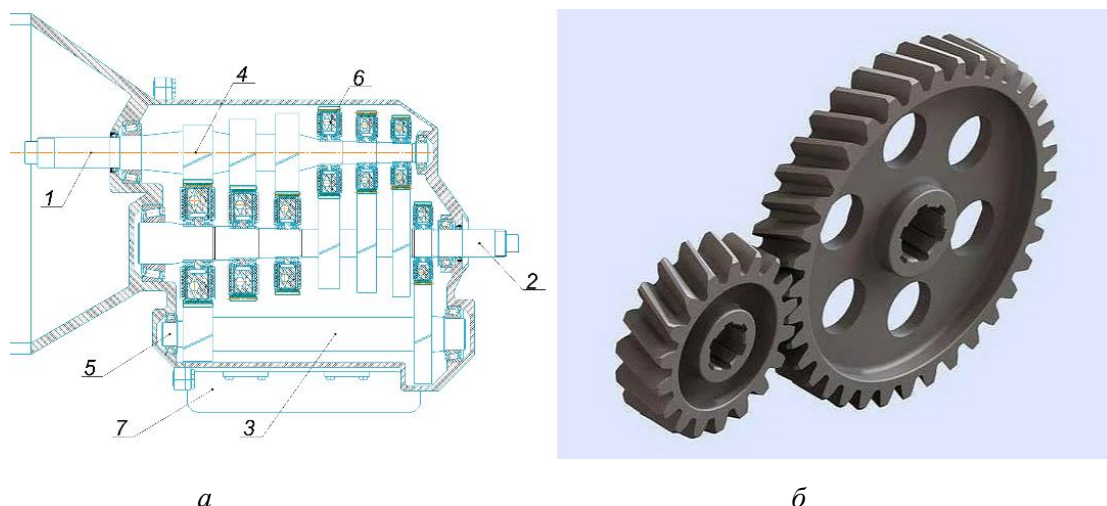


Рис. 2. Перспективная шестиступенчатая автоматическая коробка передач:

а – схема АКПП: 1 – ведущий вал; 2 – ведомый вал; 3 – вал задней передачи; 4 – косозубая шестерня; 5 – подшипник; 6 – зеркальная муфта-шестерня, 7 – электронный блок управления;
б – зубчатое зацепление косозубых шестерен

Динамические нагрузки на КПП возможно снизить с помощью включения последующей передачи, которая вращается и предварительно подготовлена к включению, тем самым подтверждая минимальный разрыв потока передаваемой мощности [5].

Для компонентов всех типов коробок передач, особенно таких, как шестерни и планетарные передачи, равно как и для других различных узлов трения, очень важны следующие параметры: качество смазочной композиции – в составе присутствует только базовое масло и пакет присадок, совместимость трансмиссионной жидкости с данным агрегатом ввиду прямого влияния на его безотказность, долговечность и ресурс.

Механические и автоматические коробки передач требуют замены масла через каждые 50 000–60 000 км. Для автоматических коробок передач, как и в нашем перспективном агрегате, используется масло с вязкостью по SAE 75W-85 и уровнем качества API GL-4. Важными составляющими в химическом составе трансмиссионной жидкости являются присадки, добавляемые к базовому маслу, которые позволяют повысить антикоррозийные свойства, снизить пенообразование, расширить температурный режим работы коробки передач и т. д. Применение масел GL-4 актуально для роботизированных коробок передач, поскольку в них в качестве противозадирных присадок используются компоненты на основе серы и фосфора. Такие добавки в определенных количествах предназначены для предотвращения появления эффекта микросваривания контактирующих поверхностей при точечных высоких температурах, возникающих в условиях экстремальных нагрузок. Этот эффект встречается в парах трения, где нагрузки значительно выше из-за малого пятна контакта рабочих поверхностей.

В то же время присадки, включающие такие элементы, как сера и фосфор, в зависимости от их процентного содержания в маслах могут оказывать негативное влияние: окислять детали из бронзы, меди или их сплавов. Такое воздействие может иметь катастрофические последствия для колец синхронизаторов в коробках передач.

В разных типах трансмиссий применяются шестерни, изготавливаемые из углеродистых сталей 40, 45, 50, 55, а также легированных сталей марок 40X, 45X, 40XН, 30XГТ, 40XФА, 55Г и др. [7], и, безусловно, их износ через определенный срок эксплуатации неизбежен. Важной задачей в обеспечении

должной надежности коробок передач является продление срока эксплуатации их шестерен и планетарных рядов, а также снижение износа данных компонентов. Для этого мы предлагаем повысить твердость зубьев шестерен методом нанесения вакуумного высокоэнтروпийного покрытия системы CuCrMnFeCoNi в режиме магнетронного распыления, это актуально для современных существующих автоматических коробок передач, в том числе и для перспективной, описанной выше конструкции (см. рис. 2). Такой способ позволит увеличить долговечность и повысить надежность предлагаемой АКПП.

Материалы и методы исследования

Для формирования высокоэнтропийного покрытия CuCrMnFeCoNi в качестве базовой была выбрана система Co-Cr-Fe-Mn-Ni [8] в виде многокомпонентного твердого раствора. Из бинарных диаграмм компонентов данной системы следует, что система Co-Cr-Fe-Mn-Ni обладает широкой областью неограниченных твердых растворов в подавляющем большинстве ее бинарных подсистем: Fe-Co, Co-Ni, Fe-Ni, Co-Mn, Fe-Mn, Cr-Mn, Cr-Fe, Cr-Ni. Также данная система является однофазной и характеризуется заметной микроструктурной стабильностью в течение длительного времени [9]. Отметим, что все элементы системы Cr-Mn-Fe-Co-Ni расположены рядом в таблице Д. И. Менделеева, в одном ее периоде. Такое расположение позволяет прогнозировать образование общей кристаллической решетки твердого раствора. Чтобы система была высокоэнтропийной, она должна соответствовать пяти критериям, выполнение которых характеризует сплав как высокоэнтропийный. К ним относятся энтропия смешения $\Delta S_{\text{mix}} \geq 5$, разница атомных размеров (атомных радиусов) компонентов δ , энтальпия смешения ΔH_{mix} , разница электроотрицательности компонентов $\Delta \chi$, концентрация валентных электронов – *VEK*. Система может быть отнесена к классу высокоэнтропийных, если она удовлетворяет следующим значениям: $0 \leq \delta \leq 8,5 \%$; $7 \leq \Delta H_{\text{mix}} \leq 22$ кДж/моль; $11 \leq \Delta S_{\text{mix}} \leq 19,5$ Дж/(К·моль) [10–12]. Добавление Cu в данную систему обусловлено не только повышением $\Delta S_{\text{mix}} = 14,9$ Дж/(К·моль), но и снижением коэффициента трения покрытия.

Нанесение высокоэнтропийного покрытия CuCrMnFeCoNi производилось методом магнетронного распыления на вакуумной установке BRV600, разработанной и смоделированной научным коллективом РГУПС. Уникальность данной установки заключается в универсальном подходе выполнения программ нанесения покрытий разными методами PVD и их чередованием без выемки образцов из рабочей камеры, что существенно повышает качество наносимых покрытий из-за отсутствия влияния внешней среды. Магнетронное напыление покрытий CuCrMnFeCoNi проводилось при низкой температуре (~250 °С), которая совпадает с температурой отпуска закаленной стали 40ХН2МА (образцы с мартенситной структурой), поэтому для этого типа покрытий нивелирование структуры образцов подложки не происходит и влияние подложки в образцах с сорбитной структурой и мартенситной структурой остается актуальным вопросом.

В качестве подложек использованы полированные образцы (не ниже 10-го класса чистоты с $R_a \leq 0,12$ мкм и $R_z \leq 0,6$ мкм по ГОСТ 2789-73¹) из конструкционной низколегированной стали 40ХН2МА в виде пластины с размерами 50×30×5 мм. Физико-механические характеристики использованных образцов-подложек из стали 40ХН2МА составляли после закалки и высокого отпуска (структура сорбита) следующие значения: $H = 2,5$ ГПа, $E = 200$ ГПа, $H/E = 0,0125$, $H^3/E^2 = 0,00039$ ГПа; после закалки и низкого отпуска (структура мартенсита): $H = 5,2$ ГПа, $E = 200$ ГПа, $H/E = 0,026$, $H^3/E^2 = 0,00352$. Существенная разница в физико-механических свойствах покрытия и подложки может негативно сказываться на адгезии покрытий, поэтому для увеличения адгезии на границе «подложка – покрытие» перед нанесением основного состава покрытия был осажден подслоем Cr с помощью вакуумно-дугового метода осаждения покрытий.

Перед стадией нанесения покрытия поверхность образцов подвергалась ионному травлению, которое проводилось с помощью встроенного ионного источника ионами Ar^+ при давлении в камере ~0,7 Па, температуре ~400 °С и опорного напряжении 1000 В в течение 10 мин [13].

Для аттестации толщины, микроструктуры и состава нанесенных покрытий был использован электронный микроскоп Zeiss EVA MA 18, оснащенный энергодисперсионным анализатором X-Max 50 [14].

Физико-механические свойства определялись с помощью NanoTest 600 по ГОСТ 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) по методу непрерывного индентирования определяли модуль упругости E и твердость H , индекс упругости H/E и индекс пластичности H^3/E^2 [14, 15]

Трибологические испытания покрытий проводились на машине трения TRB (Anton Paar Tritec) в соответствии с методиками DIN 50324 и ASTM G99 [16, 17] по схеме испытаний «шар – диск», профиль

¹ ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 8 с. – URL: <http://www.omegаметалл.ru/Data2/1/4294847/4294847701.pdf>

лунки износа определяли при помощи оптического профилометра Zygo NewView 600. Контрольный образец представлял собой шар из оксида алюминия (Al_2O_3) диаметром 6 мм. Приведенное оборудование и измерительные методики позволяют определять такие трибологические параметры, как коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца J , а также длину пути (дорожки трения) L , пройденного образцом до разрушения покрытия и измеряемого в метрах [14].

Результаты и их обсуждение

Для определения толщины, элементного состава и качества покрытия CuCrMnFeCoNi был использован метод энергодисперсионного анализа (EDAX), результаты исследований представлены на рис. 3.

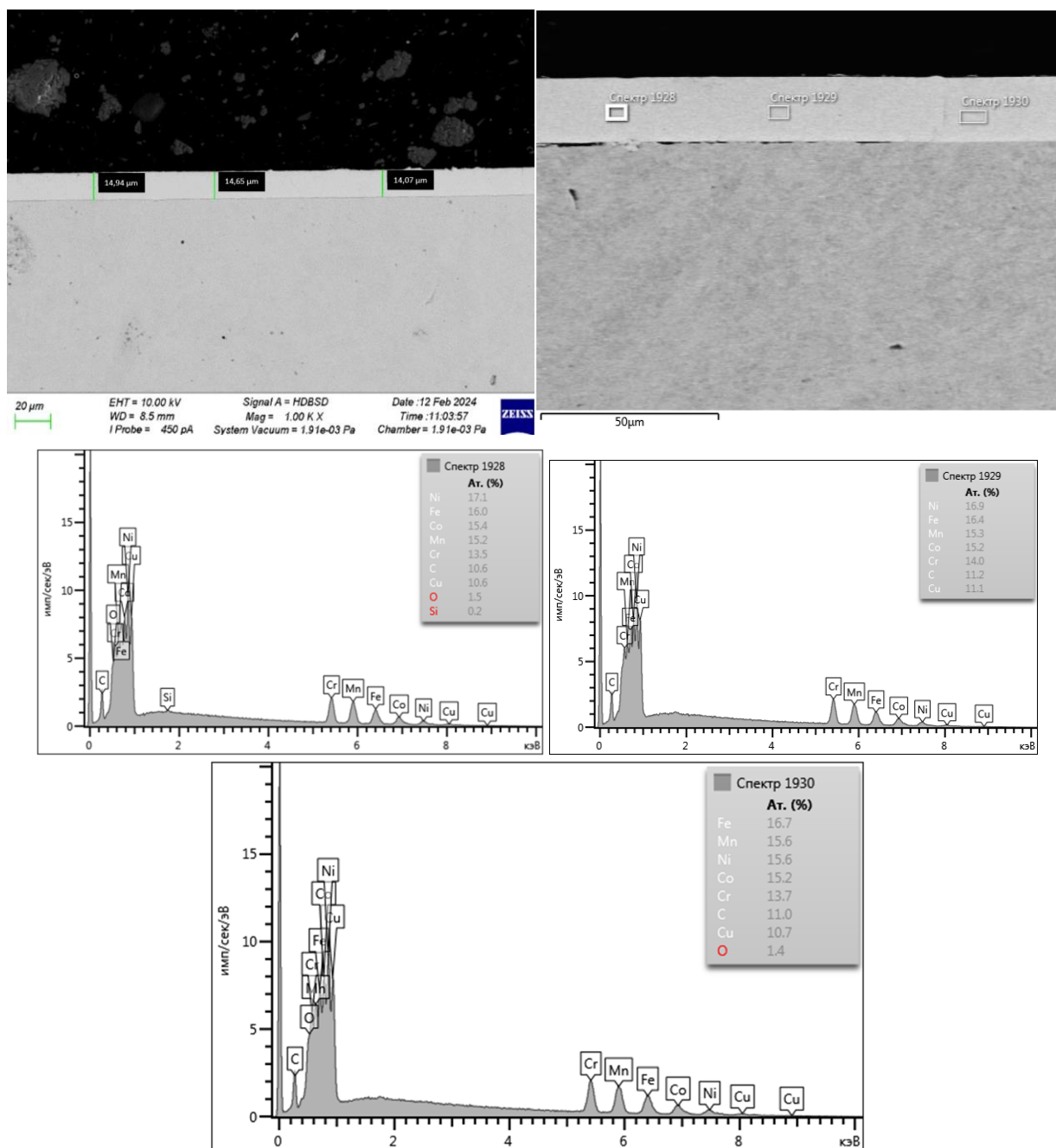


Рис. 3. Структура покрытия CuCrMnFeCoNi в поперечном сечении и энергетические спектры его элементов по результатам EDAX-анализа

По итогам анализа рис. 3, можно сделать вывод, что полученное покрытие характеризуется однородной структурой и плотным прилеганием к подложке, что может говорить о высокой адгезии покрытия с подложкой. Толщина покрытия от 14 до 14,9 мкм позволяет определить его элементный состав и сделать вывод о том, что химический состав покрытия соответствует составу мишени. Магнетронный метод распыления позволил регулировать толщину покрытия и получить образцы с толщиной от 11 до 19 мкм при времени нанесения 6–7 часов. Данный фактор очень важен, так как при нанесении данной системы на муфту-шестерню требуется учитывать допуски, указанные в конструкторской документации. Скорость формирования покрытия при использовании магнетронного метода составила $a_D = 0,031 \dots 0,045$ мкм/мин.

По результатам выполненного энергодисперсионного анализа (EDAX) средневзвешенная атомная концентрация элементов c_i в покрытии составила 11, 14, 15, 16, 15 и 17 ат. % для Cu, Cr, Mn, Fe, Co, Ni соответственно. Данное элементное содержание компонентов принято по умолчанию в качестве ориентировочного состава изучаемых высокоэнтропийных покрытий, то есть далее по умолчанию рассматривается покрытие $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$. Полученный состав выделяется минимальным расхождением атомной концентрации элементов c_i , что способствует увеличению энтропии смешения S_{mix} , уменьшению разницы атомных размеров δ и в конечном итоге значительно увеличивает вероятность образования твердого раствора.

Для определения физико-механических свойств покрытия $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ изначально требовалось убедиться в отсутствии влияния подложки на измеряемую твердость H и модуль упругости E . Для этого были проведены измерения с различной нагрузкой, чтобы определить максимальную глубину проникновения индентора. По результатам наноиндентирования была получена кривая зависимости глубины проникновения индентора от нагрузки, приведенная на рис. 4.

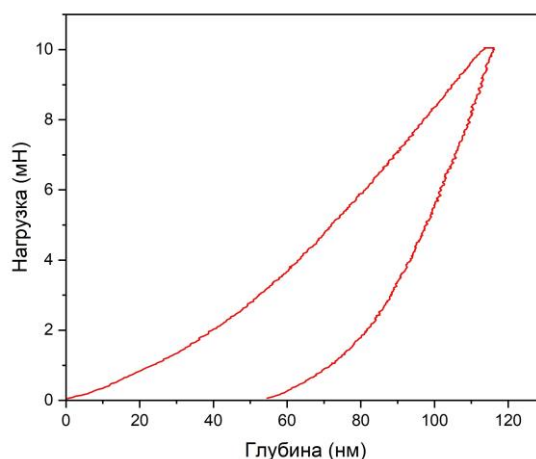


Рис. 4. Зависимость глубины внедрения индентора от прилагаемой нагрузки при индентировании покрытий

Из рис. 4 видно, что глубина погружения индентора при максимальной нагрузке 10 мН составила 115 нм, данное значение глубины значительно ниже толщины покрытия (14...14,9 мкм). Твердость покрытия составила 8,41 ГПа. Полученные результаты позволили рассчитать сопротивление упругой H/E и пластической деформаций H^3/E^2 .

Полученные значения физико-механических свойств покрытия $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ были сравнены с характеристиками подложки с сорбитной и мартенситной структурой, которые представлены в нижеприведенной таблице.

Физико-механические свойства подложки и покрытия

Объект исследования	H , ГПа	E , ГПа	H/E	H^3/E^2 , ГПа
40ХН2МА сорбитная структура	2,5	200	0,0125	0,00039
40ХН2МА мартенситная структура	5,2	200	0,026	0,00352
$\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$	8,41	194,3	0,043	0,0158

Приведенные в таблице результаты анализа физико-механических свойств покрытий системы $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ отражают усредненные значения H и E для всех образцов, полученных на подложке с сорбитной и мартенситной структурой, что свидетельствует об отсутствии влияния подложки на физико-механические свойства покрытия. Из анализа таблицы можно сделать вывод, что покрытие $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ значительно повысило физико-механические свойства образцов: с сорбитной структурой H и H/E в $\sim 3,5$ раза, а H^3/E^2 в $\sim 40,5$ раза. Отметим, что в обоих случаях модуль упругости находится примерно на одном уровне с подложкой. Физико-механические характеристики покрытия $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ на подложке с мартенситной структурой находятся примерно на одном уровне с подложкой, но с незначительным увеличением твердости, что способствует увеличению H/E (в $\sim 1,5$ раза) и H^3/E^2 (в $\sim 2,5$ раза).

С целью унификации трибологических результатов условия проведения испытаний определялись при фиксированных значениях параметров для системы $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$: скорость скольжения $v = 1$ мм/с; путь трения (пробег) при радиальном движении по окружности $L = 1,8$ м; нормальное усилие на штифте (нагрузка) $N = 5$ Н. На рис. 5 изображен профиль поверхности образцов после трибологических испытаний, а также приведен график зависимости коэффициента трения от времени испытания, глубины дорожки.

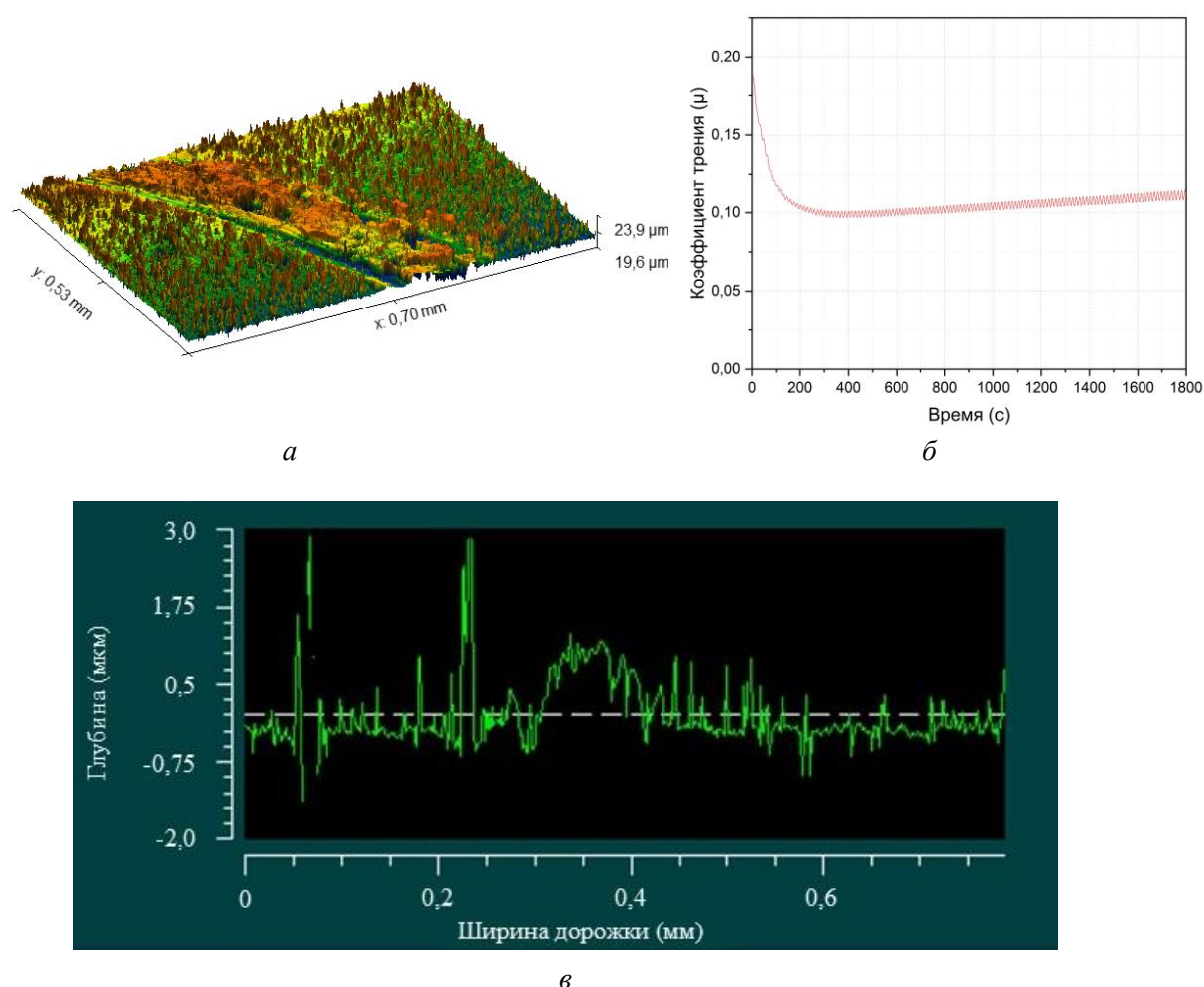


Рис. 5. Профиль поверхности образцов после трибологических испытаний (а), график зависимости коэффициента трения (б), глубина дорожки трения (в)

Из рис. 5, б видно, что покрытие $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ на начальном этапе исследования имеет коэффициент трения $\mu = 0,18$. Это связано с образованием колебаний из-за неровностей поверхности покрытия, данный факт, можно отметить на рис. 5, а. Также по графику на рис. 5, б можно наблюдать, что неровности в течение 300 секунд устранились за счет приработки. Далее в ходе всего испытания коэффициент трения был стабилен, медленно увеличиваясь к концу испытания до значения $\mu = 0,12$, что значительно ниже значений последнего для подложки из стали 40ХН2МА – $\mu \approx 0,6...0,8$. На рис. 5, а

видно, что при испытании произошло образование дорожки трения, но в заданных условиях испытания износ покрытий связан только с приработкой поверхности покрытия с контробразцом. Особенно это заметно на рис. 5, в, который объясняет колебания коэффициента трения на рис. 5, б в течение всего времени исследования за счет неровности дорожки трения без явного выделенного минимума по глубине. В связи с этим не представляется возможным установить интенсивность износа J , поэтому значение величины износа в данной работе не приводится. Полученные результаты позволяют провести дальнейшие трибологические исследования с увеличением нагрузочно-скоростных характеристик, приближенных к эксплуатационным условиям.

Заключение

Подводя итоги настоящему исследованию, можно проследить тенденцию активного внедрения современных типов автоматических трансмиссий, появление различных гибридных схем с использованием электродвигателей, которые интегрируются в картеры коробок передач. Такие решения, применяемые конструкторами в автомобилестроении, производстве техники специального назначения и путевых машин, необходимы для повышения экономичности расхода топлива и производительности силовых установок, а также для снижения выбросов углеводородов.

В конструкции предлагаемой нами современной коробки передач применена муфта-шестерня – оригинальное фрикционное усилительное звено, являющееся одним из ключевых компонентов перспективного агрегата, благодаря которому повышается оперативность включения передач, увеличивается КПД данной трансмиссии. Несомненным риском в процессе эксплуатации такого агрегата, как автоматическая коробка передач, является износ его компонентов, в частности шестерен. Фрикционные рабочие поверхности шестерен и муфт-шестерен изнашиваются в ходе длительной эксплуатации или несвоевременного обслуживания коробок передач: их зубья стираются, выкрашиваются, обламываются. В связи с этим для обеспечения длительного ресурса автоматической коробки передач предлагается нанесение износостойких вакуумных покрытий на ее рабочие поверхности. Примером такого покрытия может быть $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$.

Исследованное покрытие $\text{Cu}_{0,11}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,15}\text{Fe}_{0,16}\text{Co}_{0,15}\text{Ni}_{0,17}$ полученное на подложке 40ХН2МА с сорбитной и мартенситной структурой, позволяет сделать следующие выводы:

1 Применение магнетронного метода распыления позволило получить покрытие с высокой адгезией, толщиной от 14 до 14,9 мкм.

2 Результаты исследования физико-механических свойств свидетельствуют об увеличении H и H/E в $\sim 3,5$ раза, а сопротивления пластической деформации в $\sim 40,5$ раза для образца с сорбитной структурой. Для образца с мартенситной структурой физико-механические характеристики находятся примерно на одном уровне с подложкой, но с незначительным увеличением твердости, что способствует повышению сопротивления упругой (в $\sim 1,5$ раза) и пластической (в $\sim 2,5$ раза) деформациям. Отметим, что в обоих случаях модуль упругости был на одном уровне с подложкой.

3 Трибологические испытания установили, что покрытия $\text{Cu}_{0,13}\text{Cr}_{0,14}\text{Mn}_{0,16}\text{Fe}_{0,18}\text{Co}_{0,17}\text{Ni}_{0,19}$ имеют достаточно низкие значения коэффициента трения $\mu = 0,1 \dots 0,12$, что значительно ниже значений последнего для подложки из стали 40ХН2МА – $\mu \approx 0,6 \dots 0,8$. В ходе проведенных испытаний не удалось установить величину износа J , что позволяет провести дальнейшие трибологические исследования с увеличением нагрузочно-скоростных характеристик, приближенных к эксплуатационным условиям.

Список литературы

- 1 **Петров, А. П.** Современные конструкции автоматических коробок передач / А. П. Петров ; Курганский государственный университет. – Курган : КГУ, 2015. – 80 с. – ISBN 978-5-4217-0333-4.
- 2 **Харитонов, С. А.** Автоматические коробки передач / С. А. Харитонов. – Москва : Астрель, 2003. – 335 с. – ISBN 5-170-17670-8.
- 3 Коробка передач. Устройство, принцип работы и разновидности коробки передач DSG // ТехАвтоПорт. Про автомобили. В деталях. – 2024. – URL: <https://techautoport.ru/transmissiya/korobka>

References

- 1 **Petrov, A. P.** Modern designs of automatic transmissions / A. P. Petrov ; Kurgan State University. – Kurgan : KSU, 2015. – 80 p. – ISBN 978-5-4217-0333-4.
- 2 **Kharitonov, S. A.** Automatic transmissions / S. A. Kharitonov. – Moscow : Astrel Publishing House, 2003. – 335 p. – ISBN 5-170-17670-8.
- 3 Transmission. Design, principle of operation and types of DSG gearbox // TechAutoPort. About cars.

peredach/korobka-peredach-dsg.html (дата обращения: 25.08.2024).

4 Патент № 2674899 РФ, МПК F16D 65/00 (2006.01). Способ повышения эффективности фрикционных систем / В. В. Шаповалов, М. М. Шестаков, Р. А. Корниенко [и др.]; заявитель В. В. Шаповалов. – № 2016128401; заявл. 12.07.2016; опубл. 13.12.2018, Бюл. № 35. – 20 с.

5 Повышение эффективности закрытых узлов трения / В. В. Шаповалов, Т. Л. Саямова, Д. А. Рябыш [и др.] // Механика и трибология транспортных систем : сборник статей международной научной конференции.. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 166–170. – ISBN 978-5-907295-52-0.

6 ГОСТ 17744-72. Библиографическая запись. Библиографическое описание : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден Государственным комитетом стандартов Совета Министров СССР 7 апреля 1972 г. (протокол № 41), введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 24 мая 1972 г. № 1057 – Москва : Издательство стандартов, 1972. – 19 с.
7 Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский, Ю. И. Астахов [и др.]. – Москва : Машиностроение-1, 2003. – 780 с.

8 Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / З. Б. Батаева, А. А. Руктуев, И. В. Иванов [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 116–146. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.

9 Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I. Chang, P. Knight, A. J. B. Vincent // Materials Science and Engineering A. – 2023. – Vol. A375-377. – P. 213–218. – DOI 10.1016/j.msea.2003.10.257.

10 Yeh, J. W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys / J. W. Yeh // JOM : the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2013. – No. 65. – P. 1759–1771. – DOI 10.1007/s11837-013-0761-6.

11 Miedema Calculator : A thermodynamic platform for predicting formation enthalpies of alloys within framework of Miedema's Theory / R. F. Zhang, S. H. Zhang, Z. J. He [at al.] // Computer Physics Communications. – 2016. – Vol. 209. – P. 58–69. – DOI 10.1016/j.cpc.2016.08.013.

In detail. – 2024. – URL: <https://techautoport.ru/transmissiya/korobka-peredach/korobka-peredach-dsg.html> (date of access: 08/25/2008).

4 Patent No. 2674899 Russian Federation, IPC F16D 65/00 (2006.01). A way to improve the efficiency of friction systems / V. V. Shapovalov, M. M. Shestakov, R. A. Kornienko [et al.]; applicant V. V. Shapovalov. – No. 2016128401; decl. 07/12/2016; publ. 12/13/2018, Bull. No. 35. – 20 p.

5 Increasing the efficiency of closed friction units / V. V. Shapovalov, T. L. Sayamova, D. A. Ryabish [et al.] // Mechanics and tribology of transport systems : collection of articles of the international scientific conference. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 166–170. – ISBN 978-5-907295-52-0.

6 GOST 17744-72. Bibliographic record. Bibliographic description : state standard of the USSR : official publication : approved by the State Committee of Standards of the Council of Ministers of the USSR on April 7, 1972 (protocol No. 41), introduced into action by the Resolution of the State Standards Committee of the Council of Ministers of the USSR dated May 24, 1972 No. 1057 – Moscow : Standards Publishing House, 1972. – 19 p.

7 Brand book of steels and alloys / A. S. Zubchenko, M. M. Koloskov, Yu. V. Kashirsky, Yu. I. Astakhov [at al.]. – Moscow : Mashinostroyeniye-1, 2003. – 780 p.

8 A review of studies of alloys developed on the basis of the entropy approach / Z. B. Bataeva, A. A. Ruktuev, I. V. Ivanov [at al.] // Metal processing (technology, equipment, tools). – 2021. – Vol. 23, No. 2. – P. 116–146. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.

9 Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys / B. Cantor, I. Chang, P. Knight, A. J. B. Vincent // Materials Science and Engineering A. – 2023. – Vol. A375-377. – P. 213–218. – DOI 10.1016/j.msea.2003.10.257.

10 Yeh, J. W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys / J. W. Yeh // JOM : the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2013. – No. 65. – P. 1759–1771. – DOI 10.1007/s11837-013-0761-6.

11 Miedema Calculator : A thermodynamic platform for predicting formation enthalpies of alloys within framework of Miedema's Theory / R. F. Zhang, S. H. Zhang, Z. J. He [at al.] // Computer Physics Communications. – 2016. – Vol. 209. – P. 58–69. – DOI 10.1016/j.cpc.2016.08.013.

12 Многокомпонентные и высокоэнтропийные сплавы и нитридные покрытия на их основе / А. Д. Погребняк, Ф. Ф. Комаров, В. М. Береснев [и др.] ; Москва : ЛЕНАНД, 2021. – 336 с. – ISBN 978-5-97108-872-1.

3 Покрытия DLC, стабилизированные азотом: оптимизация свойств и режимов нанесения с использованием алгоритмов рандомизированных деревьев и нейронных сетей / А. И. Воропаев, В. И. Колесников, О. В. Кудряков [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

14 **Политыко, К. Н.** Формирование PVD-покрытий для трибологического назначения / К. Н. Политыко, Д. С. Мантуров // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 81–93. –ISSN 1818-5509.

15 **Головин, Ю. И.** Наноиндентирование и его возможности / Ю. И. Головин. – Москва : Машиностроение, 2009. – 312 с. – ISBN 978-5-94275-476-1 (в пер.).

16 IN 50324-1992. Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system) [Тела твердые. Модельные испытания на трение и износ при трении скольжения] : международный (зарубежный) стандарт. ISO 17.040.20. Properties of surfaces [Свойства поверхностей]. Дата опубликования 01.07.1992. Язык оригинала : немецкий. – 6 с. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (дата обращения: 23.10.2024).

17 ASTM G99-17. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (дата обращения: 23.10.2024).

12 Multicomponent and high-entropy alloys and nitride coatings based on them / A.D. Pogrebnyak, F. F. Komarov, V. M. Beresnev [et al.] – Moscow : LENAND, 2021. – 336 p. – ISBN 978-5-97108-872-1.

13 DLC coatings stabilized with nitrogen: optimization of application properties and modes using randomized tree algorithms and neural networks / A. I. Voropaev, V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov [et al.] // Physical mesomechanics. – 2024. – Vol. 27, No. 2. – P. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X_2024_27_2_16-32.

14 **Polityko, K. N.** Formation of PVD coatings for tribological purposes / K. N. Polityko, D. S. Manturov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 81–93. –ISSN 1818-5509.

15 **Golovin, Yu. I.** Nanoindentation and its possibilities / Yu. I. Golovin. – Moscow : Mashinostroyeniye, 2009. – 312 p. – ISBN 978-5-94275-476-1 (bound).

16 IN 50324-1992 Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system) [Tela tverdye. Model'nye ispytaniya na trenie i iznos pri trenii skol'zheniya] : an international (foreign) standard. ISO 17.040.20. Properties of surfaces [Svoystva poverhnostey]. Date of publication 07/01/1992. Original language : German. – 6 p. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (date of access: 10/23/2024).

17 ASTM G99-17. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (date of access: 10/23/2024).

I. V. Kolesnikov, V. V. Shapovalov, O. I. Kovalenko, K. N. Polityko, I. A. Kolodyazhny

APPLICATION OF WEAR-RESISTANT PVD COATINGS ON THE FRICTION SURFACES OF GEARS AND GEAR COUPLINGS OF A PROMISING AUTOMATIC TRANSMISSION

Abstract. A promising power automatic transmission developed by RSTU scientists is considered. The device of this automatic transmission (AT) uses an original, unparalleled gear clutch used as a friction reinforcement link. Due to the absence of discontinuities in the flow of power transmitted using this gear coupling and, as a result, an increase in the gear speed, it was possible to increase the efficiency of the automatic transmission. During long-term operation, the components and parts of this unit wear out. One of the ways to increase their wear resistance is to apply vacuum coatings that protect surfaces from their intense wear. To achieve this task, a high-entropy CuCrMnFeCoNi coating on a 40KH2MA steel substrate was obtained by magnetron sputtering. The coating has a uniform structure and a tight fit to the substrate. Tribological studies have allowed us to establish a low coefficient of friction $\mu = 0,12$, which is significantly lower than the values of the steel substrate. Developed coating will reduce the coefficient of friction and wear of the gear coupling.

Keywords: tribology, automatic transmission, gear, coupling gear, friction reinforcement link, efficiency, mechanical and tribological properties, PVD, HEA, coating, magnetron.

For citation: Application of wear-resistant PVD coatings on the friction surfaces of gears and gear couplings of a promising automatic transmission / I. V. Kolesnikov, V. V. Shapovalov, O. I. Kovalenko [at al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 49–59. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_49.

Сведения об авторах

Колесников Игорь Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
заведующий НИЛ НиНМ НИЧ,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Шаповалов Владимир Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Транспортные машины и триботехника»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: sha.vv@bk.ru

Коваленко Олег Игоревич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Транспортные машины и триботехника»,
аспирант
e-mail: olegkovalenko2000@mail.ru

Политыко Кирилл Николаевич

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

Колодяжный Илья Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Транспортные машины и триботехника»,
аспирант,
e-mail: 1nexus2mod@gmail.com

Information about the authors

Kolesnikov Igor Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Head of Scientific Laboratory RSTU,
Corresponding Member of RAS,
Doctor of Engineering Sciences,
e-mail: oooedt@rambler.ru

Shapovalov Vladimir Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Machines and Tribotechnology»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: sha.vv@bk.ru

Kovalenko Oleg Igorevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Machines and Tribotechnology»,
Postgraduate Student,
e-mail: olegkovalenko2000@mail.ru

Polityko Kirill Nikolayevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Junior Researcher
Chair «Theoretical Mechanics»,
Postgraduate Student,
e-mail: politykokirill@yandex.ru

Kolodyazhny Ilya Alekseevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Machines and Tribotechnology»,
Postgraduate Student,
e-mail: 1nexus2mod@gmail.com

В. В. Шаповалов, Т. Л. Саямова, С. Л. Горин, Д. А. Рябыш, О. И. Коваленко

РАЗРАБОТКА ФРИКЦИОННОЙ МНОГОДИСКОВОЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ ДЛЯ ПЕРЕДВИЖНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Аннотация. Представлена разработка новой фрикционной многодисковой соединительной муфты с тремя каскадами усиления взамен импортного аналога от машиностроительного концерна Voith. Первый и третий каскады представляют собой многодисковые муфты, работающие в масле, а второй – фрикционное усилительное звено (ФУЗ) в виде двух дисков и тел качения. Данный агрегат имеет электромагнитное управление, которое приводит его в работу. Установлено, что использование трех каскадов усиления повышает прочность соединения и снижает износ деталей. За счет применения многокаскадной системы затрачивается меньшее количество энергии на включение муфты. Ее конструкция с электромагнитным управлением обеспечивает надежное соединение агрегатов.

Ключевые слова: соединительная муфта, каскад усиления, электромагнит, коэффициент усиления, коэффициент трения.

Для цитирования: Разработка фрикционной многодисковой соединительной муфты для передвижных электростанций / В. В. Шаповалов, Т. Л. Саямова, С. Л. Горин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 60–69. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_60.

Введение

Соединительные управляемые и неуправляемые муфты играют важную роль в современных механизмах и машинах, обеспечивая надежное соединение и передачу мощности.

Существует несколько типов соединительных управляемых муфт с механическим, гидравлическим, пневматическим и электрическим приводами. Каждый из этих приводов имеет свои преимущества и недостатки.

Соединительные муфты с механическим приводом обеспечивают быстрое и надежное соединение, но требуют ручного управления и в ряде случаев значительных усилий для включения. Муфты с гидравлическим приводом позволяют управлять соединением с помощью гидравлической системы, что обеспечивает более точное и плавное управление техническими системами. Муфты с пневматическим приводом используют сжатый воздух для передачи усилия, а электрические муфты управляются с помощью электрических (электромагнитных) сигналов [1, 2].

Для передачи крутящего момента между силовыми агрегатами, как правило, используются эластичные муфты – механизмы, позволяющие создавать мягкое, но надежное соединение, компенсирующее смещение валов. Такие муфты производит и немецкий концерн Voith. Они применяются для легкорельсового транспорта, очень технологичны и имеют широкую модельную линейку для разного рода задач, оснащены одним или несколькими высокоэластичными элементами, позволяющими растягивать во времени процесс соединения подключаемого агрегата [1, 2]. Соединительные муфты такой конструкции эффективны, но не могут применяться в регионах Крайнего Севера и районах с суровыми условиями климата, где сохраняются низкие температуры до -50°C .

В данной статье рассмотрена отечественная конструкция соединительной муфты для путевых машин, которая имеет в своем составе три каскада усиления и электромагнитное управление. Этот агрегат создан для замены устанавливаемых ранее иностранных муфт Voith. Отечественная муфта спроектирована с применением российских компонентов.

Описание соединительной муфты немецкой фирмы Voith

Специалистами и учеными Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС) по заказу Тихорецкого машиностроительного завода им. В.В. Воровского в соответствии с государственной программой импортозамещения разработана конструкция многодисковой фрикционной муфты, пришедшая взамен ранее поставляемому зарубежному аналогу, который импортировала немецкая фирма Voith, для передвижных электростанций. На рис. 1 представлена схема соединительной муфты машиностроительного концерна Voith, имеющая ведущую полумуфту, расположенную на кри-

вошипном валу дизельного двигателя ЯМЗ-8502.10-08, и ведомую полумуфту, соединяющую карданный вал с генератором ГС-400-Б1-440 УХЛ2. Конструкция муфты имеет упругий элемент, который представляет собой кольцо, выполненное из эластичного резинового материала, обладающего свойствами упругой деформации, с углом поворота α до 5 градусов. Такой угол деформации α позволяет растянуть во времени процесс запуска генератора, а также снизить уровень динамических нагрузок в процессе передачи крутящего момента от дизельного двигателя к генератору. Соединительная муфта предназначена для передвижных электростанций, она применяется для эксплуатации машин и механизмов, не имеющих в своём составе приводящего их в движение силового агрегата. Соединение дизельного двигателя передвижной электростанции с генератором с помощью муфты через карданный вал позволяет выполнять раздачу энергии потребителям, осуществлять работы в широком диапазоне климатических условий – от -40 до $+50$ °С, а также выдерживать различные атмосферные осадки в виде дождя и снега.

Основным недостатком соединительных муфт фирмы Voith [1] является неполное исключение возможности динамических нагрузок в определенных режимах эксплуатации, например, в условиях низких отрицательных температур. Соединительная муфта Voith имеет высокую стоимость, а также для ее эксплуатации требуется поставка импортных запасных частей. С целью повышения конкурентоспособности, снижения энергозатрат разработанная в России муфта основана на широко используемых и высоконадежных элементах: роликовых подшипниках, подобранных из стандартного размерного ряда, серийно выпускаемых дисках – стальных и с металлокерамическими фрикционными накладками, типовых шлицевых соединениях. Вышеназванные элементы прошли длительную апробацию и оптимизацию в различных механизмах и устройствах, они обладают надежными эксплуатационными характеристиками. Технология их изготовления тщательно отработана и имеет относительно невысокую себестоимость. Данные положения обеспечивают высокую надежность и низкую стоимость отечественного агрегата по сравнению с существующими вариантами соединительных муфт, в частности, немецкого концерна Voith.

В основе высокой эффективности многодисковой управляемой соединительной муфты с шарикоподшипниковым усилительным модулем лежат результаты фундаментальных исследований в области трибологии нелинейных динамических систем, разработанных учеными РГУПСа: динамической анизотропии нелинейных фрикционных связей, n -вариантного физико-математического моделирования и динамического мониторинга фрикционных нелинейных систем [3–8].

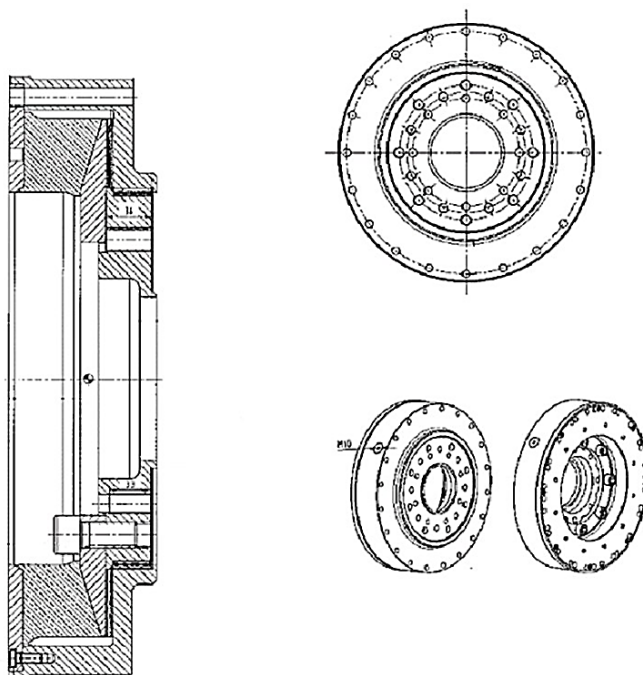


Рис. 1. Соединительная муфта немецкой фирмы Voith

Как следует из результатов многочисленных исследований, коэффициент трения является коэффициентом передачи нелинейного упруго-диссипативного звена и не может быть описан монофункцией в виде отношения средних значений силы трения и силы нормального давления [5–8]. Применение коэффициента

и ведомых, имеющих зацепление с ведущей правой крышкой. При этом ведомая полумуфта и её элементы – ведомый фланец 12, ведомый вал 13, нагружающие диски 8 и 9, а также ведомые диски многодисковой муфты 11 – неподвижны.

При включении электромагнита осуществляется запуск муфты, происходит соединение ведущих дисков муфты 10 с ведомыми и начинается вращение левого нагружающего диска 8, а следовательно, его кручение (вращение) относительно правого нагружающего диска 9. При их относительном вращении происходит смещение диска 9 вправо и включение основной многодисковой муфты 11. После создания расчётного значения усилия прижатия между ведущими и ведомыми дисками муфты 11 начинают вращаться ведомый вал 13 и фланец 12.

Устройство второго каскада усиления представлено на схеме данного усилительного звена 14. При обеспечении равенства тангенса угла наклона нагружающих поверхностей дисков 8 и 9 коэффициента трения f_2 коэффициент усиления данного звена стремится в бесконечность. Для работы данной фрикционной системы, находящейся в условиях неустойчивого равновесия, и ее включения не требуется затрат мощности. Практическое значение коэффициента усиления зависит от величины колебаний коэффициента трения f_2 , т.е. условием реализации $k_{yc} \rightarrow \infty$ является равенство $\Delta f_2 = 0$. Такое состояние системы неработоспособно, и значение $\Delta f_2 = 0$ нереально. Процессы фрикционного взаимодействия сложно и нелинейно взаимосвязаны более чем с 40 факторами, при этом значения коэффициента трения меняются от нуля до бесконечности. В связи с этим во фрикционных усилительных звеньях в целях эффективной и надежной работы предусматриваются мероприятия по управлению коэффициентами трения и их стабилизации. Фрикционно-усилительные звенья обязательно должны иметь в своем составе механизм включения.

Одним из наиболее важных моментов тягового расчета является обеспечение процесса трогания машины, ее разгона без динамических нагрузок. Для обеспечения безопасного разгона машины существуют специальные муфты [3, 8].

Фрикционное усилительное звено (рис. 3) работает следующим образом: угол α , который закладывается при проектировании нагружающего устройства, рассчитывается из условия

$$\vec{F}_{ск} \geq \vec{F}_{тр2} \quad (1)$$

или

$$N \cdot \sin \alpha \geq N \cdot f_{2 \max} \cdot \cos \alpha; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \alpha \geq f_{2 \max}. \quad (3)$$

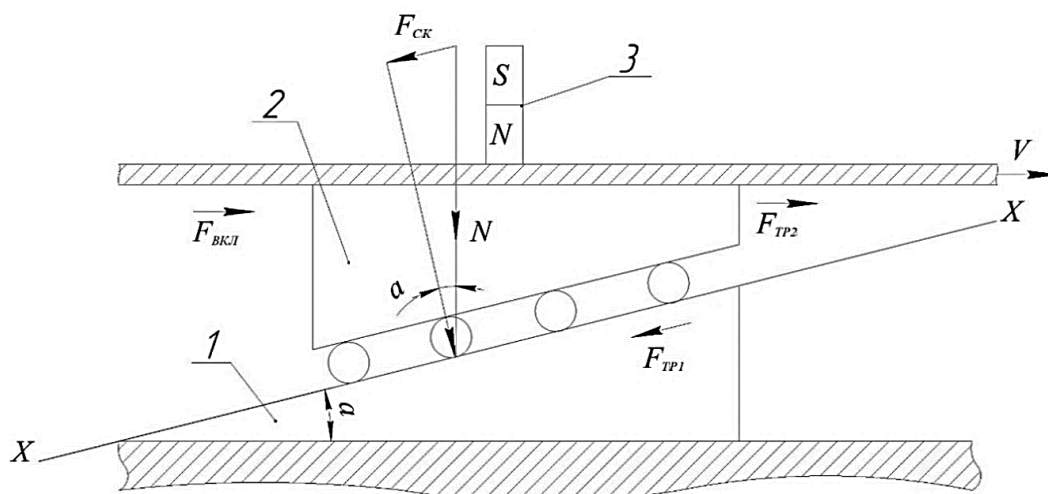


Рис. 3. Схема фрикционного усилительного звена:
1 – ведомый элемент; 2 – ведущий элемент; 3 – электромагнит

Условие (3) исключает возможность самозаклинивания элементов усилительного звена, т.е. неуправляемое включение муфты. В данном режиме (3) муфта отключена. Для включения соединительной

муфты необходимо включить электромагнит 3 (см. рис. 3) и получить соответствующее выражение, при котором муфта включена:

$$\vec{F}_{\text{тр}2} + \vec{F}_{\text{вкл}} > \vec{F}_{\text{ск}}. \quad (4)$$

Расчёт соединительной муфты для передвижных электростанций выполняется на основании следующих данных:

1 Максимальный момент, передаваемый муфтой, M_{max} , Нм.

2 Средний радиус дисков фрикционной муфты включения равен среднему радиусу фрикционных дисков основной муфты: $r_1 = r_2$, м.

3 Средний радиус фрикционного усилительного звена R_2 , м.

4 Коэффициент усиления первого каскада усилительного модуля

$$k_{\text{yc-1}} = n_1 - 1, \quad (5)$$

где n_1 – число дисков муфты включения.

5 Коэффициент усиления второго каскада усилительного модуля

$$k_{\text{yc-2}} = \text{arctg}\alpha, \quad (6)$$

где α – угол наклона нагружающих дорожек усилительного звена.

6 Коэффициент усиления третьего каскада усилительного модуля

$$k_{\text{yc-3}} = n_3 - 1, \quad (7)$$

где n_3 – число дисков муфты включения.

Усилительные каскады 1, 2 и 3 соединены последовательно, тогда суммарный коэффициент усилительного модуля при последовательном соединении каскадов усиления равен произведению коэффициентов усиления каждого из каскадов:

$$k_{\text{общ}} = k_{\text{yc-1}} \cdot k_{\text{yc-2}} \cdot k_{\text{yc-3}}. \quad (8)$$

Значения коэффициента трения фрикционных дисков основной муфты [9]:

– минимальное – $f_{2\text{min}} = 0,12$;

– максимальное значение коэффициента трения фрикционных дисков основной муфты – $f_{2\text{max}} = 0,15$;

– дельта (разница между максимальным и минимальным значениями) – $\Delta f_{2\text{max}} = 0,03$.

Алгоритм расчета соединительной многодисковой муфты представлен ниже.

Для расчета $F_{\text{эл}}^{\text{max}}$ определим значение N_{max} – силы нормального взаимодействия ведущих и ведомых фрикционных дисков основной муфты 11 из выражения (9):

$$M_{\text{max}} = N_{\text{max}} \cdot f_{2\text{min}} \cdot r_3 \cdot k_{\text{yc-3}}; \quad (9)$$

$$N_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{f_{2\text{min}} \cdot r_3 \cdot k_{\text{yc-3}}}; \quad (10)$$

$$F_{\text{вкл}} \cdot \cos\alpha \geq N_{\text{max}} \cdot \sin\alpha - N_{\text{max}} \cdot f_{2\text{min}} \cdot \cos\alpha. \quad (11)$$

Разделим выражение (11) на $\cos\alpha$. Исходя из формулы (11), получаем

$$F_{\text{вкл}} \geq N_{\text{max}} \cdot (\text{tg}\alpha_{\text{max}} - f_{2\text{min}}) = N_{\text{max}} \cdot (f_{2\text{max}} - f_{2\text{min}}) = N_{\text{max}} \cdot \Delta f_2. \quad (12)$$

В выражении (12) α_{max} – угол наклона нагружающей дорожки; значение угла α_{max} определяется из условия $\text{tg}\alpha_{\text{max}} \geq f_{2\text{max}}$, что исключает заклинивание муфты при любом значении f_2 , в том числе и при $f_{2\text{max}} = 0,15$.

В свою очередь, величина $F_{\text{вкл}}$ усилия включения определяется с учетом любого значения f_2 , в том числе и $f_{2\text{min}} = 0,12$. Данное условие обеспечивает управляемое состояние фрикционной соединительной муфты в диапазоне от $f_{2\text{min}}$ до $f_{2\text{max}}$.

Определим максимальный уровень электромагнитного силового воздействия, необходимого для включения соединительной муфты, и при $f_{2\text{min}}$:

$$F_{\text{вкл}} = N_{\text{max}} \cdot (f_{2 \text{ max}} - f_{2 \text{ min}}) = N_{\text{max}} \cdot \Delta f_{2 \text{ max}}. \quad (13)$$

Так как $R \cdot F_{\text{вкл}} = F'_{\text{эл}} \cdot f_{2 \text{ min}} \cdot r_2 \cdot k_{\text{ус-2}}$,

где $k_{\text{ус-2}} = \text{arctg} \alpha$, то

$$F'_{\text{эл}} = \frac{F_{\text{вкл}} \cdot R}{f_{2 \text{ min}} \cdot r_2 \cdot k_{\text{ус-2}}}. \quad (14)$$

С учетом наличия первого каскада усиления с коэффициентом усиления $k_{\text{ус-1}}$ (5) находим $F''_{\text{эл}}$ по следующей формуле:

$$F''_{\text{эл}} = \frac{F'_{\text{эл}}}{k_{\text{ус-1}}}. \quad (15)$$

Применение трехкаскадного усилительного модуля с коэффициентом усиления позволило разработать энергосберегающий электромагнитный привод, имеющий высокие технико-экономические показатели и низкую металлоемкость по сравнению с известными современными электромагнитными муфтами.

Описание работы фрикционных дисков и электромагнита

Как было сказано ранее, коэффициент трения и его стабильность зависят более чем от 40 факторов и, согласно [9], во многодисковых фрикционных муфтах используют стальные диски (рис. 4, а) и стальные диски с металлокерамическим покрытием (металлокерамика на железной основе) (рис. 4, б), где коэффициент трения колеблется от 0,12 до 0,15. Этот незначительный разброс существенно влияет на коэффициент усиления трехкаскадного усилительного модуля. В качестве элементов нагружения используются сферические тела качения (шарики) 16, взаимодействующие с нагружающими поверхностями дисков 8 и 9 (см. рис. 2).

Согласно теории вероятностей, геометрические параметры тел качения располагаются по нормальному закону, в котором в начальный период работы реализуются три точки контакта: максимальная и две наиболее близкие к этому значению.

Процесс входа в рабочее состояние остальных элементов (сферических тел качения) происходит после активного износа нагружающих профилей левого 8 и правого 9 дисков (см. рис. 2), что приводит к нарушению их геометрии и возникновению условий, снижающих надёжность работы соединительной муфты, т.е. происходит отклонение угла α от математически точных значений.

Для обеспечения надёжной и эффективной работы второго каскада – фрикционного усилительного звена применяется трёхточечный контакт, который обеспечивает стабильно устойчивое опирание системы, равномерное нагружение тел качения и передачу одинакового усилия прижатия дисков основной муфты 11.

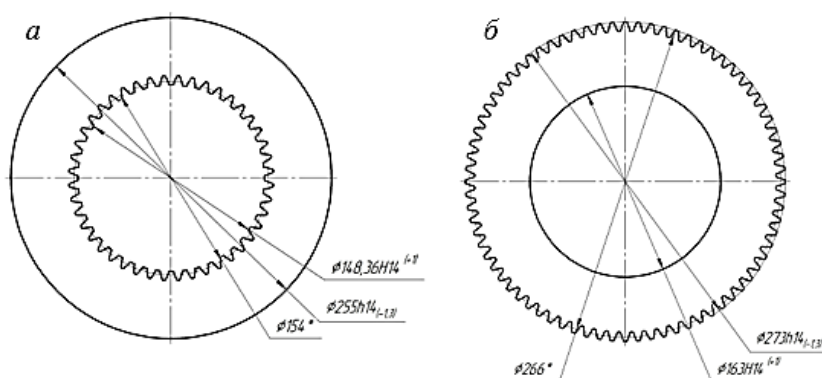


Рис. 4. Стальные диски фрикционных муфт:

а – стальной диск; б – стальной диск с металлокерамическим покрытием

Для освобождения дисков от электромагнита (рис. 5) иногда оказывается недостаточно отключить его питание. Магнитный поток не снижается до нуля из-за остаточного магнетизма в сердечнике электромагнита и дисках, а составляет некоторую величину, определяемую свойствами их материалов. Этого может

оказаться достаточно для того, чтобы диск остался притянутым к электромагниту. Для полного освобождения необходимо на короткое время «перемагнитить» электромагнит, т.е. пропустить ток через его катушку в обратном направлении. При этом, когда магнитный поток снизится до нуля, диск освободится. Величина такого тока, называемого «обратным», составляет 12–20 % от рабочего.

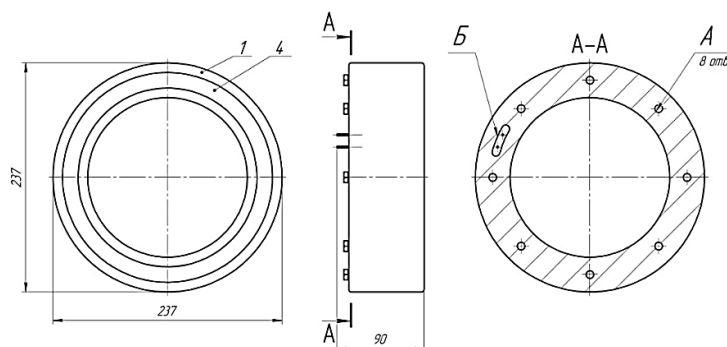


Рис. 5. Электромагнит

При отключении электромагнита происходит быстрое снижение магнитного потока, направляющее в его катушке электромагнитную силу самоиндукции. Величина индуктированного напряжения возрастает при быстром отключении тока и в некоторых случаях может достигнуть 3000–4000 В, т.е. в 15–18 раз превысит номинальное напряжение, что не исключает возможности пробоя изоляции катушки электромагнита.

В блоках управления электромагнитом для ограничения величины перенапряжения параллельно катушке электромагнита подключалось так называемое разрядное сопротивление. При величине разрядного сопротивления, в 5–6 раз превышающей сопротивление катушки электромагнита, перенапряжение практически снижалось до 700–800 В. Так как разрядное сопротивление постоянно подключено к электромагниту, то при его работе оно потребляет дополнительный ток.

Для оперативности управления системой в отключенном состоянии в конструкции муфты используются результаты исследований в области взаимосвязи динамических процессов, происходящих в механической системе и фрикционном контакте. В основе этих исследований лежит упруго-диссипативная природа формирования и разрыва деформационных и адгезионных связей фрикционно-механической системы [12–14].

Таким образом, фрикционная муфта с электромагнитным управлением является важным компонентом многих механизмов и машин. Она позволяет осуществлять плавный пуск и остановку оборудования, а также обеспечивает защиту от перегрузок. Одним из главных преимуществ фрикционной муфты являются минимальные затраты энергии на ее эксплуатацию.

В результате на основе использования теоретических основ трибологии создана высокоэффективная система управления муфтами. В частности, в системе управления соединительными масляными муфтами (см. рис. 1) при использовании явления динамической анизотропии фрикционных связей [13, 14] был создан высокоэффективный усилительный каскад.

С целью снижения затрат мощности на управление соединительной муфтой, предназначенной для тяжёлых путевых машин, в конструкцию введены три усилительных звена, или три каскада усиления.

Первым каскадом усиления является масляная многодисковая фрикционная муфта с электромагнитным управлением. Коэффициент усиления первого каскада

$$k_{yc-1} = n_1 - 1,$$

где n_1 – число ведущих и ведомых дисков.

Вторым каскадом усиления является фрикционное усилительное звено с коэффициентом усиления

$$k_{yc-2} = \text{arcctg} \alpha,$$

где α – угол наклона нагружающих дорожек.

Третьим каскадом усиления является основная многодисковая масляная фрикционная муфта с электромагнитным управлением с коэффициентом усиления

$$k_{yc-3} = n_3 - 1,$$

где n_3 – число дисков.

В связи с тем, что каскады усиления связаны между собой последовательно, суммарный коэффициент усиления

$$k_{\text{общ}} = k_{\text{ус-1}} \cdot k_{\text{ус-2}} \cdot k_{\text{ус-3}}.$$

Применение мощного трехкаскадного усилительного модуля позволило значительно снизить затраты энергии на работу электромагнитной муфты, снизить её габариты и создать условия для реализации вариантов встроенных в корпус муфты электромагнита и питающего аккумулятора для него.

Выводы

1 Применение мощного усилительного модуля позволяет снизить расходы энергии до 300 и более раз на эксплуатацию соединительной муфты для передвижной электростанции.

2 Усилительный модуль в соединительной муфте позволяет увеличить в 10 и более раз ресурс ее работы без подзарядки встроенного в корпус муфты аккумулятора, что значительно упрощает ее эксплуатацию, а также повышает конкурентоспособность агрегата.

3 Применение явления динамической анизотропии фрикционных связей во втором каскаде усиления позволяет отказаться от первого каскада усиления в виде пусковой многодисковой муфты, что обеспечивает значительное снижение металлоемкости и габаритов муфты.

4 Высокоэффективная, компактная конструкция соединительной муфты может стать основой создания автоматических силовых трансмиссий мобильных технических систем.

Список литературы

1 Highly flexible couplings. Torsional vibrations under control : our product portfolio // Materials of the official website of the German mechanical engineering concern Voith. – 2024. – URL: <https://voith.com/corp-en/highly-flexible-couplings.html> (дата обращения: 20.11.2024).

2 Industrial Power Transmission Equipment. Industrial Clutches // Materials of the official website of the American company WPT Power Corporation – the world's leading manufacturer of mechanical power transmission equipment. – 2024. – URL: <https://wptpower.com> (дата обращения: 20.11.2024).

3 **Озябкин, А. Л.** Динамический мониторинг трибосистемы «подвижной состав – путь» / А. Л. Озябкин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 2. – С. 35–47. – ISSN 02101-727X.

4 **Шаповалов, В. В.** Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения / В. В. Шаповалов, А. Сладковски, А. Ч. Эркенов // Известия высших учебных заведений. – (Серия «Машиностроение»). – 2015. – № 1 (658). – С. 64–75. – ISSN 0536-1044.

5 Development of methods for analyzing patterns of current consumption in a system for wireless monitoring the effectiveness of metalworking production / A. D. Lukyanov, M. A. Vernezi, O. I. Katin [et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012017.

6 **Озябкин, А. Л.** Выбор информационных каналов для динамического мониторинга аномальных термодинамических процессов в контакте «колесо – рельс» / А. Л. Озябкин, А. А. Александров

References

1 Highly flexible couplings. Torsional vibrations under control : our product portfolio // Materials of the official website of the German mechanical engineering concern Voith. – 2024. – URL: <https://voith.com/corp-en/highly-flexible-couplings.html> (date of access: 11/20/2024).

2 Industrial Power Transmission Equipment. Industrial Clutches // Materials of the official website of the American company WPT Power Corporation – the world's leading manufacturer of mechanical power transmission equipment. – 2024. – URL: <https://wptpower.com> (date of access: 11/20/2024).

3 **Ozyabkin, A. L.** Dynamic monitoring of the "rolling stock – track" tribosystem / A. L. Ozyabkin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2011. – No. 2. – P. 35–47. – ISSN 02101-727X.

4 **Shapovalov, V. V.** Actual tasks of modern tribotechnics and ways to solve them / V. V. Shapovalov, A. Sladkovsky, A. Ch. Erkenov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. – (Series "Machine Building"). – 2015. – No. 1 (658). – P. 64–75. – ISSN 0536-1044.

5 Development of methods for analyzing patterns of current consumption in a system for wireless monitoring the effectiveness of metalworking production / A. D. Lukyanov, M. A. Vernezi, O. I. Katin [et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012017.

6 **Ozyabkin, A. L.** The choice of information channels for dynamic monitoring of anomalous thermodynamic processes in the contact "wheel – rail" / A. L. Ozyabkin, A. A. Alexandrov // Vestnik

- // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 4. – С. 9–20. – ISSN 02101-727X.
- 7 Optimization of dynamically loaded nonlinear technical systems / V. V. Shapovalov, P. V. Kharlamov, S. L. Gorin [et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering : Rostov-on-Don, September 11–13, 2020. – Rostov-on-Don, 2021. – Vol. 16. – P. 012043. – DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012043.
- 8 **Озябкин, А. Л.** Теоретические основы динамического мониторинга фрикционных мобильных систем / А. Л. Озябкин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 10. – С. 17–28. – ISSN 1819-2092.
- 9 **Бухарин, Н. А.** Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля : учебное пособие для вузов / Н. А. Бухарин, В. С. Прозоров, М. М. Щукин. – Ленинград : Машиностроение (Ленинградское отделение), 1973. – 504 с.
- 10 **Харламов, П. В.** Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела / П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3. – С. 37–45. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_37.
- 11 **Харламов, П. В.** Проектирование системы подачи модификаторов трения к фрикционным поверхностям трибологического контакта «колесо – рельс» / П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2 (82). – С. 58–66. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_58.
- 12 **Kharlamov, P.** Application of elastic-dissipative characteristics of the friction contact monitoring for the study of tribological processes in the system “railway track – rolling stock” / P. Kharlamov / Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 403 LNNS. – P. 510–518. – DOI 10.1007/978-3-030-96383-5_57.
- 13 **Патент № 2343450 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/56 (2006.01).** Способ испытаний узлов трения / В. В. Шаповалов, А. В. Челохьян, А. М. Лубягов [и др.]. – № 2006121024/28 (022825) : заявл. 13.06.06 : опубл. 10.01.2009, Бюлл. № 1. – 33 с.
- 14 **Патент № 2674899 Российская Федерация, МПК F 16 D 65/00 (2006.01).** Способ повышения эффективности фрикционных систем 2018 / В. В. Шаповалов, М. М. Шестаков, Р. А. Корниенко [и др.]. – № 2016128401 : заявл. 12.07.2016 : опубл. 15.12.2018. Бюлл. № 35. – 20 с.
- Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2010. – No. 4. – P. 9–20. – ISSN 02101-727X.
- 7 Optimization of dynamically loaded nonlinear technical systems / V. V. Shapovalov, P. V. Kharlamov, S. L. Gorin [et al.] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering : Rostov-on-Don, September 11–13, 2020. – Rostov-on-Don, 2021. – Vol. 16. – P. 012043. – DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012043.
- 8 **Ozyabkin, A. L.** Theoretical foundations of dynamic monitoring of friction mobile systems / A. L. Ozyabkin // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2011. – No. 10. – P. 17–28. – ISSN 1819-2092.
- 9 **Bukharin, N. A.** Automobiles. Design, load conditions, working processes, strength of automobile units : a textbook for universities / N. A. Bukharin, V. S. Prozorov, M. M. Shchukin. – Leningrad : Mechanical Engineering (Leningrad branch), 1973. – 504 p.
- 10 **Kharlamov P. V.** Application of a physico-chemical approach to studying the mechanism of formation of secondary structures of frictional transfer on the surface of a counterbody / P. V. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 3. – P. 37–45. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_37.
- 11 **Kharlamov, P. V.** Designing a system for supplying friction modifiers to the friction surfaces of the tribological contact "wheel – rail" / P. V. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 2 (82). – P. 58–66. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_58.
- 12 **Kharlamov, P.** Application of elastic-dissipative characteristics of the friction contact monitoring for the study of tribological processes in the system “railway track-rolling stock” / P. Kharlamov / Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 403 LNNS. – P. 510–518. – DOI 10.1007/978-3-030-96383-5_57.
- 13 **Patent No. 2343450 Russian Federation, IPC G 01 N 3/56 (2006.01).** Method for testing friction units/ V. V. Shapovalov, A. V. Chelokhyan, A. M. Lubyagov [et al.]. – No. 2006121024/28 (022825) : declared 13.06.06 : published 10.01.2009, Bull. No. 1. – 33 p.
- 14 **Patent No. 2674899 Russian Federation, IPC F 16 D 65/00 (2006.01).** Method for increasing the efficiency of friction systems V. V. Shapovalov, M. M. Shestakov, R. A. Kornienko [et al.]. – No. 2016128401 : declared 12.07.2016 : published 15.12.2018 / Bull. No. 35. – 20 p.

V. V. Shapovalov, T. L. Sayamova, S. L. Gorin, D. A. Ryabysh, O. I. Kovalenko

DEVELOPMENT OF A FRICTION MULTI-DISC CONNECTING COUPLING FOR MOBILE POWER PLANTS

Abstract. Couplings are of great importance for modern engineering. This paper describes the development of a new frictional multi-disc coupling with three amplification stages to replace the imported analog from Voith engineering concern. The first and third stages are multi-disc couplings operating in oil, and the second one is a friction reinforcement unit (FRU) in the form of two disks and rolling elements. This unit has an electromagnetic control that drives it. It has been established in the study that the use of three stages of amplification increases the strength of the connection and reduces wear of the parts. Due to the use of a multi-stage system, it is possible to use less energy to activate the coupling. Its design with electromagnetic control ensures reliable connection of the units.

Keywords: coupling, amplification stage, electromagnet, coefficient of amplification, friction coefficient.

For citation: Development of a friction multi-disc connecting coupling for mobile power plants / V. V. Shapovalov, T. L. Sayamova, S. L. Gorin [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 60–69. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_4_60.

Сведения об авторах

Шаповалов Владимир Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Проектирование и технология производства машин»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: sha.vv@bk.ru

Саямова Татьяна Липаридовна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Начертательная геометрия и графика»,
старший преподаватель,
e-mail: tmt@rgups.ru

Горин Станислав Леонидович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Проектирование и технология производства машин»,
кандидат технических наук, доцент,
профессор,
e-mail: Gorinsl@mail.ru

Рябыш Денис Алексеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Физика»,
ассистент,
e-mail: fiz@rgups.ru

Коваленко Олег Игоревич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Проектирование и технология производства машин»,
аспирант,
e-mail: olegkovalenko2000@mail.ru

Information about the authors

Shapovalov Vladimir Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Design and Technology of Production of Machines»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: sha.vv@bk.ru

Sayamova Tatiana Liparidovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Descriptive Geometry and Graphics»,
Senior Lecturer,
e-mail: tmt@rgups.ru

Gorin Stanislav Leonidovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Design and Technology of Production of Machines»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Gorinsl@mail.ru

Ryabysh Denis Alekseevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Physics»,
Assistant,
e-mail: fiz@rgups.ru

Kovalenko Oleg Igorevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Design and Technology of Production of Machines»,
Postgraduate Student,
e-mail: olegkovalenko2000@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 504.064.36

DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_70

*А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина, Н. А. Тарутин***РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ГИБРИДНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ
ДЛЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ИДЕНТИФИКАЦИИ
НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСТАНЦИИ ***

Аннотация. Железнодорожный транспорт потребляет более 7 % энергии, вырабатываемой электростанциями РФ, которая расходуется как на тягу поездов, так и на питание нетяговых потребителей (депо, станций, мастерских, а также районных потребителей). Таким образом, электрическая подстанция (ЭП) должна обеспечивать надежное электропитание различных устройств железнодорожного транспорта и электроснабжение всех потребителей железнодорожного транспорта. В связи с этим возникает потребность в своевременном выявлении неисправностей в работе ЭП для обеспечения бесперебойного питания, а также предупреждения аварийных ситуаций. В настоящей работе приведена обобщенная схема мониторинга и идентификации неисправностей ЭП с использованием гибридной нейронной сети (ГНС). Схема представлена в нотации IDEF0 с подробным описанием выполняемых функций. Рассмотрен алгоритм преобработки данных для проверки четких и нечетких значений выбранных параметров, влияющих на работу ЭП. Предложена структура ГНС, которая основана на работе сверточной нейронной сети, извлекающей признаки и шаблоны значений параметров, а также рекуррентной нейронной сети, обрабатывающей четкие входные данные. Разработанная ГНС позволит сократить время обработки входных данных, своевременно получить оценку технического состояния ЭП в условиях разнородных данных, а также провести мероприятия, направленные на предупреждение выхода подстанции из строя.

Ключевые слова: диагностические параметры, сверточная нейронная сеть, рекуррентная нейронная сеть, неисправности, электрическая подстанция.

Для цитирования: Колоденкова, А. Е. Разработка структуры гибридной нейронной сети для системы мониторинга и идентификации неисправностей электрической подстанции / А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина, Н. А. Тарутин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 70–79. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_70.

Введение

В силу большого роста как грузоперевозок, так и пассажироперевозок железнодорожным транспортом остается вопрос обеспечения бесперебойного электроснабжения тяги поездов и питания нетяговых потребителей, а также устройства регулирования движения поездов. При этом электроснабжение делят на внешние сети (электростанции, трансформаторные подстанции, линии электропередачи) и внутренние сети (тяговая сеть, линии электроснабжения устройств СЦБ и др.).

Поскольку электрические сети становятся все более сложными, необходимы предписывающие аналитические инструменты для обеспечения устойчивой передачи электроэнергии к конечному потребителю.

Результаты анализа отключения питания, срабатывания защитных устройств за 2020–2022 гг. на ЭП, питающей электрооборудование железной дороги, представлены на рис. 1.

Если рассматривать причины, то на погодные условия человек мало может повлиять, но на внешние сети и собственные он влияет напрямую. Если рассматривать внешние сети, то за передачу электроэнергии от внешней сети к собственным отвечает ЭП. Поэтому необходимо проводить мониторинг и контроль ЭП, а также выявлять причины, приводящие к отказу или выходу из строя, подбирать мероприятия, которые направлены на поддержание ее работоспособности. Для того чтобы оценить техническое состояние ЭП, необходимо проанализировать огромный объем входных данных, которые могут носить четкий и нечеткий характер.

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00415.

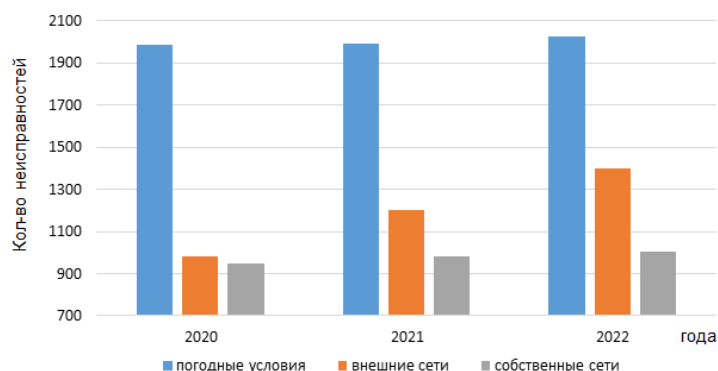


Рис. 1. Статистические данные причин отключения питания и срабатывания защитных устройств

В работе [1] для оценки надежности различных типов конфигураций шин с использованием расчета потока мощности Ньютона – Рафсона с минимальными наборами разрезов рассматриваются два типа режимов отказа, т. е. активный отказ и пассивный отказ. Кроме того, также учитываются работа защитных устройств и мощность устройств, поскольку они влияют на путь потока мощности на подстанции. Результаты оценки надежности всех типов конфигураций шин на электрических подстанциях сравниваются по следующим индексам: *LOLF*, *LOLP* и *EENS*.

В работе [2] рассматривается системный фактор воздействия *SIF* как дополнение к расширению предписывающих возможностей электрических подстанций с целью повышения надежности и устойчивости компонентов. В исследовании используется многокритериальный метод, который включает безопасность, защиту окружающей среды, надежность и устойчивость сети среди других факторов, таких как *SAIDI* и *SAIFI*, для определения фактического воздействия отказов для принятия более обоснованных решений.

В работе [3] рассматривается расчет электрических нагрузок, который является основой выбора пропускной способности всех элементов электрической сети. Предложены пути совершенствования расчета электрических нагрузок трансформаторных подстанций, которые позволят избежать перегрузок в сети и, как следствие, предотвратить выход ЭП из строя.

Несмотря на большое количество публикаций по данной теме, оценка технического состояния ЭП до сих пор является актуальной, так как в рассматриваемых подходах преимущественно учитываются только внутренние параметры.

Целью настоящей статьи является разработка подхода к оценке технического состояния ЭП с использованием гибридной нейронной сети.

1 Выбор диагностических параметров для системы мониторинга и неисправностей электрической подстанции

Для успешного диагностирования, оценки и прогнозирования состояния ЭП необходимо разрабатывать и внедрять эффективные модели и методы принятия решений, которые учитывают различные аспекты работы ЭП, такие как шкалы измерений, типы данных, структуры представления, масштабы и единицы измерения. Одна из первостепенных задач при оценке состояния ЭП – это выбрать наиболее подходящий и правильно описывающий набор диагностических параметров и факторов, которые характеризуют и оказывают влияние на работоспособность подстанции. Для того чтобы интегрировать исходные данные, необходимо определить параметры, которые характеризуют работоспособность подстанции как на прямую, так и косвенно, при этом необходимо учитывать не только внешнюю среду, но и внутреннюю [4–8].

Также отметим, что некоторые параметры могут быть оценены посредством визуального наблюдения, которое проводится в динамическом режиме (при работающем оборудовании) и в статическом режиме (при остановленном). Фрагмент таблицы с диагностическими параметрами и факторами приведен ниже.

Большинство параметров получено с помощью установленных на ЭП датчиков, в которые интегрированы технологии интернета вещей. Для получения остальных значений и параметров применяются математические расчеты либо информация от экспертов, полученная на основе знаний и опыта оперативного и дежурного персонала.

Диагностические параметры и факторы ЭП

Обозначение	Название ЛП, параметра, фактора	Нормируемые значения, ед. изм.	Метод измерения	Терм-множество
x_1	Номинальное U обмотки НН	0,4 кВ нормально допустимые/0,4 ± 10 % предельно допустимые	Измерительный прибор мультиметр	Предельно допустимые/ нормально допустимые
...
x_{15}	Отклонение напряжения фаз А, В, С	±5 % предпочтительный диапазон ±10 % предельный диапазон	Измерительные трансформаторы, токоизмерительные клещи	Предельно допустимые /нормально допустимые

Для измерения некоторых параметров допустимо использовать измерительные приборы (измерительные трансформаторы, мультиметры, прибор ПКЭ-А), если не хватает данных по диагностическим параметрам.

2 Разработка обобщённой схемы оценки технического состояния ЭП

Для мониторинга неисправностей ЭП была разработана обобщенная схема в нотации *IDEF0*, представленная на рис. 2.

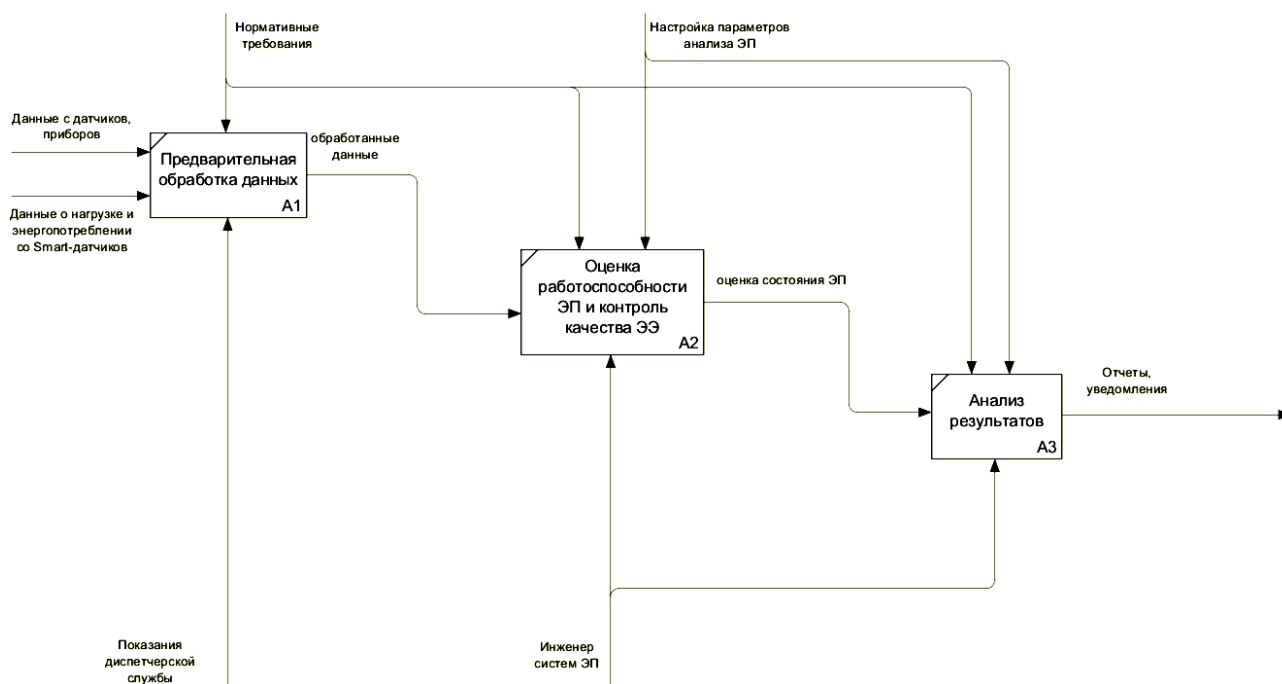


Рис. 2. Обобщенная схема мониторинга неисправностей подстанции в нотации *IDEF0*

Здесь функция A1 позволяет предварительно обработать данные, полученные с различных датчиков, отвечающих за температуру, мощность, ток, с приборов (показатели качества электроэнергии, значение напряжения, тока по фазам и т.д.), а также информацию о нагрузке со smart-счетчиков.

Для успешной интеграции данных для последующей их обработки, необходимо исходные данные предварительно обработать, что позволит выявить наличие шумов, загрязнений данных и т. д., для этого был разработан алгоритм проверки на соответствие, который представлен на рис. 3 [9–13] и состоит из семи шагов.

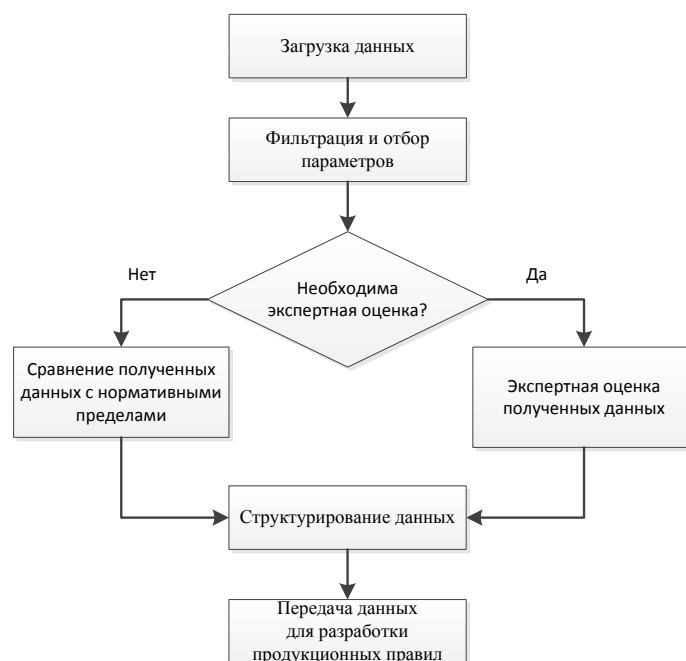


Рис. 3. Алгоритм предобработки данных

Шаг 1. Загрузка данных. Загружаются данные с датчиков, которые непрерывно собирают и накапливают данные диагностических параметров, а также с других приборов при их наличии.

Шаг 2. Фильтрация и отбор параметров. Используются алгоритмы фильтрации для подавления шумов и ненужной информации, а также происходит отбор основных параметров, по которым анализируются загруженные данные.

Шаг 3. Проверка условия: необходима экспертная оценка? Если да, то переход к шагу 5, иначе переход к шагу 4.

Шаг 4. Сравнение полученных данных с нормативными значениями. Проверка соответствия данных с нормативными документами, правилами и т.д. для определения, какому интервалу оно принадлежит (нормальному, предельному).

Шаг 5. Экспертная оценка полученных данных. Экспертная оценка необходима в том случае, если по выбранным или выбранному параметру необходимо с точки зрения эксперта оценить данные и их интерпретировать.

Экспертная оценка параметров необходима для более точного определения состояния электрической подстанции, учитывая то, что параметры взаимозависимы друг от друга, то необходимо дополнительно некоторым «чувствительным» параметрам давать экспертную оценку.

Шаг 6. Структурирование данных. Полученные данные по выбранным параметрам структурируются для последующего анализа.

Шаг 7. Передача данных для разработки продукционных правил.

Функция A2 отвечает за оценку рабочего состояния ЭП, учитывая данные анализа состояния ЭП. Так же здесь происходит контроль качества ЭЭ.

Для оценки работоспособности ЭП используется разработанная гибридная нейронная сеть, основанная на работе *1D-CNN* и *LSTM*, представленная на рис. 4 [14–20].

В качестве типа *CNN* предлагается использовать *1D-CNN*. В *1D-CNN* применяются одномерные фильтры, проходящие только лишь по одному измерению данных. Так как в предлагаемой ГНС *CNN* работает с пространственными данными, то в качестве измерения данных будет выступать время. Ключевыми компонентами *1D-CNN* являются сверточный и пулинговый слой. В сверточном слое применяются одномерные фильтры, проходящие по одному измерению данных. Пулинговый слой уменьшает размерность карт признаков.

Рекуррентную сеть предлагается использовать типа *LSTM*, которая разработана специально для устранения проблемы затухающего градиента, что препятствует обучению на длительных последовательностях. В контексте системы мониторинга и идентификации неисправностей электрической подстанции, предпочтительнее использовать сеть *LSTM*, так как она способна учитывать долгосрочные зависимости в данных, что позволяет модели запоминать важную информацию о нормальном, предельном и неработоспособном состоянии подстанции в течение некоторого периода. Помимо этого,

сеть *LSTM* способна моделировать сложные временные зависимости, что позволяет более точно предсказывать аномалии и обнаруживать неисправности. Это будет особенно полезно в случаях, когда причинами неисправностей могут быть скрытые явления, которые неочевидны без учета всей последовательности событий.

Как видно из структуры, в *CNN* и полносвязном слое применяется выпрямленная линейная функция активации (*ReLU*), которая представляет собой кусочно-линейную функция, которая выводит входные данные без изменений, если они положительные, и ноль, если входные данные отрицательные.

В *RNN* используется гиперболический тангенс в качестве функции активации, которая в отличие от сигмоида, который имеет диапазон от 0 до 1, *Tanh* преобразует входные данные в диапазон от -1 до 1. Это означает, что выходные данные *Tanh* центрированы вокруг нуля, что может улучшить эффективность обучения в некоторых случаях, так как это помогает избежать предвзятости в одну сторону в начальных этапах обучения.

В качестве метода оценки для *1D-CNN* используется *F1*-мера:

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}},$$

где $\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$, TP – истинно положительные результаты, FP – ложно положительные результаты; $\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$, FN – ложно отрицательные результаты.

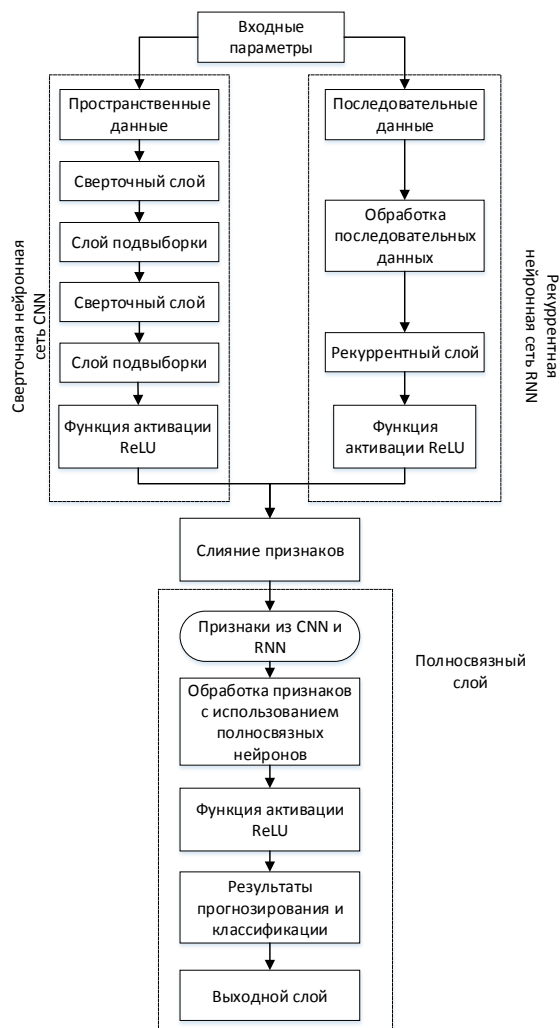


Рис. 4. Структура ГНС для разрабатываемой системы в виде блок-схемы

Для сети *LSTM* используется метод средней абсолютной ошибки, который измеряет среднюю величину ошибок без учета их направления, вычисляемую по формуле

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_i^*|,$$

где y_i – истинные значения, y_i^* – прогнозируемые значения, n – количество прогнозов.

Чтобы оценить эффект прогнозирования *CNN-LSTM*, в качестве критериев оценки методов используют среднюю абсолютную ошибку (*MAE*). Это усредненная сумма модулей разницы между реальным и предсказанным значениями. Чем меньше значение *MAE*, тем качественнее модель. Так как стоит задача точного определения состояния электрической подстанции, то для решения данной задачи была выбрана средняя абсолютная ошибка.

Функция АЗ формирует отчеты о конечном состоянии ЭП, отправляет оператору уведомления о выявленных неисправностях и мероприятиях по их устранению.

Таким образом, представленная обобщенная схема охватывает все процессы, необходимые для оценки работоспособности ЭП.

3 Вычислительный эксперимент

Для мониторинга неисправностей ЭП было разработано программное обеспечение (ПО) с использованием языка программирования *Python*, а также встроенных библиотек, необходимых для полноценной работы программы. На рис. 5 показаны экранные формы входных данных.

Скриншоты экранной формы «Система мониторинга и неисправности электрической подстанции».

а – нормальные параметры:

- Текущие параметры подстанции: Ток: 155 А, Мощность: 7788 Вт, Нагрузка: 13 %
- Номинальное напряжение обмотки низкого напряжения: 0,4
- Номинальное напряжение обмотки высокого напряжения: 6
- Номинальный ток: 60
- Потери короткого замыкания: 11
- Потери холостого хода: 1
- Ток холостого хода: 0,6
- Номинальная частота: 50
- Сопротивление обмотки низкого напряжения: 0,1
- Сопротивление обмотки высокого напряжения: 10
- Коэффициент мощности: 0,85
- Напряжение короткого замыкания: 5,5
- Отклонение напряжения фаз: 0
- Коэффициент трансформации: 0
- Температура окружающей среды: 24
- Уровень напряжения импульсов грозового разряда: 11

б – предельные параметры:

- Текущие параметры подстанции: Ток: 183 А, Мощность: 7817 Вт, Нагрузка: 74 %
- Номинальное напряжение обмотки низкого напряжения: 0,4
- Номинальное напряжение обмотки высокого напряжения: 6
- Номинальный ток: 70
- Потери короткого замыкания: 20
- Потери холостого хода: 1
- Ток холостого хода: 0,64
- Номинальная частота: 52
- Сопротивление обмотки низкого напряжения: 0,14
- Сопротивление обмотки высокого напряжения: 10
- Коэффициент мощности: 0,85
- Напряжение короткого замыкания: 5,5
- Отклонение напряжения фаз: 0
- Коэффициент трансформации: 0
- Температура окружающей среды: 35
- Уровень напряжения импульсов грозового разряда: 11

Рис. 5. Параметры работы электрической подстанции: а – нормальные; б – предельные

На рис. 6 приведены экранные формы результатов обработки выбранных параметров по значениям при нажатии на кнопку «Анализ состояния подстанции». При обнаружении неисправности программа предлагает возможное решение (рис. 7).

а – в нормальном состоянии:

Результат

Подстанция находится в нормальном состоянии.

OK

б – в предельном состоянии:

Вопрос

Обнаружено ли превышение температуры на подстанции?

Да Нет

Рис. 6. Оповещение о нормальной работе электрической подстанции; а – в нормальном состоянии; б – в предельном состоянии

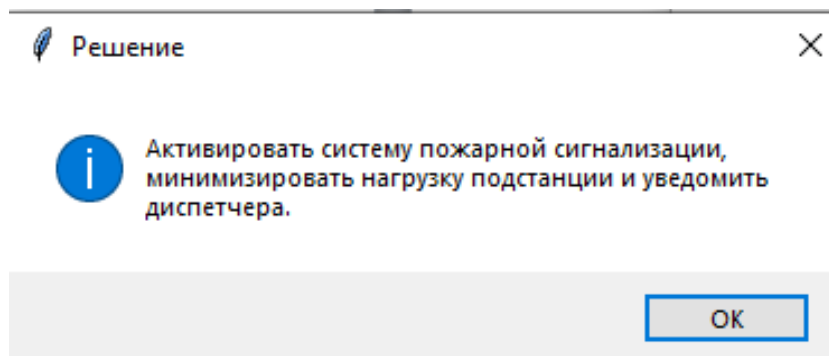


Рис. 7. Возможное решение неисправности

Разработанное ПО было протестировано на 50 различных вариантах нагрузок ЭП, которое показало сокращение времени для обработки данных в 1,5 раза.

Заключение

Представленная в статье система мониторинга неисправностей подстанции позволяет применять современные информационные технологии, регулярно в режиме онлайн-мониторинга следить за состоянием ЭП, а также в 1,5 раза сокращает время на обработку значений параметров и позволяет своевременно принимать научно обоснованные решения для предотвращения аварийных ситуаций на ЭП.

Список литературы

1 **Keawlumyai, N.** Reliability evaluation of electrical substations considering load growth / N. Keawlumyai, W. Witoontorn, S. Chaitusaney // 11th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). – 2014. – P. 1–6. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7207048> (дата обращения: 02.12.2024).

2 **Rodriguez, M.** Enhancing Prescriptive Capabilities in Electrical Substations: A Systemic Impact Factor Approach for Failure Impact Analysis / M. Rodriguez, A. Crespo Marquez, V. Gonzalez-Prida // Energies. – 2024. – Vol. 4. – P. 1–14. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/4/770> (дата обращения: 02.12.2024).

3 **Шабанов, В.** К вопросу об определении электрических нагрузок трансформаторных подстанций / В. Шабанов, А. Рахимбердина, И. Яникиев // Electrical and data processing facilities and systems. – 2022. – Vol. 1. – P. 114–122. – DOI 10.17122/1999-5458-2022-18-1-114-122.

4 **Щегловитова, Е. В.** Классификация трансформаторных подстанций / Е. В. Щегловитова, А. И. Зотова // Energy Systems. – 2024. – Vol. 1. – P. 122–127. – DOI 10.34031/ES.2024.1.016.

5 **Bustos-Brinez, O.** Application of data analysis techniques for characterization and estimation in electrical substations / O. Bustos-Brinez, A. Zambrano, J. Rosero Garcia // Frontiers in Energy Research. – 2024. – Vol. 12. – P. 1–19. – DOI 10.3389/fenrg.2024.1372347.

References

1 **Keawlumyai, N.** Reliability evaluation of electrical substations considering load growth / N. Keawlumyai, W. Witoontorn, S. Chaitusaney // 11th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). – 2014. – P. 1–6. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7207048> (date of access: 12/02/2024).

2 **Rodriguez, M.** Enhancing Prescriptive Capabilities in Electrical Substations: A Systemic Impact Factor Approach for Failure Impact Analysis / M. Rodriguez, A. Crespo Marquez, V. Gonzalez-Prida // Energies. – 2024. – Vol. 4. – P. 1–14. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/4/770> (date of access: 12/02/2024).

3 **Shabanov, V.** On the issue of determining the electrical loads of transformer substations / V. Shabanov, A. Rakhimberdina, I. Yanikiev // Electrical and data processing facilities and systems. – 2022. – Vol. 1. – P. 114–122. – DOI 10.17122/1999-5458-2022-18-1-114-122.

4 **Shcheglovitova, E.** Classification of transformer substations / E. Shcheglovitova, A. Zotova // Energy Systems. – 2024. – Vol. 1. – P. 122–127. – DOI 10.34031/ES.2024.1.016.

5 **Bustos-Brinez, O.** Application of data analysis techniques for characterization and estimation in electrical substations / O. Bustos-Brinez, A. Zambrano, J. Rosero Garcia // Frontiers in Energy Research. – 2024. – Vol. 12. – P. 1–19. – DOI 10.3389/fenrg.2024.1372347.

- 6 **Leiva Vilaplana, J.** Virtualized Protection, Automation, and Control in Electrical Substations : An Open-Source Dynamic Cost-Benefit Assessment Model / J. Leiva Vilaplana, N. Kabbara, T. Coste [et al.] // IEEE Access. – 2024. – P. 1–17. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3435972.
- 7 **ГОСТ 22782.0-81.** Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытаний (с Изменениями N 1, 2, 3). – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 28 с.
- 8 **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 19 с.
- 9 **Wu, D.** The effects of data preprocessing on probability of default model fairness / D. Wu // World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. – 2024. – Vol. 12. – P. 872–878. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2408.15452> (дата обращения: 02.12.2024).
- 10 **Almarshad, M.** Polysomnography Raw Data Extraction, Exploration, and Preprocessing / M. Almarshad, S. BaHammam, S. Islam, S. Al-Ahmadi, A. Bahammam // Springer/Nature. – 2024. – DOI 10.1007/978-3-031-68263-6_2.
- 11 **Кузнецов, А. Д.** Эффективная предобработка данных перед их анализом / А. Д. Кузнецов, М. Д. Порохня, В. В. Фиоктистова // Молодежные исследования сегодня : сборник статей VII Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск : Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И. И.), 2024. – С. 120–126. – ISBN 978-5-00215-227-8.
- 12 **Тарасов, В. И.** Роль предобработки данных при прогнозировании временных рядов / В. И. Тарасов, М. О. Усманов, А. Д. Пономарев // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных : Сборник статей II Всероссийской научной конференции : в 5 т. Т. 2. Москва, 27–28 апреля 2023 года. – Москва : КДУ, Добросвет, 2023. – С. 145–150. ISBN 978-5-7913-1352-2.
- 13 **Караткевич, М. С.** Исследование влияния способов предобработки данных на результаты обучения модели регрессии LightGBM / М. С. Караткевич // Устойчивое развитие общества : новые научные подходы и исследования : сборник материалов II Международной научно-практической конференции. – Москва : АЛЕФ, 2024. – С. 109–119. – ISBN 978-5-605-09446-3.
- 14 **Kolodenkova A.E.** Selection of Basic Parameters for the Diagnosis of Industrial Electrical Equipment
- 6 **Leiva Vilaplana, J.** Virtualized Protection, Automation, and Control in Electrical Substations : An Open-Source Dynamic Cost-Benefit Assessment Model / J. Leiva Vilaplana, N. Kabbara, T. Coste [et al.] // IEEE Access. – 2024. – P. 1–17. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3435972.
- 7 **GOST 22782.0-81.** Explosion-proof electrical equipment. General Engineering requirements and test methods (with Amendments No. 1, 2, 3). – Moscow : Publishing House of Standards, 1984. – 28 p.
- 8 **GOST 32144-2013.** Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Standards for the quality of electric energy in general-purpose power supply systems. – Moscow : Standartinform, 2014. – 19 p.
- 9 **Wu, D.** The effects of data preprocessing on probability of default model fairness / D. Wu // World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. – 2024. – Vol. 12. – P. 872–878. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2408.15452> (date of access: 02.12.2024).
- 10 **Almarshad, M.** Polysomnography Raw Data Extraction, Exploration, and Preprocessing / M. Almarshad, S. BaHammam, S. Islam, S. Al-Ahmadi, A. Bahammam // Springer/Nature. – 2024. – DOI 10.1007/978-3-031-68263-6_2.
- 11 **Kuznetsov, A. D.** Effective preprocessing of data before their analysis / A. D. Kuznetsov, M. D. Porokhnya, V. V. Fioktistova // Youth research today : collection of articles of the VII International scientific and practical conference. – Petrozavodsk : International Center for Scientific Partnership "New Science" (IP Ivanovskaya I. I.), 2024. – P. 120–126. – ISBN 978-5-00215-227-8.
- 12 **Tarasov, V. I.** The role of data preprocessing in forecasting time series / V. I. Tarasov, M. O. Usmanov, A. D. Ponomarev // Artificial intelligence in automated control and data processing systems : Collection of articles of the II All-Russian scientific conference : in 5 volumes. Vol. 2, Moscow, April 27–28, 2023. – Moscow : KDU, Dobrosvet, 2023. – P. 145–150. – ISBN 978-5-7913-1352-2.
- 13 **Karatkevich, M. S.** Study of the influence of data preprocessing methods on the results of training the LightGBM regression model / M. S. Karatkevich // Sustainable development of society : new scientific approaches and research : collection of materials of the II International scientific and practical conference. – Moscow : ALEF, 2024. – P. 109–119. – ISBN 978-5-605-09446-3.
- 14 **Kolodenkova, A. E.** Selection of Basic Parameters for the Diagnosis of Industrial Electrical

Using Computer Technology / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // Proceedings – 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022. – Sochi, 2022. – P. 982–986. – ISBN 978-1-6654-8370-4.

15 **Kolodenkova, A. E.** Development of a Unified Diagnostic Complex of Electrical Equipment for Intelligent Systems / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Сочи, 2023. – P. 209–213. – ISBN 979-8-3503-4556-8.

16 **Томин, Н. В.** Концепция построения интеллектуальной системы “искусственный диспетчер” для автоматической системы управления электрическими сетями на базе глубокого обучения с подкреплением / Н. В. Томин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 6. – С. 132–151. – DOI 10.31857/S0002338820050121.

17 **Кокшев, П. А.** Преимущества применения нейронной сети с архитектурой многослойного перцептрона для сетевого анализатора данных цифровой подстанции. Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции / П. А. Кокшев, Н. А. Галанина // Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова. – Чебоксары, 2021. – С. 127–129. – ISBN 978-5-7677-3286-9.

18 **Cheng, L.** Research on visualization monitoring technology of vulnerable high-voltage electrical equipment in substation based on BP artificial neural network / L. Cheng, X. Hu // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. – 2024. – Т. 9. – P. 1–23. – DOI 10.2478/amns-2024-1634.

19 **Kenessov, Y.** Construction of a recurrent neural network-based electrical load forecasting model for a 110 kV substation: a case study in the Western Region of The Republic of Kazakhstan / Y. Kenessov, K. Tokhtibakiev, A. Saukhimov [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 2. – P. 6–15. – DOI 10.15587/1729-4061.2024.299192.

20 **Колоденкова, А. Е.** Подход к обнаружению неисправностей электрооборудования с использованием сверточных нейронных сетей / А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : сборник статей по материалам научной VII Всероссийской Поспеловской конференции. – Калининград, Санкт-Петербург : Русская христианская гуманитарная академия им. Ф. М. Достоевского, 2024. – С. 281–286. – ISBN 978-5-907855-25-0.

Equipment Using Computer Technology / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // Proceedings – 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022. – Sochi, 2022. – P. 982–986. – ISBN 978-1-6654-8370-4.

15 **Kolodenkova, A. E.** Development of a Unified Diagnostic Complex of Electrical Equipment for Intelligent Systems / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Сочи, 2023. – P. 209–213. – ISBN 979-8-3503-4556-8.

16 **Tomin, N. V.** The concept of building an intelligent system “artificial dispatcher” for an automatic control system of electric networks based on deep reinforcement learning / N. V. Tomin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. – 2020. – No. 6. – P. 132–151. – DOI 10.31857/S0002338820050121.

17 **Kokshev, P. A.** Advantages of using a neural network with a multilayer perceptron architecture for a network data analyzer of a digital substation. Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems: Proceedings of the XIV All-Russian scientific and technical conference / P. A. Kokshev, N. A. Galanina // Chuvash State University named after I. N. Ulyanov. – Cheboksary, 2021. – P. 127–129. – ISBN 978-5-7677-3286-9.

18 **Cheng, L.** Research on visualization monitoring technology of vulnerable high-voltage electrical equipment in substation based on BP artificial neural network / L. Cheng, X. Hu // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. – 2024. – Т. 9. – P. 1–23. – DOI 10.2478/amns-2024-1634.

19 **Kenessov, Y.** Construction of a recurrent neural network-based electrical load forecasting model for a 110 kV substation: a case study in the Western Region of The Republic of Kazakhstan / Y. Kenessov, K. Tokhtibakiev, A. Saukhimov [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 2. – P. 6–15. – DOI 10.15587/1729-4061.2024.299192.

20 **Kolodenkova, A. E.** An approach to detecting faults in electrical equipment using convolutional neural networks / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // Hybrid and synergetic intelligent systems : a collection of articles based on the materials of the scientific VII All-Russian Pospelovskaya Conference. – Калининград, Saint Petersburg : Russian Christian Humanitarian Academy named after F. M. Dostoevsky, 2024. – P. 281–286. – ISBN 978-5-907855-25-0.

A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, N. A. Tarutin

DEVELOPMENT OF A HYBRID NEURAL NETWORK STRUCTURE FOR THE SYSTEM OF MONITORING AND FAULT IDENTIFICATION OF ELECTRICAL SUBSTATION

Abstract. Railway transport consumes more than 7 % of the energy generated by power plants in the Russian Federation, which is spent both on train traction and on power supply for non-traction consumers (depots, stations, workshops, and district consumers). Thus, an electrical substation (ES) must ensure reliable power supply for various devices of railway transport and power supply of all consumers of railway transport. In this regard, there is a need for timely detection of faults in the ES operation to ensure uninterrupted power supply, as well as to prevent emergency situations. This paper presents a generalized scheme for monitoring and identifying faults of the electrical substation using a hybrid neural network (HNN). The scheme is presented in IDEF0 notation with a detailed description of the functions performed. The algorithm of data preprocessing for verification of crisp and fuzzy values of selected parameters affecting the ES operation is considered. The authors propose the HNN structure based on the operation of a convolutional neural network that derives signs and templates of parameter values, as well as a recurrent neural network that processes crisp input data. The developed HNN will reduce the time for processing input data, obtain timely assessment of the technical condition of the electrical substation under conditions of heterogeneous data, as well as to take measures aimed at preventing substation failure.

Keywords: diagnostic parameters, convolutional neural network, recurrent neural network, faults, electrical substation.

For citation: Kolodenkova, A. E. Development of a hybrid neural network structure for the system of monitoring and fault identification of electrical substation / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, N. A. Tarutin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 70–79. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_70.

Сведения об авторах

Колоденкова Анна Евгеньевна

Самарский государственный технический университет (СамГТУ),
кафедра «Информатика и вычислительная техника»,
доктор технических наук, доцент,
профессор,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Верещагина Светлана Сергеевна

Самарский государственный технический университет (СамГТУ),
кафедра «Информатика и вычислительная техника»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: werechaginass@mail.ru

Тарутин Никита Алексеевич

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)
кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий»
аспирант,
e-mail: nikitartutin@mail.ru

Information about the authors

Kolodenkova Anna Evgenievna

Samara State Engineering University,
Chair «Computer Science and Engineering»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associated Professor, Professor,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Vereshchagina Svetlana Sergeevna

Samara State Engineering University,
Chair «Computer Science and Engineering»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: werechaginass@mail.ru

Tarutin Nikita Alekseevich

Samara State Engineering University,
Chair «Power Supply for Industrial Enterprises»,
Postgraduate Student,
e-mail: nikitartutin@mail.ru

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 : 621.311 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_80

*П. А. Логунова***ОРГАНИЗАЦИЯ УЧЕТА РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы определения расхода электроэнергии на нужды тяги для электрифицированных железных дорог постоянного тока, а также основные проблемы, с которыми связана сложность непосредственного измерения расхода электроэнергии на тягу поездов. В качестве метода, позволяющего решить поставленную задачу без необходимости установки на электроподвижной состав устройств ГЛОНАСС, предлагается метод, который основан на прямых измерениях токов и напряжений в нескольких точках тяговой сети. Представленный в статье алгоритм обработки этих данных позволяет определить все исходные величины, необходимые для расчетов расхода электроэнергии на тягу.

Ключевые слова: потери мощности, метод восстановления поездной ситуации, двухпутная вставка, расчет мгновенных схем.

Для цитирования: Логунова, П. А. Организация учета расхода электроэнергии на тягу поездов на тяговых подстанциях железных дорог постоянного тока / П. А. Логунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 80–86. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_80.

Введение

Энергия в жизни любого человека, общества и государства занимает сегодня особое, можно сказать, определяющее место. Наличие энергетических ресурсов у государств определяет способность к существованию и развитию, о чем свидетельствуют события, развивающиеся на мировой арене в последние годы. В нашей стране вопросу обеспечения топливно-энергетическими ресурсами уделяется особое внимание. Указом Президента РФ от 13 мая 2019 года № 216 утверждена «Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации», документ стратегического планирования, затрагивающий сферу национальной безопасности нашей страны, в котором отражаются официальные взгляды на обеспечение энергетической безопасности Российской Федерации. Одним из основных требований для обеспечения энергетической безопасности является способность производств к рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Таким образом, задача государства заключается не только в обеспечении достаточных запасов ТЭР, но и в организации энергоэффективного производства во всех сферах экономики, где будут исключены нерациональное потребление и потери ТЭР.

Стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» в числе первоочередных задач, в частности инфраструктурного бизнес-блока, включает в себя задачи оптимизации издержек за счет роста энергоэффективности, задачи перехода на тяжеловесное движение, а также задачи модернизации инфраструктуры для обеспечения требуемого объема перевозок грузов и пассажиров. На сегодняшний день обеспечение энергосбережения и повышение энергетической эффективности является важнейшим направлением в основной деятельности ОАО «РЖД». С учетом того что одним из основных видов энергии, используемой в процессе перевозок, является электрическая энергия, в статье рассмотрен вопрос об упорядочении учета ее расхода на тягу для электрифицированных железных дорог постоянного тока.

Основная часть

Реализация задачи повышения энергоэффективности в системе тягового электроснабжения и обеспечения энергосбережения при организации перевозочного процесса является одной из приоритетных задач. Основной причиной такого пристального внимания к данному вопросу является тот факт, что потребление ТЭР на тягу поездов занимает порядка 80 % от общего потребления ТЭР всеми структурами холдинга ОАО «РЖД». Несмотря на все предпринимаемые усилия, в настоящее время вопрос оперативного мониторинга потребления ТЭР на тягу, в частности электрической энергии, остаётся открытым [1, 2]. Причин такого состояния вопроса несколько, но в качестве основного следует

отметить распределенный характер системы электропотребления и наличие постоянно перемещающихся нагрузок с переменным значением величины потребляемой электроэнергии. В данной работе рассматривается вопрос разработки подходов непрерывного мониторинга величины электроэнергии, потребляемой на тягу поездов, для электрифицированных железных дорог постоянного тока.

Расход электроэнергии на тягу за определенный интервал времени Δt в системе электроснабжения участка железной дороги постоянного тока можно представить как сумму нескольких составляющих, каждая из которых в общем случае характеризуется целым рядом независимых факторов [3, 4]:

$$W_T = W_{\text{ЭПС}} + \Delta W_{\text{ТС}} + \Delta W_{\text{ВИП}} + \Delta W_{\text{ТР}} + \Delta W_{\text{ВЭС}}, \quad (1)$$

где W_T – расход электроэнергии на тягу, кВт·ч; $W_{\text{ЭПС}}$ – расход электроэнергии электроподвижным составом за время t , кВт·ч; $\Delta W_{\text{ТС}}$ – потеря энергии в тяговой сети участка железной дороги за время t , кВт·ч; $\Delta W_{\text{ВИП}}$ – потеря энергии в выпрямительно-инверторных преобразователях за время t , кВт·ч; $\Delta W_{\text{ТР}}$ – потеря энергии в главных понизительных трансформаторах за время t , кВт·ч; $\Delta W_{\text{ВЭС}}$ – потеря энергии на элементах внешнего электроснабжения за время t , кВт·ч.

Важно отметить, что последнее слагаемое $\Delta W_{\text{ВЭС}}$ не учитывается счетчиками электроэнергии тяговых подстанций и не несет дополнительных затрат для компании ОАО «РЖД», однако, при необходимости может быть учтено при рассмотрении вопроса влияния тяговой нагрузки в разрезе внешней энергосистемы. Рассмотрим поэлементно все составляющие выражения (1), для того чтобы выделить все составляющие, для которых необходимо организовать непрерывный мониторинг и фиксацию величины.

Величина энергии, заточиваемая ЭПС на совершение полезной работы в пределах участка железной дороги за время $t = (t_1 - t_2)$, в общем случае может быть определена по выражению

$$W_{\text{ЭПС}} = \sum_{k=1}^n \int_{t_2}^{t_1} (u_k \cdot i_k) dt, \quad (2)$$

где n – число ЭПС на участке в интервале времени $t = (t_1 - t_2)$; u_k – мгновенное значение напряжения на пантографе k -го электровоза, В; i_k – мгновенное значение тока, потребляемого k -м электровозом, А.

При условии, что значения токов и напряжений, входящих в выражение (2), будет дискретным, измеренным через известные промежутки времени Δt , выражение (2) примет вид

$$W_{\text{ЭПС}} = \sum_{k=1}^n \sum_{v=1}^m (U_{k,v} \cdot I_{k,v}) \Delta t, \quad (3)$$

где n – число ЭПС на участке в интервале времени $t = (t_1 - t_2)$; $U_{k,v}$ – напряжение на пантографе k -го электровоза, полученное на v -м замере, В; $I_{k,v}$ – значение тока, потребляемого k -м электровозом, полученное на v -м замере, А.

Входящая в выражение переменная m определяется как

$$m = \frac{t}{\Delta t}. \quad (4)$$

Для определения составляющей потери энергии в тяговой сети постоянного тока в общем случае следует использовать выражение

$$\Delta W_{\text{ТС}} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_j} \Delta U_{k,j} \cdot I_{k,j} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где j – число путей участка, для которого ведется расчет; n_j – число элементов тяговой сети j -го участка, в пределах которых ток неизменен; $\Delta U_{k,j}$ – падение напряжения на j -м участке тяговой сети, В; $I_{k,j}$ – значение тока на j -м участке тяговой сети, А.

Составляющая потерь энергии $\Delta W_{\text{ВИП}}$ включает в себя потери в трансформаторе преобразователя и потери в элементах самого преобразователя, в общем случае величина потерь может быть определена как

$$\Delta W_{\text{ВИП}} = \Delta W_{\text{ПТ}} + \Delta W_{\text{ВЛ}}. \quad (6)$$

Составляющие выражения:

$$\Delta W_{\text{ПТ}} = \sum_{k=1}^n \left[\Delta P_x + \Delta P_k \left(\frac{S}{S_H} \right)^2 \right] \cdot \Delta t, \quad (7)$$

где ΔP_x – потери холостого хода трансформатора преобразователя, кВт; ΔP_k – потери короткого замыкания трансформатора преобразователя, кВт; S – фактически потребляемая мощность на расчетном интервале времени Δt , кВА; S_H – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$$\Delta W_{\text{ВП}} = \sum_{k=1}^n \left[U_B \cdot I_k + \frac{3R_D I_k^2}{a \cdot m \cdot n_b} \right] \cdot \Delta t \cdot b, \quad (8)$$

где U_B – пороговое напряжение вентилей, В; R_D – динамическое сопротивление вентилей, Ом; I_k – фактическое значение тока на расчетном интервале времени Δt , А; a – число параллельных ветвей в фазе; m – число фаз, n_b – число выпрямительных агрегатов; b – число последовательно соединенных вентилях в фазе.

Для расчета потерь мощности в главных понизительных трансформаторах также следует воспользоваться выражением [4]

$$\Delta W_{\text{ТР}} = \sum_{k=1}^n \left[\Delta P_x + \Delta P_k \left(\frac{S}{S_H} \right)^2 \right] \cdot \Delta t. \quad (9)$$

Здесь обозначения аналогичны обозначениям, принятым в выражении (7), однако характеристики следует брать для главных понизительных трансформаторов.

Следует отметить, что составляющие потерь, определяемые выражениями (7) и (9), могут быть определены непосредственно в результате измерений на тяговой подстанции, при этом составляющая $\Delta W_{\text{ВП}}$ будет нести информацию о потерях энергии, вызванных только воздействием тяговой нагрузки, а составляющая $\Delta W_{\text{ТР}}$ является результатом суммарного электропотребления от тяговой подстанции аналогично (9). Однако основным энергоемким потребителем тяговых подстанций в большинстве случаев является тяговая нагрузка, поэтому основной вклад в величину потерь энергии в главных понизительных трансформаторах вносят, очевидно, токи тяги.

Иначе обстоит дело с составляющими расхода энергии $W_{\text{ЭПС}}$ и $\Delta W_{\text{ТС}}$, определяемыми по выражениям (3) и (5) соответственно. Непосредственное измерение этих величин связано с рядом трудностей. Расход энергии электроподвижным составом $W_{\text{ЭПС}}$ может быть определен по счетчикам электроэнергии ЭПС, однако здесь возникает целый комплекс проблем. Первой проблемой является перемещающаяся тяговая нагрузка. ЭПС в процессе электропотребления пересекает границы межподстанционных зон, в результате на стадии расчета доли электропотребления от каждой подстанции определяются в соответствии с принятыми методиками, что не всегда соответствует истине. Второй проблемой является проблема точности учета расхода электроэнергии непосредственно на ЭПС, а занижение фактического расхода ведет в итоге к искажению итоговых результатов. Также к числу прочих сложностей следует отнести человеческий фактор.

Отдельно следует отметить тот факт, что непосредственное определение составляющей $\Delta W_{\text{ТС}}$ методом прямых измерений организовать на практике невозможно [5]. Точки, от которых происходит разветвление токов в пределах одной межподстанционной зоны, постоянно перемещаются, так как их координата совпадает с точкой соприкосновения пантографа ЭПС с контактным проводом. Непосредственно измерить ток в произвольном сечении контактной сети также весьма затруднительно ввиду конструктивных особенностей последней [6, 7].

Анализ соотношений (3) и (5), а также (7)–(9) показывает, что часть величин, входящих в эти выражения, являются справочными величинами либо заранее известными величинами для каждой конкретной межподстанционной зоны и могут быть однозначно определены. К изменяющимся величинам следует отнести токи и падения напряжения на всех элементах тяговой сети, а также напряжение на пантографе каждого ЭПС. Для выполнения расчета расхода энергии по (1) необходимо владеть указанными сведениями, получаемыми с интервалом времени, определяемым шагом дискретизации измерения, обозначенным в данной работе Δt .

Рассмотрим на примере однопутного участка постоянного тока протяженностью l км методику получения перечисленных исходных данных [8]. Ввиду того что рассматривается система электроснабжения постоянного тока, влияние смежных путей многопутных участков отсутствует и приводимые ниже рассуждения можно распространить и на многопутные участки.

На рис. 1 показана межподстанционная зона, по которой перемещается электроподвижной состав, потребляющий ток I_X . Будем полагать, что величина этого тока непостоянна во времени, а координата ЭПС определяется расстоянием от левой по схеме тяговой подстанции «А» и обозначена переменной x .

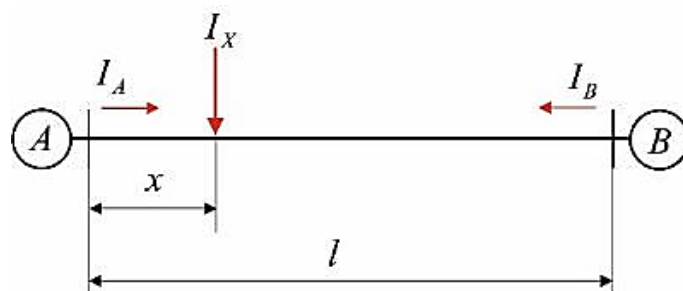


Рис. 1. Расчетная межподстанционная зона

Для дальнейшей работы рассмотрим схему замещения, составленную без учета влияния высших гармоник в кривой выпрямленного напряжения (рис. 2).

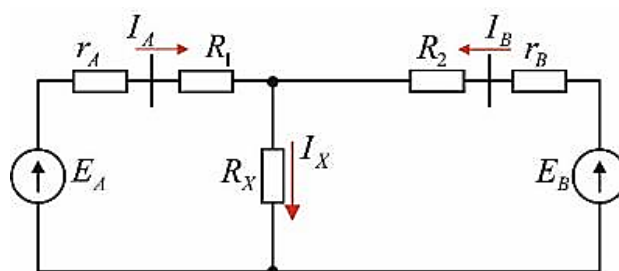


Рис. 2. Схема замещения межподстанционной зоны

На рис. 2 приняты следующие обозначения: r_A и r_B – сопротивления, включающие сопротивление трансформатора тяговой подстанции, выпрямительных агрегатов и внешней энергосистемы; R_1 и R_2 – сопротивления тяговой сети до потребителя слева и справа соответственно; R_X – мгновенное значение сопротивления потребителя с нагрузкой I_X .

Для левого и правого по схеме (см. рис. 2) контуров запишем соотношения:

$$I_A \cdot r_A + I_A \cdot R_1 + I_X \cdot R_X = E_A; \quad (10)$$

$$I_B \cdot r_B + I_B \cdot R_2 + I_X \cdot R_X = E_B. \quad (11)$$

Вычитая из выражения (11) выражение (10), запишем:

$$E_B - I_B \cdot r_B - I_B \cdot R_2 - E_A + I_A \cdot r_A + I_A \cdot R_1 = 0. \quad (12)$$

Для точки, где расположен электровоз, справедливо соотношение

$$I_B = I_X - I_A. \quad (13)$$

Выражение (12) с учетом (13) примет вид

$$E_B - (I_X - I_A) \cdot r_B - (I_X - I_A) \cdot R_2 - E_A + I_A \cdot r_A + I_A \cdot R_1 = 0. \quad (14)$$

Преобразуем выражение:

$$I_A \cdot (r_B + R_2 + r_A + R_1) = I_X \cdot r_B + I_X \cdot R_2 - E_B + E_A. \quad (15)$$

С учетом влияния внутреннего сопротивления источника напряжение на шинах будет определяться соотношением

$$\begin{aligned}U_1 &= E_A - I_A \cdot r_A; \\U_2 &= E_B - I_B \cdot r_B.\end{aligned}$$

Подставив данное соотношение в выражение (15), получим

$$I_A = I_x \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{U_1 - U_2}{R_1 + R_2}. \quad (16)$$

Преобразуем выражение (16) с учетом того, что

$$\begin{aligned}R_1 &= x \cdot r; \\R_2 &= (\ell - x) \cdot r,\end{aligned}$$

где r – удельное сопротивление тяговой сети, Ом/км.

$$I_A = I_A \cdot \frac{\ell - x}{\ell} + I_B \cdot \frac{\ell - x}{\ell} + \frac{U_1 - U_2}{\ell \cdot r}.$$

Выразим координату « x »:

$$x = \frac{I_B}{I_A + I_B} \cdot \ell + \frac{U_1 - U_2}{r \cdot (I_A + I_B)}. \quad (17)$$

Все величины, входящие в выражение (10), являются либо заранее заданными константами, либо непрерывно измеряются в контрольных точках заданного участка. Ток нагрузки ЭПС определяется выражением (13). Проанализируем полученное выражение (13). Токи I_A и I_B являются токами фидеров тяговых подстанций, их можно измерять непрерывно, что соответствует ранее выдвинутым требованиям. Длина участка и данные об удельном сопротивлении тяговой сети для конкретной межподстанционной зоны могут быть заданы заранее [9]. Напряжения U_1 и U_2 – это напряжения на шинах тяговых подстанций, их также возможно измерять непрерывно. С учетом современных телекоммуникационных возможностей территориальная удаленность двух тяговых подстанций не является помехой для сбора и обработки в одном месте данных о токах и напряжениях на нескольких объектах.

Таким образом, показан алгоритм для определения координаты нагрузки и величины тока, потребляемой этой нагрузкой. Для использования выражения (3) необходима информация о величине напряжения на пантографе электровоза, но, владея информацией, собираемой для расчета по (17), определить данный параметр возможно. Также использование приводимого алгоритма позволит определять в режиме реального времени величину падения напряжения и токи на элементах тяговой сети, необходимые для расчета по выражению (5). Следует отметить, что в данном случае рассмотрен самый простой пример – на участке только одна нагрузка. Увеличение числа нагрузок, естественно, приведет к усложнению системы сбора данных о токах и напряжениях, появится потребность в организации дополнительных точек измерения, однако никаких ограничений на использование предложенного подхода данный факт не накладывает.

Выводы

Внедрение методики, основанной на прямых измерениях токов и напряжений в конкретных точках тяговой сети, позволит расчетным методом определять потребление электроэнергии на тягу поездов и одновременно рассчитывать величину потерь энергии, вызываемых этой нагрузкой. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является отсутствие необходимости в оборудовании всех единиц электроподвижного состава приборами для точного определения геолокации, устройствами сбора данных с перемещающихся объектов. Предлагаемая методика предполагает полностью стационарную систему сбора данных, использующую в качестве каналов связи помехозащищенную систему ВОЛС-ЖТ. Независимость предлагаемого алгоритма от действий оператора, возможность полностью автоматизировать процесс учета расхода электроэнергии на нужды тяги на тяговых подстанциях постоянного тока позволят более эффективно проводить работу по повышению энергетической эффективности электрифицированных железных дорог.

Список литературы

1 Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov. – 2020. – Vol. 918, Parte 1. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031.

2 **Morais, J. L.** Martins (2018) Modeling and validation of the dynamics and energy consumption for train simulation 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS) / J. L. Morais, A. P. Afonso // Funchal – Madeira, Portugal, 2018. – P. 288–295.

3 **Осипов, В. А.** Методика определения составляющих для построения мгновенной схемы участка железной дороги постоянного тока / В. А. Осипов, П. А. Логунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4 (76). – ISSN 0201-727X.

4 **Марквардт, К. Г.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учебник для вузов железнодорожного транспорта / К. Г. Марквардт – Москва : Транспорт, 1965. – 464 с.

5 **Sukhanov, A. V.** Railway Rolling Stock Tracking Based on Computer Vision Algorithms (2020) Advances in Intelligent Systems and Computing / A. V. Sukhanov. – 2020. – Vol. 1127 AISC. – P. 56–63. – DOI 10.1007/978-3-030-39216-1_6.

6 **Трубицин, М. А.** К вопросу расчета установившихся режимов электроэнергетических систем / М. А. Трубицин, Е. Ю. Микаэльян // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 9 (69). – С. 49–55. – EDN GYHRIY.

7 Mathematical Simulation of Decision Error Functions in Tolerance Control of the Performance of Measuring Techniques Measurement Techniques / R. Z. Khayrullin, A. S. Kornev, A. S. Kostoglotov, S. V. Lazarenko – 2020. – Vol. 63, Parte 9. – P. 680–685. – DOI 10.1007/s11018-021-01839-y.

8 **Осипов, В. А.** Определение метрологической неопределенности величины потерь энергии в тяговой сети постоянного тока / В. А. Осипов, П. А. Логунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (80). – С. 139–144. – DOI 10.46973/0201-727X20204139.

9 Патент **RU2572797C2, МПК В60М3/00, В60L3/12, G01R21/133.** Способ определения технологических потерь электроэнергии в тяговой сети железнодорожного транспорта : № 2014110999/11 : заявл. 21.03.2014 : опубл. 20.01.2016 / А. Л. Каштанов, В. Л. Незевак,

References

1 Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov. – 2020. – Vol. 918, Parte 1. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031.

2 **Morais, J. L.** Martins (2018) Modeling and validation of the dynamics and energy consumption for train simulation 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS) / J. L. Morais, A. P. Afonso // Funchal – Madeira, Portugal, 2018. – P. 288–295.

3 **Osipov, V. A.** Methodology for determining the components for constructing an instantaneous circuit of a direct current railway section / V. A. Osipov, P. A. Logunova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 4 (76). – ISSN 0201-727X.

4 **Marquardt, K. G.** Power supply of electrified railways : a textbook for universities of railway transport / K. G. Marquardt – Moscow : Transport, 1965. – 464 p.

5 **Sukhanov, A. V.** Railway Rolling Stock Tracking Based on Computer Vision Algorithms (2020) Advances in Intelligent Systems and Computing / A. V. Sukhanov. – 2020. – Vol. 1127 AISC. – P. 56–63. – DOI 10.1007/978-3-030-39216-1_6.

6 **Trubitsin, M. A.** On the issue of calculating the steady-state modes of electric power systems / M. A. Trubitsin, E. Y. Mikaelyan // Engineering Journal of Don. – 2020. – No. 9 (69). – P. 49–55. – EDN GYHRIY.

7 Mathematical Simulation of Decision Error Functions in Tolerance Control of the Performance of Measuring Techniques Measurement Techniques / R. Z. Khayrullin, A. S. Kornev, A. S. Kostoglotov, S. V. Lazarenko – 2020. – Vol. 63, Parte 9. – P. 680–685. – DOI 10.1007/s11018-021-01839-y.

8 **Osipov, V. A.** Determination of the metrological uncertainty of the magnitude of energy losses in a DC traction network / V. A. Osipov, P. A. Logunova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (80). – P. 139–144. – DOI 10.46973/0201-727X20204139.

9 Patent **RU2572797C2, MPC B60M3/00, B60L 3/12, G01R 21/133.** Method for determining technological losses of electric power in the traction network of railway transport : No. 2014110999/11 : declared 21.03.2014 : published 20.01.2016 / A. L. Kashtanov,

М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков, В. Т. Черемисин (РФ). – Бюл. № 2.

V. L. Nezevak, M. M. Nikiforov, S. Yu. Ushakov, V. T. Cheremisin (RF). – Bulletin No. 2.

P. A. Logunova

**ORGANIZATION OF ACCOUNTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION
FOR TRAIN TRACTION AT TRACTION SUBSTATIONS
OF DC RAILWAYS**

Abstract. The article considers the issues of determining the consumption of electricity for traction needs for electrified DC railways, as well as the main problems associated with the complexity of direct measurement of electricity consumption for train traction. As a method to solve this problem without the need to install GLONASS devices on an electric rolling stock, a method is proposed that is based on direct measurements of currents and voltages at several points of the traction network. The algorithm for processing these data presented in the article allows us to determine all the initial values necessary for calculating the consumption of electric power for traction.

Keywords: power loss, method of restoring the train situation, double-track insertion, calculation of instantaneous circuits.

For citation: Logunova, P. A. Organization of accounting of electricity consumption for train traction at traction substations of DC railways / P. A. Logunova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 80–86. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_80.

Сведения об авторах

Логунова Полина Александровна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы
электротехники»,
старший преподаватель,
e-mail: polina_buteneva@mail.ru

Information about the authors

Logunova Polina Alexandrovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Foundations of Electrical
Engineering»,
Senior Lecturer,
e-mail: polina_buteneva@mail.ru

А. С. Маниковский, Д. А. Яковлев, А. Ю. Мухопад

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. Эффективное управление энергетическим комплексом железнодорожного транспорта требует оперативной обработки больших объемов информации, поступающих из автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии. Прогнозные оценки составляют базовую информацию для принятия решений о планировании электропотребления. Точность прогнозов потребления электроэнергии определяет эффективность управления энергетическим комплексом железнодорожного транспорта и обеспечивает экономию электроэнергии и снижение затрат на ее приобретение, поскольку правилами функционирования энергорынков установлена обязанность потребителей по точному планированию объемов электропотребления. Таким образом, актуальность работы заключается в повышении точности методов прогнозирования потребления электрической энергии с применением современных технологий обработки информации, предоставляющих диспетчерскому персоналу возможность выбора и реализации выданных системой эффективных алгоритмов планирования потребления электроэнергии, что позволит существенно улучшить качество управления электропотреблением электроустановок на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: прогнозирование электропотребления, управление электропотреблением, нейронная сеть, управляющий автомат, тяга поездов.

Для цитирования: Маниковский, А. С. Повышение точности методов прогнозирования электропотребления в системе управления электроснабжением железнодорожного транспорта / А. С. Маниковский, Д. А. Яковлев, А. Ю. Мухопад // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 87–93. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_87.

Введение

Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) ОАО «РЖД» функционирует для получения данных о фактическом потреблении электроэнергии по группам точек поставки с целью организации измерений параметров потребления электрической энергии по тяговым подстанциям, точки измерений которых входят в данную систему, и проведения финансовых расчетов на оптовом и розничном рынках электроэнергии.

Удовлетворение потребностей ОАО «РЖД» в электрической энергии (ЭЭ) осуществляет филиал компании – Трансэнерго (НТЭ). Помимо этого, реализуется деятельность по передаче ЭЭ и сторонним потребителям. Кроме того, НТЭ осуществляет эксплуатацию и техническое обслуживание энергетической инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Величина планируемого электропотребления (ЭП) определяется исходя из прогноза объемов перевозок на предстоящий период, которые формирует служба экономики и финансов железной дороги. В части планирования, как правило, подаются договорные объемы потребления на предстоящий период (на год) с помесечной детализацией. Сформированные региональными подразделениями заявки на планируемую величину электропотребления передаются в головной офис «Трансэнерго». Дальнейшее взаимодействие НТЭ с основным поставщиком электрической энергии – ООО «Русэнергосбыт» – реализуется в рамках договора электроснабжения. Оплата за поставленные объемы электроэнергии осуществляется от фактических объемов потребления в рамках ценовых зон.

Основная часть

При планировании объемов будущего электропотребления отделом покупки и распределения электроэнергии «Трансэнерго» используются разные виды прогнозов по времени упреждения.

Долгосрочное планирование необходимо для анализа пропускной и провозной способности магистрали, а также для определения ограничений энергетической инфраструктуры при увеличении объема перевозок. Это позволяет рассчитать необходимые объемы реконструкции и модернизации суще-

ствующей системы тягового электроснабжения. Горизонт планируемых объемов потребления электроэнергии при долгосрочном прогнозировании может составлять от трех до десяти лет. Среднесрочные прогнозы используются для формирования договорной заявки на величину электропотребления на предстоящий период (один год). Краткосрочные прогнозы необходимы для ежемесячной детализации договорных объемов электропотребления, а также при оплате за электроэнергию на месяц вперед.

Ко всем вышеперечисленным видам прогнозирования предъявляются высокие требования в отношении их точности. Однако особое внимание уделяется краткосрочным прогнозам. ОАО «РЖД» резервирует денежные средства для оплаты электроэнергии за последующий месяц, поэтому необходимо максимально точно предсказать величину потребления ЭЭ в этом периоде. В случае отклонения прогнозной величины от фактической более чем на 5 % предприятие несет дополнительные издержки.

При построении прогнозов в ОАО «РЖД» используется метод экспертных оценок. Эксперт, исходя из личного опыта, текущего состояния энергетической инфраструктуры, а также планируемых объемов перевозок на предстоящий период, определяет величину будущего электропотребления. Данный метод показывает приемлемые результаты в случаях, когда прогнозируемые процессы хорошо идентифицируются и в высокой степени предсказуемы. Однако условия работы железнодорожного транспорта характеризуются неравномерностью загрузки системы по времени и сложностью условий эксплуатации, что затрудняет формирование полной исходной базы данных, которая дает информацию об исследуемом объекте [1]. Для тягового электропотребления, которое составляет 85 % от общего электропотребления ОАО «РЖД», характерны скачкообразные изменения объемов потребления ЭЭ, отсутствие регулярной зависимости от дней недели, времени суток или других периодов. Все эти факторы осложняют процесс прогнозирования ЭП и, как следствие, процесс управления энергетическим комплексом предприятия.

Эффективным способом прогнозирования электропотребления в настоящее время являются нейронные сети (НС) [2, 3]. Применение таких прогностических моделей позволяет планировать величину ЭП с высокой точностью, что обусловлено способностью НС анализировать большой объем информации, обобщать и выделять скрытые взаимосвязи входных и выходных значений [4].

Имея неоспоримые преимущества над традиционными вычислениями, НС не являются идеальным решением. Вычисляя результат по конкретному набору исходных данных, нейронные сети не учитывают динамику этих данных и их изменение. При составлении прогнозов будущего ЭП помимо мгновенных входных данных требуется анализ предыстории возникновения таких данных. Для этой цели авторами предлагается использовать управляющие автоматы (УА).

Управляющие автоматы производят предварительную обработку данных – выделяют параметры, которые видны только при обзоре всей динамики происходящих процессов. УА анализируют динамику изменения временного ряда ЭП и динамику изменения влияющих факторов. Затем эти параметры обрабатываются нейронной сетью. Таким образом, на входной слой НС поступают не конкретные значения электропотребления, а выделенные характеристики значений, по которым производится прогноз [5]. На рис. 1 приведена схема синтеза НС и УА.

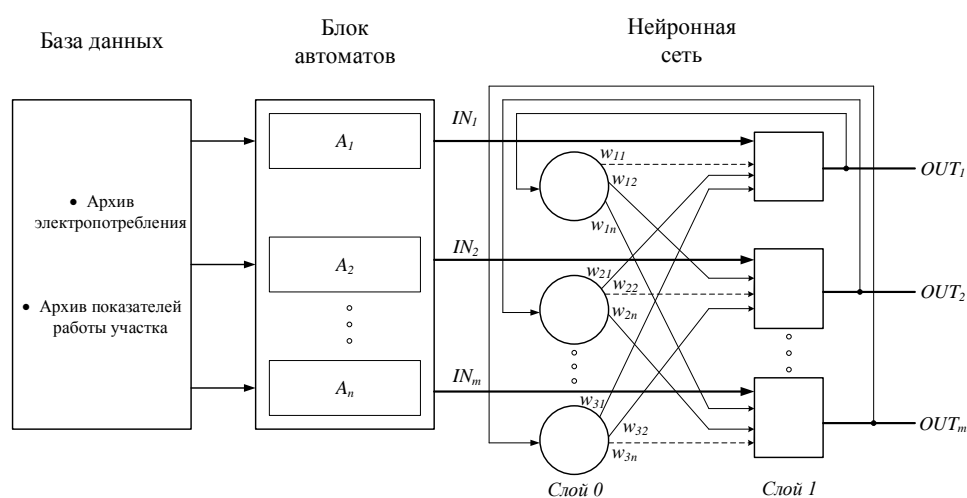


Рис. 1. Схематическое изображение взаимодействия НС и УА

Для выполнения предварительного анализа временного ряда используется разработанный управляющий автомат с контролем состояний. Предложенная методология синтеза определила возможность создания оригинальной структуры управляющего автомата, обеспечивающая снижение затрат на комбинационную схему в сравнении с известными УА со структурной организацией Мура и Мили [6, 7].

На рис. 2 представлена структурная схема предлагаемой методики прогнозирования с использованием нейронной сети и управляющего автомата.

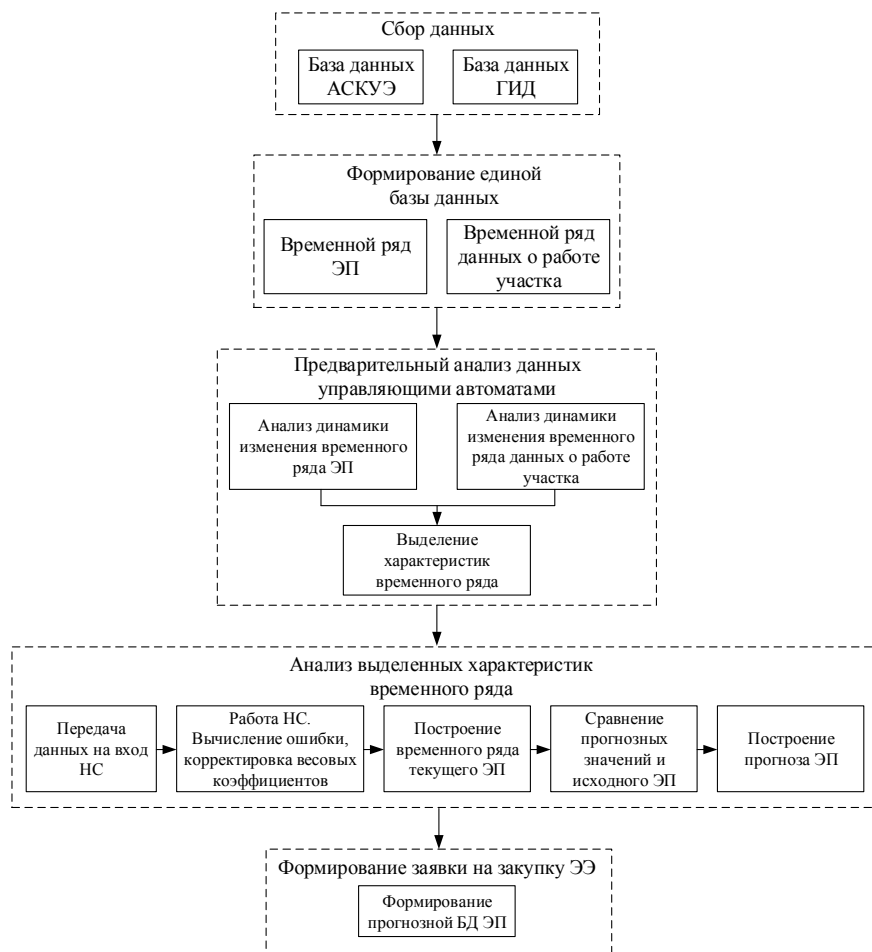


Рис. 2. Структурная схема предлагаемой модели прогнозирования

Внешняя среда для задачи прогнозирования формируется из архивов электропотребления и данных о работе участка [8], получаемых из АСКУЭ и ГИД «УРАЛ-ВНИИЖТ». По окончании сбора данных производится их предварительный анализ при помощи управляющих автоматов: выделение характеристик временного ряда, таких как тренд, сезонность и случайные возмущения. Затем выделенные характеристики временного ряда подаются на входы нейронной сети, которые анализируются ею. Далее происходит построение временного ряда, текущего ЭП, который сравнивается с реальными показателями величины ЭП. Если уровень ошибки не превышает допустимых значений, то происходит построение прогноза потребления ЭЭ для заданного периода упреждения. В противном случае производится диагностика системы на каждом этапе работы предлагаемой методики: проверка работоспособности УА и НС и проверка корректности исходных данных.

Результаты эксперимента

Апробация методики была произведена на примере работы тяговой подстанции Белогорск Забайкальской железной дороги, где было проведено прогнозирование ЭП. Исходными данными послужил архив электропотребления за 2022 г., горизонт прогноза составил 24 часа. На рис. 3 приведены результаты сравнения фактического ЭП с прогнозами нейронных сетей и комбинации НС и УА по предложенной методике.

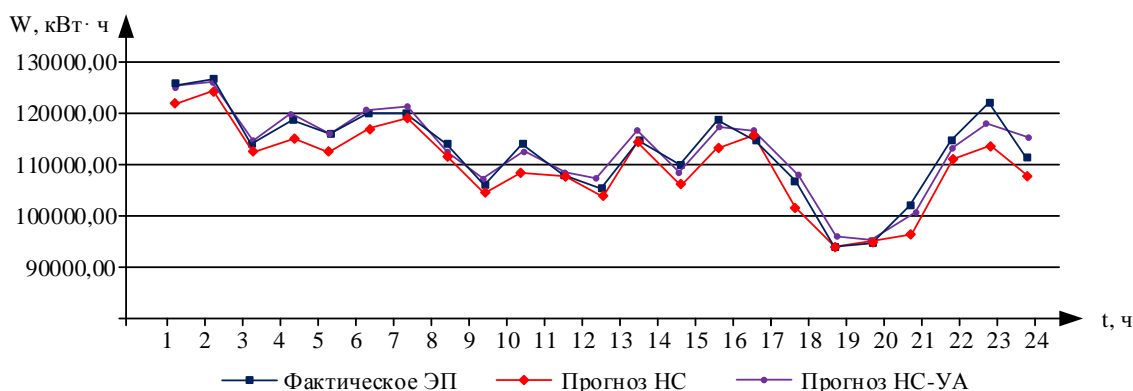


Рис. 3. Сравнение фактического ЭП с прогнозными значениями

При прогнозировании методом, основанным на работе только нейронной сети, величина отклонений составила 6,8 %. Временной ряд, построенный с применением предложенной методики, более точно описывает временной ряд фактического ЭП, а величина отклонений составляет 3 %, что свидетельствует о ее работоспособности.

На рис. 4 представлена предлагаемая структурная схема методики поддержки принятия решения для формирования заявки прогнозной величины потребления электроэнергии. Система автоматически получает данные по ЭП для заданных участков железных дорог, соответствующих группам точек поставки. Затем данные загружаются в базу данных, и по определенному алгоритму строится прогноз почасового ЭП для всех групп точек поставки ЭЭ. Полученные прогнозные величины поступают диспетчерскому персоналу «Трансэнерго». Система предоставляет возможность персоналу формировать прогноз ЭП в полуавтоматическом экспертном режиме, меняя параметры алгоритма прогнозирования, а именно глубину ретроспективных данных, весовые коэффициенты, коэффициенты, отражающие изменение потребления, связанное с увеличениями или уменьшениями объема работы участка. В результате система строит прогноз почасового потребления электрической энергии по скорректированному алгоритму.

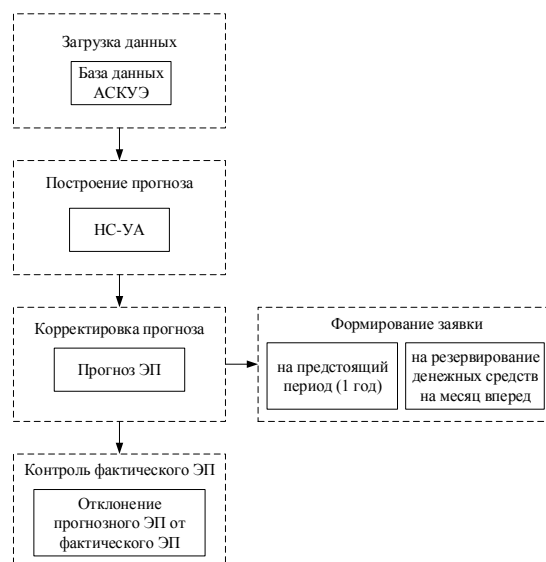


Рис. 4. Методика принятия решения

Во время работы система обеспечивает диспетчерский контроль фактического ЭП и расхождения с прогнозным с учетом штрафных санкций. В процессе работы рассчитывается стоимость потребленной электроэнергии по объектам учета железной дороги и штрафов за отклонения, а также оценивается эффективность функционирования системы. Диспетчер может проводить анализ потребления ЭЭ с отображением соответствующих графиков планового и фактического потребления за любой прошедший период.

Вывод

Таким образом, предлагаемые методика взаимодействия НС и УА и алгоритм принятия управленческих решений позволят повысить точность и скорость прогнозирования ЭП. В свою очередь, повышение точности прогнозирования потребления электроэнергии позволит уменьшить затраты на приобретение ЭЭ и существенно улучшить качество управления электропотреблением электроустановок [9, 10] на железнодорожном транспорте.

Список литературы

- 1 **Осипова, В. Э.** Применение нейросетевых методов прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте / В. Э. Осипова, Д. А. Яковлев // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2022. – Т. 18, № 1. – С. 107–118. – DOI 10.25559/SITITO.18.202201.107-118.
- 2 **Староверов, Б. А.** Схемы взаимодействия поставщиков и получателей прогнозов электропотребления на основе использования нейросетевой информационной системы / Б. А. Староверов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1 (48). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4784 (дата обращения: 29.11.2024).
- 3 **Кретов, Д. А.** Прогнозирование электропотребления энергосбытовой компании с использованием искусственной нейронной сети / Д. А. Кретов, Р. В. Рузанов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2–1 (35). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2880 (дата обращения: 29.11.2024).
- 4 Использование рекуррентных сетей для прогнозирования потребления электроэнергии / С. Л. Подвальный, М. А. Лихотин, А. В. Михайлулов, А. К. Донских // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 45–50. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.005.
- 5 **Маниковский, А. С.** Автоматизация процесса прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте с применением управляющего автомата / А. С. Маниковский, Д. А. Яковлев, А. Ю. Мухопад // Известия Транссиба. – 2024. – № 3 (59). – С. 128–136. – ISSN 2220-4245.
- 6 Структурная организация управляющих автоматов вычислительных и информационно-измерительных систем / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов, А. С. Маниковский // Автотриета. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 65–73. – DOI 10.15372/AUT20210408.
- 7 **Патент № 2793301 С1.** Российская Федерация, МПК G11C 11/00. Управляющий автомат с контролем состояний / А. Ю. Мухопад, А. С. Маниковский. – № 2022118502 ; заявл. 05.07.2022 ; опублик. 31.03.2023. – EDN ОААКОК.

References

- 1 **Osipova, V. E.** Application of neural network methods for predicting power consumption in railway transport / V. E. Osipova, D. A. Yakovlev // Modern information technologies and IT-education. – 2022. – Vol. 18, No. 1. – P. 107–118. – DOI 10.25559/SITITO.18.202201.107-118.
- 2 **Staroverov, B. A.** Ways of interaction between providers and consumers of forecasts of electrical power consumption based on the use of a neural network information system / B. A. Staroverov, I. V. Semenov // Engineering Journal of Don. – 2018. – No. 1 (48). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4784 (date of access: 11/29/2024).
- 3 **Kretov, D. A.** Forecasting the electricity consumption of an energy supply company using an artificial neural network / D. A. Kretov, R. V. Ruzanov // Engineering Journal of Don. – 2015. – No. 2–1 (35). — URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2880 (date of access: 11/29/2024).
- 4 Using recurrent networks to predict electricity consumption / S. L. Podvalny, M. A. Likhotin, A. V. Mikhailusov, A. K. Donskikh // The Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2022. – Vol. 18, No. 3. – P. 45–50. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.005.
- 5 **Manikovskiy, A. S.** Automation of the process of forecasting power consumption in railway transport using a control automaton / A. S. Manikovskiy, D. A. Yakovlev, A. Yu. Mukhopad // Journal of Transsib Railway Studies. – 2024. – No. 3 (59). – P. 128–136. – ISSN 2220-4245.
- 6 The structural organization of control automata for computing and information-measuring systems / Yu. F. Mukhopad, A. Yu. Mukhopad, D. Ts. Punsyk-Namzhilov, A. S. Manikovskiy // Avtometriya. – 2021. – Vol. 57, No. 4. – P. 388–395. – DOI 10.3103/S8756699021040087.
- 7 **Patent No. 2793301 C1.** Russian Federation, IPC G11C 11/00. Control automaton with state monitoring / A. Yu. Mukhopad, A. S. Manikovskiy. – No. 2022118502 ; declared 05.07.2022 ; publ. 31.03.2023. – EDN ОААКОК.

8 **Шурова, Н. К.** Применение программного комплекса MATLAB к прогнозированию электропотребления на тягу поездов / Н. К. Шурова, В. Н. Ли // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2021. – № 3 (28). – С. 43–49. – EDN GVGLRN.

9 **Дзгоев, А. Э.** Разработка методов краткосрочного и оперативного прогнозирования электропотребления в системе управления электроснабжением региона : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.01 / Дзгоев Алан Эдуардович. – Владикавказ, 2011. – 157 с. – EDN QFFRTR.

10 **Митрофанов, А. Н.** Прогнозирование и управление электропотреблением тяги поездов : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.07 / Митрофанов Александр Николаевич. – Самара, 2006. – 501 с. – EDN NOHBVD.

8 **Shurova, N. K.** Application of the MATLAB software package to forecasting power consumption for hauling operations / N. K. Shurova, V. N. Li // Transport of the Asia-Pacific region. – 2021. – No. 3 (28). – P. 43–49. – EDN GVGLRN.

9 **Dzgoev, A. E.** Development of methods for short-term and operational forecasting of electricity consumption in the power supply management system of the region : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.13.01 / Dzgoev Alan Eduardovich. – Vladikavkaz, 2011. – 157 p. – EDN QFFRTR.

10 **Mitrofanov, A. N.** Forecasting and management of electric consumption of train traction : dissertation for the degree of doctor of technical sciences : 05.22.07 / Mitrofanov Alexander Nikolaevich. – Samara, 2006. – 501 p. – EDN NOHBVD.

A. S. Manikovskiy, D. A. Yakovlev, A. Yu. Mukhopad

IMPROVING THE ACCURACY OF METHODS FOR FORECASTING POWER CONSUMPTION IN THE RAILWAY POWER SUPPLY MANAGEMENT SYSTEM

Abstract. Effective management of the energy complex of railway transport requires the prompt processing of large amounts of information coming from an automated commercial electricity metering system. Forward-looking estimates provide basic information for decision-making on power consumption planning. The accuracy of forecasts of electricity consumption determines the efficiency of managing the energy complex of railway transport, as well as ensures savings of electric energy and reduction of costs for its purchase, since the rules of operation of energy markets establish the obligation of consumers to accurately plan the volume of electricity consumption. Thus, the relevance of the work lies in improving the accuracy of methods for predicting electric energy consumption using modern information processing technologies, which provide dispatching personnel with the opportunity to select and implement effective algorithms for planning electricity consumption issued by the system, which will significantly improve the quality of power consumption management of electrical installations in railway transport.

Keywords: power consumption forecasting, power consumption management, neural network, control automaton, train traction.

For citation: Manikovskiy, A. S. Improving the accuracy of methods for forecasting power consumption in the railway power supply management system / A. S. Manikovskiy, D. A. Yakovlev, A. Yu. Mukhopad // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 87–93. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_87.

Сведения об авторах

Маниковский Андрей Сергеевич
Забайкальский институт
железнодорожного транспорта – филиал
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный
университет путей сообщения»
(ЗабИЖТ ИрГУПС),
кафедра «Электроснабжение»,
старший преподаватель,
e-mail: andrey-18@mail.ru

Information about the authors

Manikovskiy Andrey Sergeevich
Zabaikalsk Rail Transport Institute,
Branch of Irkutsk State Transport University
(ZRTI IrSTU),
Chair «Power Supply»,
Senior Lecturer,
e-mail: andrey-18@mail.ru

Яковлев Дмитрий Александрович

Забайкальский институт
железнодорожного транспорта – филиал
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный
университет путей сообщения»
(ЗабИЖТ ИрГУПС),
кафедра «Электроснабжение»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: d5028280@mail.ru

Мухопад Александр Юрьевич

Иркутский государственный университет
путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Автоматизация
производственных процессов»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: jcmg@mail.ru

Yakovlev Dmitriy Aleksandrovich

Zabaikalsk Rail Transport Institute,
Branch of Irkutsk State Transport University
(ZRTI IrSTU),
Chair «Power Supply»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: d5028280@mail.ru

Mukhopad Aleksandr Yurievich

Irkutsk State Transport University (IrSTU),
Chair «Automation of Production Processes»,
Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
e-mail: jcmg@mail.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 519.873

DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_94

*В. А. Гончаренко, А. Д. Хомоненко, Р. Абу Хасан, С. Г. Ермаков, В. А. Ходаковский***К ОЦЕНКЕ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ И УПРАВЛЕНИЮ КОНФИГУРАЦИЕЙ
RAID-МАССИВОВ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА**

Аннотация. Цель исследования заключается в разработке методики оценки надежности систем хранения данных, использующих RAID-массивы, на основе математического аппарата нечеткого вывода. Методика позволяет учитывать различные аспекты надежности, в том числе восстанавливаемость и резервируемость, а также адаптироваться к неопределенностям данных, что делает подход гибким и точным. Научная новизна работы состоит в применении нечеткого вывода для оценки надежности систем с RAID-массивами. В отличие от классических методов, предлагаемый подход позволяет учитывать неопределенности, опираясь на экспертные знания и лингвистические переменные. Практическая значимость исследования определяется программной реализацией метода оценки надежности и управления конфигурацией систем, использующих RAID-системы, что способствует снижению вероятности отказов и потери данных. Основным результатом работы является успешная реализация алгоритма оценки надежности с использованием нечеткой логики в среде MATLAB, демонстрирующая возможность точной оценки уровня надежности и управления конфигурацией информационных систем с RAID-массивами с учетом неопределенности параметров и реальных условий эксплуатации.

Ключевые слова: оценка уровня надежности, система хранения данных, RAID-массивы, зеркалирование накопителей, нечеткая логика, неопределенность, информационная система, управление конфигурацией.

Для цитирования: К оценке уровня надежности и управлению конфигурацией RAID-массивов системы хранения данных на основе нечеткого вывода / В. А. Гончаренко, А. Д. Хомоненко, Р. Абу Хасан [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 94–106. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_94.

Введение

В современном информационном мире оценка надежности информационных систем является одним из ключевых параметров их работы [1]. Особенно это актуально для систем, использующих RAID (Redundant Array of Independent Disks – избыточный массив независимых дисков) [2], где данные хранятся и обрабатываются в режиме реального времени. RAID-массив обеспечивает повышенную отказоустойчивость и производительность за счет объединения нескольких физических дисков в единую логическую структуру [3]. Оценка надежности таких систем позволяет предотвращать потенциальные сбои, минимизировать риски потери данных и обеспечивать непрерывную работу бизнес-процессов. Поэтому разработка эффективной методики оценки надежности информационных систем с RAID-массивами имеет важное практическое значение для обеспечения стабильности и безопасности информационной инфраструктуры предприятий и организаций.

Оценка надежности таких систем остается сложной задачей [4]. Традиционные методы, основанные на классической вероятностной теории, не всегда могут адекватно учитывать все факторы, влияющие на надежность, такие как разнообразные условия эксплуатации и характерные для реальных систем неопределенности [5]. В этом контексте использование нечеткой логики для оценки надежности RAID-массивов представляется перспективным направлением, способным повысить точность и надежность оценок.

Статья посвящена разработке методики оценки надёжности информационных систем с RAID-массивами на основе математического аппарата нечеткого вывода. Основная цель исследования заключается в создании инструмента, позволяющего учитывать неопределённости и другие факторы,

влияющие на надёжность систем, обрабатывающих большие объёмы данных в режиме реального времени. Данная методика позволит учитывать разнообразные факторы и неопределённости, присущие реальным условиям эксплуатации, и обеспечит более точную и надёжную оценку вероятности отказа системы.

В современных информационных системах, особенно тех, которые работают с большими объёмами данных, надёжность является критически важным фактором. RAID-массивы предлагают решения для повышения отказоустойчивости и производительности, но они также подвержены различным рискам. Проблема точной оценки надёжности в условиях неопределённости делает данное исследование актуальным и востребованным.

Научная новизна заключается в использовании нечеткого вывода для оценки надёжности информационных систем с RAID-массивами. В отличие от классических методов оценки, которые часто не учитывают неопределённость и нечеткость в данных, нечеткая логика позволяет учесть различные аспекты надёжности системы, основываясь на экспертных знаниях и нечетких оценках критериев. Это делает наш подход более гибким и адаптивным к изменяющимся условиям работы информационных систем.

Применение RAID-массивов для повышения надёжности систем хранения данных

RAID – это технология, которая объединяет несколько физических дисков в единую логическую структуру с целью повышения производительности, отказоустойчивости и улучшения доступности данных [6, 7]. RAID-массивы используются в современных системах хранения данных для повышения надёжности и производительности. С помощью RAID можно объединять несколько жестких дисков в один логический блок, что обеспечивает защиту данных и улучшает скорость их обработки. Надёжность массива определяется его способностью выдерживать отказ одного или нескольких дисков без потери данных [8].

Варианты RAID различаются по способам записи и хранения данных, уровню избыточности и отказоустойчивости. Рассмотрим основные и расширенные типы RAID-массивов с учетом характеристик их надёжности.

1 **RAID 0**: основная цель – повышение производительности. Данные разбиваются на блоки и распределяются по нескольким дискам без избыточности. Выход из строя любого диска приводит к полной потере данных, что делает RAID 0 наименее надёжным.

2 **RAID 1**: обеспечивает зеркалирование, дублируя данные на двух или более дисках. Это гарантирует высокую надёжность, поскольку данные остаются доступными в случае отказа одного из дисков.

3 **RAID 10 (1+0)**: сочетает в себе зеркалирование (RAID 1) и чередование (RAID 0). Данные сначала зеркалируются, затем разбиваются на блоки и распределяются по дискам. Способен выдержать выход из строя одного диска в каждом зеркальном наборе, обеспечивая баланс между производительностью и надёжностью.

4 **RAID 5**: данные и паритетная информация распределяются по всем дискам. Это позволяет восстановить данные в случае выхода из строя одного диска, обеспечивая отказоустойчивость и высокую производительность.

5 **RAID 6**: Расширяет RAID 5 за счет использования двойного паритета, что позволяет сохранить данные при отказе двух дисков, обеспечивая высокую надёжность.

6 **RAID 01 (0+1)**: обратная конфигурация по сравнению с RAID 10. Сначала данные распределяются по нескольким дискам, а затем эти наборы зеркалируются. RAID 01 менее надёжен, чем RAID 10, так как в случае выхода из строя одного диска во всём зеркальном наборе он становится неработоспособным.

7 **RAID 1E**: вариант, в котором данные чередуются и зеркалируются одновременно. Существует два подтипа:

RAID 1E Near (полосатый): использует метод, при котором данные распределяются и зеркалируются по дискам в пределах полосы, что повышает производительность и сохраняет надёжность.

RAID 1E с чередованием: в этом методе зеркалирование выполняется на уровне блоков, обеспечивая высокую степень отказоустойчивости.

8 **RAID 7**: проприетарный и высокопроизводительный вариант, похожий на RAID 5, но использующий асинхронный ввод-вывод и кэширование. Обеспечивает улучшенное управление диспетчеризацией данных и высокую производительность.

9 **RAID DP (двойная четность)**: представляет собой расширение RAID 6 с дополнительными мерами отказоустойчивости, позволяющими справляться с отказом более чем двух дисков. Обеспечивает чрезвычайно высокую надежность благодаря двойному уровню четности.

10 **RAID 51**: комбинация RAID 5 и RAID 1. Данные сначала записываются в формате RAID 5, затем эти массивы зеркалируются. Обеспечивает высокую отказоустойчивость и хорошую производительность при работе с большими объемами данных.

11 **RAID 5E и RAID 5EE**: варианты RAID 5 с включением «горячих» резервных дисков.

RAID 5E: в массив добавляется один или несколько дополнительных дисков для ускорения восстановления после сбоя.

RAID 5EE: похож на RAID 5E, но резервные диски распределены равномерно по массиву, что повышает производительность и отказоустойчивость.

С точки зрения надёжности и производительности RAID-массивы можно упорядочить следующим образом: RAID 0, RAID 01, RAID 1, RAID 1E, RAID 10, RAID 5, RAID 5E, RAID 5EE, RAID 6, RAID 7, RAID 51, RAID DP.

Численные характеристики различных RAID-массивов

Важно отметить, что высокая надежность часто достигается за счет уменьшения общего объема доступного пространства для хранения данных и/или увеличения стоимости, так как требуется больше дисков для реализации избыточности. Для упрощения обсуждения приведем типовые характеристики для RAID-массивов, исходя из использования однотипных дисков емкостью XXX терабайт каждый и стоимостью YYY долларов за диск.

Среднее время безотказной работы (Mean Time Before Failure – MTBF) для современных жестких дисков обычно составляет около 1,000,000 часов. Однако надежность RAID массива зависит не только от MTBF отдельных дисков, но и от количества дисков в массиве и алгоритма RAID.

Учитывая это, абсолютно точные численные выражения надежности сложно представить без конкретных данных и спецификаций, поэтому приведем общие соображения.

Для анализа RAID-массивов приведем таблицу, в которой указаны основные характеристики, такие как количество дисков, общий объем памяти, стоимость хранения данных, MTBF и числовое значение надежности.

Характеристики основных типов RAID-массивов

Тип RAID	Количество дисков	Общий объем памяти (ТБ)	Стоимость хранения данных (USD)	MTBF (часов)	Надежность
0	N	$N \cdot X$	$N \cdot Y$	1000000	Низкая, выход любого диска приводит к потере всех данных
1	2	X	$2 \cdot Y$	1000000	Высокая, 1 диск может выйти из строя
10	$2N$	$N \cdot X$	$2N \cdot Y$	1000000	Очень высокая, 1 диск в каждом зеркальном наборе может выйти из строя
5	N	$(N-1) \cdot X$	$N \cdot Y$	1000000	Средняя, 1 диск может выйти из строя
6	N	$(N-2) \cdot X$	$N \cdot Y$	1000000	Высокая, 2 диска могут выйти из строя

Примечания к таблице:

1 **Объем памяти**: В RAID 0 весь объем доступен, в RAID 1 – это объем одного диска, в RAID 10 доступный объем аналогичен RAID 1, RAID 5 и RAID 6 используют паритет, уменьшая объем.

2 **Стоимость хранения**: Для RAID 0, 5 и 6 рассчитывается как произведение количества дисков на стоимость одного диска. В RAID 1 и RAID 10 требуется минимум два диска, что увеличивает стоимость.

3 **MTBF (Mean Time Between Failures):** Предполагается, что для всех массивов MTBF дисков составляет 1,000,000 часов. Фактическое время между отказами RAID-массива зависит от количества дисков и типа RAID.

4 **Надежность:** Надежность RAID-массива зависит от MTBF и конфигурации. RAID 0 имеет низкую надежность, тогда как RAID 1, RAID 10, RAID 5 и RAID 6 [9] обеспечивают различный уровень надежности, позволяя выдерживать отказ одного или более дисков.

Характеристики RAID-массивов позволяют лучше понять различия между конфигурациями и сделать обоснованный выбор в зависимости от требований к надежности и стоимости. Технология RAID является важным инструментом для обеспечения безопасности данных в современных системах хранения, и выбор подходящей конфигурации RAID может существенно повлиять на общую производительность и надежность информационной системы.

Методика оценки надежности RAID-массивов с использованием нечеткой логики

Нечеткая логика является математической теорией, которая позволяет моделировать и оперировать нечеткими или неопределенными данными [10, 11]. Основные концепции нечеткой логики включают в себя понятия нечеткого множества, функции принадлежности и правил вывода.

Нечеткое множество: множество, элементы которого имеют различные степени принадлежности к нему. В отличие от классических бинарных множеств, где элемент либо принадлежит множеству, либо нет, в нечетких множествах элемент может принадлежать к нему частично.

Функция принадлежности: определяет степень принадлежности элемента к нечеткому множеству. Она обычно принимает значения в интервале от 0 до 1, где 0 означает полное отсутствие принадлежности, а 1 – полную принадлежность.

Правила вывода: используются для принятия решений на основе нечетких данных. Правила вывода формулируются в форме «если – то», исходя из определенных условий, и выводят определенные действия или решения.

Методика оценки надежности RAID-массивов с использованием нечеткой логики представляет собой систему оценки, которая учитывает разнообразные аспекты надежности системы, такие как восстанавливаемость, резервируемость, отказы и система защиты, с учетом неопределенности в данных. Подход основан на принципах нечеткой логики, которая позволяет работать с нечеткими или неопределенными значениями, что делает оценку более гибкой и адаптивной к различным условиям.

Основные этапы методики оценки надежности RAID-массивов с использованием нечеткой логики включают:

1 **Построение модели нечеткой логики:** на этом этапе определяются входные и выходные переменные, которые влияют на надежность RAID-массивов. Входные переменные могут включать такие параметры, как тип RAID-массива, количество дисков, процент загрузки и т.д. Выходная переменная представляет собой оценку надежности системы. Создаются функции принадлежности для каждой переменной, определяющие степень принадлежности каждого значения к нечеткому множеству.

2 **Формулирование правил вывода:** на основе экспертных знаний и анализа предметной области формулируются правила, определяющие логику оценки надежности системы. Эти правила обычно составляются в форме «если – то» и содержат в себе условия и действия для определенных ситуаций.

3 **Применение нечеткой функции для оценки надежности:** с помощью определенных правил и функций принадлежности осуществляется оценка надежности RAID-массивов. Каждое правило применяется к входным данным, и на основе нечеткой логики производится расчет выходного значения, представляющего оценку надежности системы [8].

4 **Анализ результатов:** полученные оценки могут быть проанализированы и интерпретированы для принятия решений об улучшении надежности системы. Это может включать в себя изменения в конфигурации RAID-массива, внедрение дополнительных механизмов защиты данных или улучшение процессов обслуживания и мониторинга.

Методика оценки надежности RAID-массивов с использованием нечеткой логики предоставляет гибкий и адаптивный подход к оценке надежности системы, который учитывает неопределенность в данных и позволяет получать более точные результаты, адекватно отражающие реальные условия работы системы.

На рис. 1. представлена методика оценки надежности RAID-массивов с применением нечеткой логики.

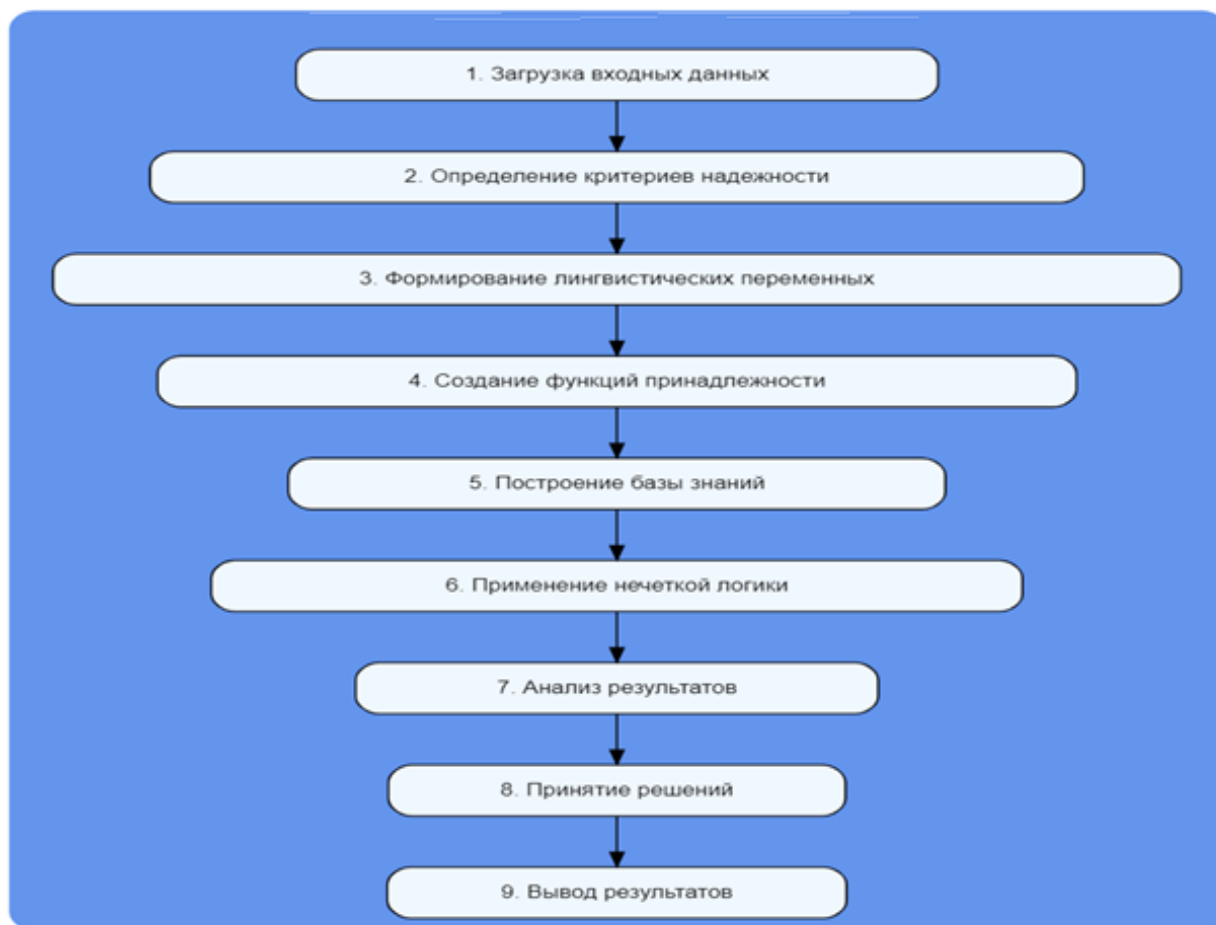


Рис. 1. Методика оценки надежности RAID-массивов с использованием нечеткой логики

Реализация алгоритма нечеткого вывода в среде Matlab

Для реализации методики оценки надежности RAID-массивов на основе нечеткой логики в среде Matlab необходимо использовать пакет **Fuzzy Logic Toolbox** [12–14]. Этот инструмент позволяет эффективно моделировать и анализировать неопределенности, что делает его идеальным для задач, связанных с оценкой надежности систем хранения данных.

Основные шаги реализации методики

1 Определение переменных: Определим входные и выходные переменные для системы. Входные переменные могут включать параметры, такие как количество дисков, объем памяти, стоимость и MTBF. Выходная переменная будет представлять собой оценку надежности массива.

2 Создание нечетких множеств: Для каждой входной переменной разработаем нечеткие множества. Например, для входной переменной «количество дисков» можно выделить категории: «малое количество», «умеренное количество» и «большое количество».

3 Формулирование правил: Сформулируем правила нечеткого вывода, связывающие входные переменные с выходной.

- Если количество дисков «малое», то надежность «низкая».
- Если MTBF «высокий» и стоимость «умеренная», то надежность «высокая».

4 Создание системы нечеткого вывода: Используя Fuzzy Logic Toolbox, создаем систему нечеткого вывода (FIS).

5 Агрегация и дефазификация: После подачи входных данных в систему, FIS произведет агрегацию значений и выполнит дефазификацию.

6 Визуализация результатов: Используются графические функции Matlab для отображения нечетких множеств и оценок надежности.

% Создание нечеткой системы (FIS)

```
fis = mamfis('Name', 'RAID Reliability Assessment');
```

% Определение входной переменной: Количество дисков

```

fis = addInput(fis, [0 10], 'Name', 'NumberOfDisks');
fis = addMF(fis, 'NumberOfDisks', 'trapmf', [0 0 2 4], 'Name', 'Low');
fis = addMF(fis, 'NumberOfDisks', 'trapmf', [3 5 7 9], 'Name', 'Medium');
fis = addMF(fis, 'NumberOfDisks', 'trapmf', [8 10 10 10], 'Name', 'High');
% Определение входной переменной: MTBF
fis = addInput(fis, [0 2000000], 'Name', 'MTBF');
fis = addMF(fis, 'MTBF', 'trapmf', [0 0 500000 1000000], 'Name', 'Low');
fis = addMF(fis, 'MTBF', 'trapmf', [500000 1000000 1500000 2000000], 'Name', 'Medium');
fis = addMF(fis, 'MTBF', 'trapmf', [1500000 2000000 2000000 2000000], 'Name', 'High');
% Определение выходной переменной: Надежность
fis = addOutput(fis, [0 1], 'Name', 'Reliability');
fis = addMF(fis, 'Reliability', 'trapmf', [0 0 0.3 0.5], 'Name', 'Low');
fis = addMF(fis, 'Reliability', 'trapmf', [0.4 0.6 0.7 0.9], 'Name', 'Medium');
fis = addMF(fis, 'Reliability', 'trapmf', [0.8 1 1 1], 'Name', 'High');
% Определение правил
ruleList = [
    1 1 1 1 1; % If NumberOfDisks is Low and MTBF is Low then Reliability is Low
    2 2 2 1 1; % If NumberOfDisks is Medium and MTBF is Medium then Reliability is Medium
    3 3 3 1 1; % If NumberOfDisks is High and MTBF is High then Reliability is High
];
fis = addRule(fis, ruleList);
% Ввод данных для оценки надежности
numberOfDisks = 4; % Пример: количество дисков
mtbf = 800000; % Пример: время безотказной работы в часах
% Оценка надежности
inputValues = [numberOfDisks, mtbf];
reliability = evaluate(fis, inputValues);
% Отображение результата
fprintf('Оценка надежности RAID-массива: %.2f\n', reliability);

```

После выполнения скрипта в MATLAB будет выведено следующее сообщение:
Оценка надежности RAID-массива: 0.62

Такая оценка надежности RAID-массива в 62 % указывает на то, что RAID-массив с заданными параметрами имеет среднюю (умеренную) надежность. Это важный показатель при оценке устойчивости системы хранения данных.

Таким образом, использование Fuzzy Logic Toolbox в MATLAB показывает, как можно эффективно моделировать и анализировать систему RAID с учетом входных переменных, таких как количество дисков, MTBF и других, с помощью нечеткой логики. Приведенный пример показывает процесс создания и тестирования системы нечеткого вывода. Преимущество методики заключается в учёте большего количества факторов, чем в классических подходах, однако ограничения связаны с возможной сложностью настройки и необходимостью экспертных знаний для определения функций принадлежности.

Управление выбором конфигурации RAID-массивов системы хранения данных в интересах обеспечения требуемого уровня надежности при ограничениях на стоимость

Управление выбором конфигурации RAID-массивов с использованием нечеткой логики позволяет учесть неоднозначности и неточности, присущие оценке надежности и стоимости. Нечеткая логика предоставляет инструменты для учета мягких (нежестких) ограничений и понимания таких понятий, как «высокая надежность» или «низкая стоимость», через функции принадлежности.

Этапы управления выбором конфигурации RAID:

1 Определение целей и критериев: Основными критериями выбора конфигурации RAID-массива являются его надежность и стоимость. Цель – найти такое сочетание, которое обеспечит требуемую надежность при минимальной стоимости.

2 Формализация входных параметров: Определение входных параметров – метрик, которые будет оценивать система. Это может быть, например, вероятность отказа, коэффициент доступности, и верхний предел стоимости.

3 **Проектирование функций принадлежности:** Каждый уровень надежности может быть представлен через свою функцию принадлежности, которая отобразит, как оценивается данный уровень в числовом выражении.

Примеры функций принадлежности:

- **Надежность низкая:** Треугольная или гауссова функция, центрированная вокруг низких значений показателей надежности, линейная Z-образная функция.
- **Надежность ниже средней:** Трапециевидная функция, располагающаяся между низкими и средними значениями.
- **Надежность средняя:** Трапециевидная функция, охватывающая диапазон четко вокруг среднего значения.
- **Надежность выше средней:** Трапециевидная функция, охватывающая значения между средними и высокими значениями.
- **Надежность высокая:** Треугольная или гауссова функция, центрированная вокруг высоких значений показателей надежности, линейная S-образная функция.

4 **Расчет степени принадлежности:** На основе функций принадлежности каждый потенциальный вариант конфигурации RAID (например, RAID 0, 1, 5, 6, 10) оценивается по степени принадлежности к каждому из лингвистических термов надежности.

5 **Построение правил нечёткой логики:** Установка набора нечётких правил для принятия решений.

Пример правил:

- Если «надежность высокая» и «стоимость низкая», то «выбрать».
- Если «надежность средняя» и «стоимость выше средней», то «рассмотреть, как вариант».
- Если «надежность ниже средней» и «стоимость высокая», то «отвергнуть», и т.д.

6 **Агрегация и дефаззификация:** Проведение агрегации результатов с использованием методов типа «max – min» или суммирования по правилам, и выполнение дефаззификации для выработки четкого решения.

7 **Оценка и выбор:** Анализ результатов обезличивания для выбора наиболее подходящей конфигурации RAID, которая будет удовлетворять критериям надежности и стоимости.

На базе анализа можно вручную настроить функции принадлежности и правила, аппроксимируя их к реальным условиям эксплуатации и требованиям IT-инфраструктуры.

Конкретные математические описания функций принадлежности для термов надежности можно выразить в виде различных формул. Обоснуем характеристики нескольких типов аналитических функций принадлежности, которые могут применяться для термов «надежность высокая», «надежность выше средней», «надежность средняя», «надежность ниже средней» и «надежность низкая».

Наиболее часто в качестве функций принадлежности используются:

- кусочно-линейные функции треугольной и трапециевидной формы;
- Z-образные и S-образные функции, в том числе линейные, как частный случай;
- П-образные функции.

Треугольные функции используются в случаях, когда нужно задать свойства множеств, характеризующих неопределенность типа «приблизительно равно», «среднее значение» и т.д. Трапециевидные функции больше подходят для обозначения термов «расположен в интервале», т.е. с ядром нечеткого множества в виде диапазона. Z-образные функции применяются для задания термов «малое количество», «небольшое значение», «низкий уровень», S-образные функции соответственно – при задании термов «большое количество», «значительная величина», «высокий уровень» и т.д.

П-образные функции используются для задания неопределенностей типа «приблизительно в пределах от и до», «примерно равно», «около» и т.д.

Для простоты будем использовать трапециевидные и линейные Z- и S-образные функции, которые являются одними из наиболее часто используемых.

Линейная Z-образная функция:

$$\mu(x, a, b) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < a; \\ \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ 0, & x > b. \end{cases}$$

Параметры (a, b) определяют форму функции.

Линейную Z-образную функцию удобно использовать для задания функции принадлежности терма «надежность низкая», в начале диапазона, поскольку она относится к невозрастающим функциям принадлежности.

Линейная S-образная функция:

$$\mu(x, a, b) = \begin{cases} 0, & x < a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ 1, & b < x \leq 1. \end{cases}$$

Параметры (a, b) определяют форму функции.

Линейную S-образную функцию удобно использовать для задания функции принадлежности терма «надежность высокая», в конце диапазона, поскольку она относится к неубывающим функциям принадлежности.

Трапецевидная функция:

$$\mu(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x < a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ 1, & b \leq x \leq c; \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d; \\ 0, & x > d. \end{cases}$$

Параметры (a, b, c, d) определяют форму функции.

Трапецевидную функцию можно использовать для задания функций принадлежности «надежность выше средней», «надежность средняя» и «надежность ниже средней».

В результате экспертного опроса получают экспертные оценки для различных уровней надежности. Затем осуществляется согласование мнений экспертов прямыми методами или методами с обратной связью. К *прямым методам* относятся экспертные оценки при отсутствии воздействия на мнение каждого эксперта мнения другого эксперта и всего коллектива (например, методы среднего арифметического, медианных рангов, Демпстера – Шеффера и др.) Экспертные оценки с *обратной связью* реализуют принцип обратной связи на основе воздействия на оценку экспертной группы (одного эксперта) мнениями, полученными ранее от этой группы. После согласования мнений экспертов и оценки их согласованности определяются параметры функций принадлежности.

Пример. Построение функций принадлежности по экспертным оценкам параметров.

- 1 Надежность низкая: линейная Z-образная функция с параметрами $(a = 0.2)$, $(b = 0.4)$.
- 2 Надежность ниже средней: трапецевидная функция с параметрами $(a = 0.25)$, $(b = 0.35)$, $(c = 0.45)$, $(d = 0.55)$.
- 3 Надежность средняя: трапецевидная функция с параметрами $(a = 0.4)$, $(b = 0.5)$, $(c = 0.6)$, $(d = 0.7)$.
- 4 Надежность выше средней: трапецевидная функция с параметрами $(a = 0.55)$, $(b = 0.65)$, $(c = 0.75)$, $(d = 0.85)$.
- 5 Надежность высокая: линейная S-образная функция с параметрами $(a = 0.7)$, $(b = 0.85)$.

На рис. 2 представлены описанные функции принадлежности для термов лингвистических переменных уровня надежности. При этом уровни не обязательно центрируются относительно диапазона возможных значений, как правило, для термина уровня надежности «средний», измеряемого в диапазоне от 0 до 1, имеет место смещение к правой границе. Ширина для различных термов может отличаться и сужаться к центру шкалы оценивания. Также трапециевидные и треугольные функции принадлежности не обязательно являются симметричными. Эти функции адаптируются под конкретные требования и данные, полученные от экспертов. Их параметры выбираются в зависимости от значений уровней надежности, которые считаются экспертами низкими, средними, высокими и т.д. в рассматриваемой системе хранения данных.

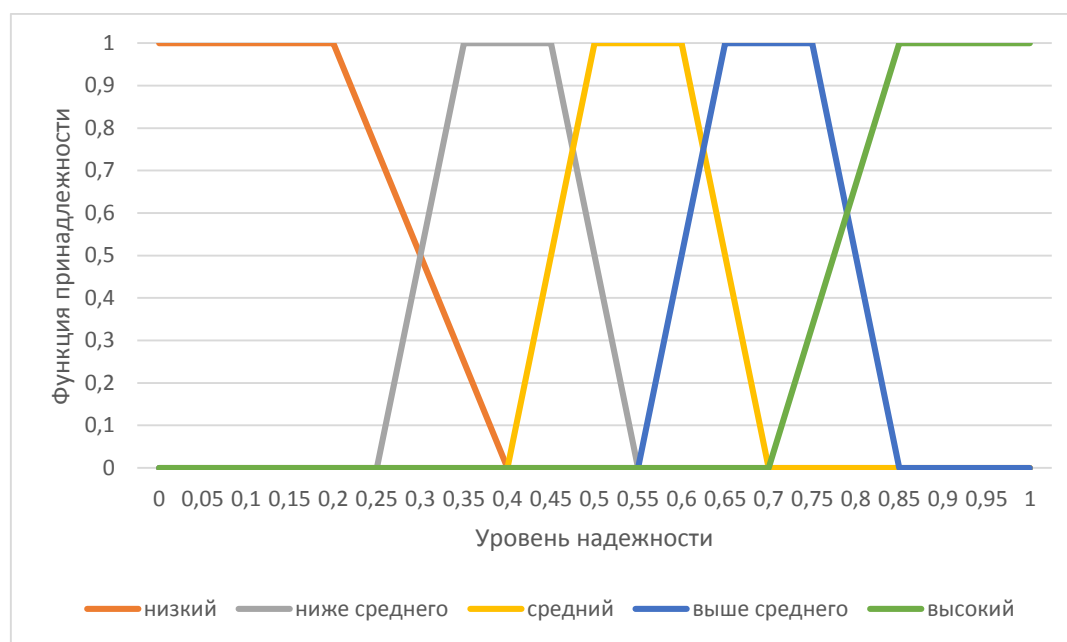


Рис. 2. Функции принадлежности для термов лингвистических переменных уровня надежности

Выводы

В ходе этой работы разработана методика оценки надежности RAID-массивов на основе нечеткой логики с использованием MATLAB и пакета Fuzzy Logic Toolbox, отличающаяся гибкостью и способностью адаптироваться к различным условиям эксплуатации. Методика включает в себя этапы построения модели нечеткой логики, формулирования правил вывода, применения нечеткой функции для оценки надежности и анализа результатов.

Были проанализированы различные конфигурации RAID, выделены их преимущества и недостатки в контексте надежности. Оценка надежности RAID-массивов осуществлена с учетом таких факторов, как количество дисков и время безотказной работы (MTBF), что позволяет более точно учитывать неопределенности, присущие реальным условиям эксплуатации.

Результаты, полученные в ходе оценки, продемонстрировали, что использование нечеткой логики позволяет гибко учитывать множество входных параметров в реальных условиях и давать более точные оценки по сравнению с традиционными методами. В частности, в примере с четырьмя дисками и MTBF, равным 800 000 часам, надежность массива была оценена на уровне 62 %, что указывает на его умеренную устойчивость к сбоям.

Методика, представленная в статье, предоставляет точное и адаптивное средство для оценки надёжности RAID-массивов. Настоящая методика может быть полезна для администраторов систем и инженеров по управлению и защите данных, так как позволяет более эффективно управлять системами хранения информации, а также минимизировать риски потери данных. Будущие исследования могут сосредоточиться на дальнейшей оптимизации модели, а также на включении дополнительных факторов, влияющих на надежность RAID-массивов [15–17]. В частности, на наш взгляд, важным и перспективным аспектом в прогнозировании надежности представляется учет интервальной неопределенности случайных характеристик исследуемых систем, аналогично тому как проводится вероятностное моделирование многоканальных систем массового обслуживания с неопределенностью [18, 19].

Список литературы

- 1 **Peterson, J.** Advanced Techniques for RAID Performance Optimization in Data Centers / J. Peterson, L. Wang // *International Journal of Data Storage and Management.* – 2021. – Vol. 10, No. 4. – P. 89–102. – ISSN 2345-6789. – DOI 10.1016/j.ijdsm.2021.08.002.
- 2 **Беляев, И. Н.** Модели и методы повышения отказоустойчивости RAID-массивов в информационных системах / И. Н. Беляев. – Москва : Наука, 2021. – 350 с. – ISBN 978-5-02-038467-5.
- 3 **Кузнецов, В. П.** Теория и практика применения RAID-массивов в корпоративных системах хранения данных / В. П. Кузнецов, Е. В. Сергеева // *Информационные технологии.* – 2022. – № 5. – С. 45–59. – ISSN 2073-0667.
- 4 **Wang, Y.** Reliability Analysis of RAID Systems Using Fuzzy Logic Models / Y. Wang, X. Zhao // *Journal of Computer Science.* – 2020. – Vol. 18, No. 3. – P. 250–264. – DOI 10.3844/jcssp.2020.250.264.
- 5 **Khomonenko, A. D.** Reliability Model of RAID-60 Disk Arrays / A. D. Khomonenko, S. G. Ermakov, R. Abu Khasan // *Engineering Journal of Don.* – 2024. – No. 1 (109). – P. 89–100. – ISSN 2070-7009.
- 6 **Brown, J.** A Study on the Performance Impact of RAID Levels in Data-Intensive Applications / J. Brown, S. Lee // *ACM Computing Surveys.* – 2020. – Vol. 52, No. 6. – P. 37–55. – ISSN 0360-0300. – DOI 10.1145/3356091.
- 7 **Ли, С. Х.** Современные методы повышения надежности и производительности в RAID-60 / С. Х. Ли, Т. Дж. Пак // *Информационные и вычислительные системы.* – 2021. – Т. 53, № 4. – С. 12–25. – ISSN 2312-9496.
- 8 **Martinez, R.** Reliability and Performance Analysis of Hybrid RAID Configurations / R. Martinez, P. Silva // *Journal of Systems and Software,* 2023. – Vol. 195. – P. 110721. – ISSN 0164-1212. – DOI 10.1016/j.jss.2023.110721.
- 9 **Baker, M.** Towards a Reliable RAID-60 Model for Data Protection in Enterprise Storage / M. Baker, G. Lewis // *Journal of Data Storage Technologies.* – 2022. – Vol. 29, No. 3. – P. 146–161. – ISSN 2331-7147.
- 10 **Ali, M.** Fuzzy Logic-Based Fault Tolerance in Distributed Systems / M. Ali, S. Taha // *International Journal of Distributed Computing.* – 2022. – Vol. 15, No. 2. – P. 89–105. – ISSN 2332-7899. – DOI 10.1007/s12182-021-0050.
- 11 **Zadeh, L.** Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility **Zadeh, L.** // *Fuzzy Sets and Systems.* – 1978. – Vol. 1, No. 1. – P. 3–28. – ISSN 0165-0114. – DOI 10.1016/0165-0114(78)90029-5.

References

- 1 **Peterson, J.** Advanced Techniques for RAID Performance Optimization in Data Centers / J. Peterson, L. Wang // *International Journal of Data Storage and Management.* – 2021. – Vol. 10, No. 4. – P. 89–102. – ISSN 2345-6789. – DOI 10.1016/j.ijdsm.2021.08.002.
- 2 **Belyaev, I. N.** Models and methods for improving the fault tolerance of RAID arrays in information systems / I. N. Belyaev. – Moscow : Nauka, 2021. – 350 p. – ISBN 978-5-02-038467-5.
- 3 **Kuznetsov, V. P.** Theory and practice of using RAID arrays in enterprise data storage systems / V. P. Kuznetsov, E. V. Sergeeva // *Information Technologies.* – 2022. – No. 5. – P. 45–59. – ISSN 2073-0667.
- 4 **Wang, Y.** Reliability Analysis of RAID Systems Using Fuzzy Logic Models / Y. Wang, X. Zhao // *Journal of Computer Science.* – 2020. – Vol. 18, No. 3. – P. 250–264. – DOI 10.3844/jcssp.2020.250.264.
- 5 **Khomonenko, A. D.** Reliability Model of RAID-60 Disk Arrays / A. D. Khomonenko, S. G. Ermakov, R. Abu Khasan // *Engineering Journal of Don.* – 2024. – No. 1 (109). – P. 89–100. – ISSN 2070-7009
- 6 **Brown, J.** A Study on the Performance Impact of RAID Levels in Data-Intensive Applications / J. Brown, S. Lee // *ACM Computing Surveys.* – 2020. – Vol. 52, No. 6. – P. 37–55. – ISSN 0360-0300. – DOI 10.1145/3356091.
- 7 **Lee, S. H.** Modern Methods for Improving Reliability and Performance in RAID-60 / S. H. Lee, T. J. Pak // *Information and Computing Systems.* – 2021. – Vol. 53, No. 4. – P. 12–25. – ISSN 2312-9496.
- 8 **Martinez, R.** Reliability and Performance Analysis of Hybrid RAID Configurations / R. Martinez, P. Silva // *Journal of Systems and Software,* 2023. – Vol. 195. – P. 110721. – ISSN 0164-1212. – DOI 10.1016/j.jss.2023.110721.
- 9 **Baker, M.** Towards a Reliable RAID-60 Model for Data Protection in Enterprise Storage / M. Baker, G. Lewis // *Journal of Data Storage Technologies.* – 2022. – Vol. 29, No. 3. – P. 146–161. – ISSN 2331-7147.
- 10 **Ali, M.** Fuzzy Logic-Based Fault Tolerance in Distributed Systems / M. Ali, S. Taha // *International Journal of Distributed Computing.* – 2022. – Vol. 15, No. 2. – P. 89–105. – ISSN 2332-7899. – DOI 10.1007/s12182-021-0050.
- 11 **Zadeh, L.** Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility **Zadeh, L.** // *Fuzzy Sets and Systems.* – 1978. – Vol. 1, No. 1. – P. 3–28. –

12 **Жуков, А. С.** Применение MATLAB для моделирования нечетких систем в задачах оценки надежности / А. С. Жуков, Е. П. Иванова // Программные продукты и системы, 2023. – Т. 34, № 7. – С. 73–85. – ISSN 2220-0271.

13 **Абдуллин, Р. Р.** Нечеткие множества и алгоритмы принятия решений в информационных системах / Р. Р. Абдуллин // Автоматизация и управление. – 2021. – Т. 45, № 5. – С. 67–81. – ISSN 2074-0287.

14 **Smith, T.** Analysis of Fuzzy-Based Models for Fault Tolerance in Distributed Computing / T. Smith, R. Gupta // International Journal of Computer Applications. – 2020. – Vol. 177, No. 8. – P. 22–32. – ISSN 0975-8887. – DOI 10.5120/ijca2020778913.

15 **Perez, F.** Comparative Analysis of RAID Configurations for Enterprise Storage Systems / F. Perez, H. Castro // Computer Storage Journal, 2022. – Vol. 48, No. 5. – P. 64–80. – ISSN 2573-8153.

16 **Omar, H.** Fuzzy Logic for Enhancing RAID Reliability in Big Data Applications / H. Omar, M. Lee // Journal of Big Data Analytics. – 2021. – Vol. 7, No. 1. – P. 45–59. – ISSN 2524-4979.

17 **Stevens, R.** RAID-60 and Fault Tolerance in Cloud Storage Solutions / R. Stevens, J. Clarke // IEEE Cloud Computing Magazine, 2023. – Vol. 10, No. 2. – P. 152–168. – ISSN 2325-6095. – DOI 10.1109/MCC.2023.3249871.

18 **Гончаренко, В. А.** Модели и методы анализа систем массового обслуживания с параметрической неопределенностью / В. А. Гончаренко // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2017. – № 4. – С. 5–11. – ISSN 2587-6147.

19 **Гончаренко, В. А.** Композиционный подход к имитационному моделированию систем массового обслуживания со случайными параметрами / В. А. Гончаренко, А. Д. Хомоненко, Р. Абу Хасан // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 6. – С. 1577–1608. – ISSN 2713-3192 (print). – DOI 10.15622/ia.23.6.1.

ISSN 0165-0114. – DOI 10.1016/0165-0114(78)90029-5.

12 **Zhukov, A. S.** Application of MATLAB for modeling fuzzy systems in reliability assessment problems / A. S. Zhukov, E. P. Ivanova // Software Products and Systems, 2023. – Vol. 34, No. 7. – P. 73–85. – ISSN 2220-0271.

13 **Abdullin, R. R.** Fuzzy sets and decision-making algorithms in information systems / R. R. Abdullin // Automation and Control. – 2021. – Vol. 45, No. 5. – P. 67–81. – ISSN 2074-0287.

14 **Smith, T.** Analysis of Fuzzy-Based Models for Fault Tolerance in Distributed Computing / T. Smith, R. Gupta // International Journal of Computer Applications, 2020. – Vol. 177, No. 8. – P. 22–32. – ISSN 0975-8887. – DOI 10.5120/ijca2020778913.

15 **Perez, F.** Comparative Analysis of RAID Configurations for Enterprise Storage Systems / F. Perez, H. Castro // Computer Storage Journal, 2022. – Vol. 48, No. 5. – P. 64–80. – ISSN 2573-8153.

16 **Omar, H.** Fuzzy Logic for Enhancing RAID Reliability in Big Data Applications / H. Omar, M. Lee // Journal of Big Data Analytics. – 2021. – Vol. 7, No. 1. – P. 45–59. – ISSN 2524-4979.

17 **Stevens, R.** RAID-60 and Fault Tolerance in Cloud Storage Solutions / R. Stevens, J. Clarke // IEEE Cloud Computing Magazine, 2023. – Vol. 10, No. 2. – P. 152–168. – ISSN 2325-6095. – DOI 10.1109/MCC.2023.3249871.

18 **Goncharenko, V. A.** Models and methods for analyzing queuing systems with parametric uncertainty / V. A. Goncharenko // Intelligent Technologies in Transport. – 2017. – No. 4. – P. 5–11. – ISSN 2587-6147.

19 **Goncharenko, V. A.** A Compositional approach to the simulation of queuing systems with random parameters / V. A. Goncharenko, A. D. Khomonenko, R. Abu Khasan // Computer Science and Automation. – 2024. – Vol. 23, No. 6. – P. 1577–1608. – ISSN 2713-3192 (print). – DOI 10.15622/ia.23.6.1.

V. A. Goncharenko, A. D. Khomonenko, R. Abu Khasan, S. G. Ermakov, V. A. Khodakovsky

TOWARDS ASSESSING THE RELIABILITY LEVEL AND MANAGING THE CONFIGURATION OF RAID ARRAYS OF A DATA STORAGE SYSTEM BASED ON FUZZY INFERENCE

Abstract. The purpose of the study is to develop a methodology for assessing the reliability of data storage systems using RAID arrays based on the mathematical apparatus of fuzzy inference. The methodology allows taking into account various aspects of reliability, including recoverability and redundancy, as well as adapting to data uncertainties, which makes the approach flexible and accurate. The scientific novelty of the work lies in the use of fuzzy inference to assess the reliability of systems with RAID arrays. Unlike classical methods, the pro-

posed approach allows taking into account uncertainties based on expert knowledge and linguistic variables. The practical significance of the study is determined by the software implementation of the method for assessing the reliability and managing the configuration of systems using RAID systems, which helps to reduce the likelihood of failures and data loss. The main result of the work is the successful implementation of a reliability assessment algorithm using fuzzy logic in the MATLAB environment, demonstrating the possibility of accurately assessing the reliability level and managing the configuration of information systems with RAID arrays, taking into account the uncertainty of parameters and real operating conditions.

Keywords: reliability level assessment, data storage system, RAID arrays, drive mirroring, fuzzy logic, uncertainty, information system, configuration management.

For citation: Towards assessing the reliability level and managing the configuration of RAID arrays of a data storage system based on fuzzy inference / V. A. Goncharenko, A. D. Khomonenko, R. Abu Khasan [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 94–106. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_94.

Сведения об авторах

Гончаренко Владимир Анатольевич

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (ВКА), кафедра информационно-вычислительных систем и сетей,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), кафедра «Информационные и вычислительные системы», кандидат технических наук, доцент, e-mail : Vlango@mail.ru

Хомоненко Анатолий Дмитриевич

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (ВКА), кафедра математического и программного обеспечения,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), кафедра «Информационные и вычислительные системы», доктор технических наук, профессор, e-mail: Khomon@mail.ru

Абу Хасан Рахед

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), кафедра «Информационные и вычислительные системы», аспирант, e-mail: Ragheb1997@yandex.ru

Ермаков Сергей Геннадьевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),

Information about the authors

Goncharenko Vladimir Anatolievich

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Chair of Information and Computing Systems and Networks,

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Chair «Information and Computing Systems», Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: Vlango@mail.ru

Khomonenko Anatoly Dmitrievich

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Chair of Mathematical and Software Engineering,

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Chair «Information and Computing Systems», Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: Khomon@mail.ru

Abu Khasan Rakheb

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Chair «Information and Computing Systems», Postgraduate Student, e-mail: Ragheb1997@yandex.ru

Ermakov Sergey Gennadievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Chair «Information and Computing Systems»,

кафедра «Информационные
и вычислительные системы»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: Ermakov@pgups.ru

Ходаковский Валентин Аветикович

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I
(ПГУПС),
кафедра «Информатика и информационная
безопасность»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: Hva1104@mail.ru

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: Ermakov@pgups.ru

Khodakovsky Valentin Avetikovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University,
Chair «Computer Science and Information
Security»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: Hva1104@mail.ru

С. М. Ковалев, М. А. Бутакова, А. Н. Гуда, И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов

ОБЗОР ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ ПТИ'24

Аннотация. Приводится краткое реферирование наиболее интересных докладов 8-й Международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии в технике и на производстве» (ПТИ'24), организованной ФГБОУ ВО РГУПС, АО «НИИАС» и Харбинским политехническим университетом (Китай) при поддержке Российской ассоциации искусственного интеллекта, которая проходила в период с 1 по 7 ноября 2024 г. в Китае (гг. Шанхай и Харбин). Открытие конференции ПТИ'24 состоялось в г. Шанхай в рамках Международного форума по обмену опытом CIER 2024 по приглашению Министерства трудовых ресурсов и социального обеспечения Китая, в котором приняли очное участие свыше 2000 ученых из более чем 120 стран.

Целью ПТИ'24 являлся обмен передовым опытом в области фундаментальных и прикладных исследований в сфере искусственного интеллекта, информационных технологий и автоматизации, а также развитие международных контактов. Особое внимание было уделено передовым интеллектуальным технологиям и их применению в различных областях промышленности, в том числе на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: интеллектуальные информационные технологии, искусственный интеллект, интеллектуализация промышленности, Индустрия 4.0.

Для цитирования: Обзор трудов конференции ПТИ'24 / С. М. Ковалев, М. А. Бутакова, А. Н. Гуда [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 107–133. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_107.

Введение

Конференции серии ПТИ проводятся ежегодно с участием ведущих ученых из России и других стран. В разные годы конференции проводились на множестве международных площадок, таких как НТУ «Сириус» (Россия), VSB – Технический университет Остравы (Чехия), Технический университет Варны (Болгария), Стамбульский университет Айдын (Турция). 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 Китае, – граждане России, Беларуси, Китая, Индии, Турции, Сирии. Всего на конференцию было подано 126 работ, 78 из которых были приняты для публикации Международным программным комитетом, с докладами выступили 76 специалистов очно и 47 – дистанционно.

ПТИ'2024 была посвящена теоретическим и практическим аспектам применения искусственного интеллекта (ИИ) и интеллектуальных информационных технологий, а также их применению в промышленной сфере. Конференция традиционно рассматривалась как место встречи исследователей и практиков, позволяющее обменяться опытом использования новейших достижений и направлений ИИ и внедрения передовых информационных технологий в различные отрасли производства и социальной сферы.

На конференцию были приглашены ряд ведущих ученых в области ИИ, представивших пленарные доклады:

– член-корреспондент Российской академии наук, заместитель директора Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН Валерия Викторовна Грибова выступила с докладом на тему: «Умные стандарты для индустрии 4.0 и 5.0, основанные на графах знаний»;

– главный научный сотрудник, руководитель научно-исследовательской лаборатории проблем компьютерной безопасности СПб ФИЦ РАН, заслуженный деятель науки Российской Федерации Игорь Витальевич Котенко представил участникам конференции доклад «Искусственный интеллект в корреляции событий безопасности в промышленных киберфизических системах: математические модели, реализации и проблемы»;

– ведущий профессор факультета естественных наук Шанхайского университета Цзяо Тонг Ши Джин выступил с докладом о квантовых вычислениях;

– директор Института прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН Владимир Викторович Мазалов представил результаты исследований, посвященных динамической устойчивости коалиционных структур;

– академик Китайской академии наук Сюй Зонгбен выступил с докладом на тему: «Как смоделировать методологию обучения? О сути фундаментальных моделей».

Авторы хотели бы выразить личную признательность ректору Харбинского политехнического университета Цзекай Хану и его команде за радушный прием российских участников и всестороннюю поддержку конференции ПТИ.

Доклады конференции были распределены по 11 основным секциям. Ниже приводится краткое реферирование наиболее интересных секционных докладов. Некоторые секции в данной статье объединены в один раздел.

1 Машинное обучение и его приложения, нейронные и байесовские сети

Данная секция была представлена двадцатью докладами.

В работе [1] предложен подход к решению проблемы включения экспертных правил в модели машинного обучения, в частности в нейронные сети, в рамках обучения, основанного на концепции. Первая идея, лежащая в основе этого подхода, состоит в том, чтобы рассматривать экспертные правила как логические функции для понятий, которые ограничивают совместное распределение вероятностей для всех комбинаций значений понятий, т. е. предполагается, что каждая комбинация понятий должна удовлетворять экспертным правилам, в противном случае вероятность комбинации присваивается нулю. Вторая идея состоит в том, чтобы добавить нейронную сеть, генерирующую вероятности комбинаций понятий с помощью слоя, который сопоставляет вероятности понятий с предельными вероятностями понятий и гарантирует, что вероятности будут удовлетворять экспертным правилам для любых входных данных. Предлагаемый подход можно рассматривать как способ сочетания индуктивного и дедуктивного обучения.

Рассмотрено условное совместное распределение вероятностей по концепциям $\Pr(C=c | X=x)$. Все случайные величины концепта являются дискретными с конечными наборами результатов. Следовательно, векторы c могут быть проиндексированы, и общее число различных векторов понятий равно $t = n_0 \cdot n_1 \cdot \dots \cdot n_m$. Предполагается, что функция $M : C^X \mapsto \{1, \dots, t\}$ сопоставляет вектор понятий с его индексом. Обратная функция M^{-1} сопоставляет индекс с соответствующим вектором понятий. Совместное распределение вероятностей $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_t)$ определяется следующим образом:

$$\forall c \in C^X, \pi_{M(c)} = \Pr(C = c | X = x).$$

Совместное распределение вероятностей ограничено тем, что оно удовлетворяет экспертным правилам, сформулированным в виде g , поэтому $\Pr(g(C)=1)=1$. Бинарная маска допустимых состояний: $u_k = g(M^{-1}(k))$, $k \in \{1, \dots, t\}$. Ограничения на совместное распределение вероятностей могут быть переформулированы как набор ограничений равенства для компонентов, соответствующих недопустимым состояниям, которые нарушают правила: $\pi_k = 0$, $k \in \{i \in \{1, \dots, t\} | g(M^{-1}(k)) = 0\}$. Общая вероятность при условии, что выполняются экспертные правила $g(C)$:

$$g(C): \Pr(C = c | g(C)=1) = \frac{\Pr(C = c) \cdot \Pr(g(C)=1 | C = c)}{\Pr(g(C))}.$$

В табл. 1 представлен пример комбинаций значений понятия и соответствующих вероятностей.

Таблица 1

**Пример всех комбинаций значений понятия
и соответствующих вероятностей**

$c^{(0)}$	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
$c^{(1)}$	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
$c^{(2)}$	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
π	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}	π_{12}

Далее рассмотрены экспертные правила, представленные в нейросетях, и численные эксперименты.

Фактически авторами предложен способ решения важной проблемы объединения дедуктивной и индуктивной моделей обучения. Предлагаемый подход чрезвычайно прост с точки зрения его реализации. В то же время с вычислительной точки зрения он сложен, так как необходимо анализировать декартово произведение возможных комбинаций понятий и проверять, удовлетворяет ли каждая комбинация экспертному правилу. Авторы применили предложенный подход к графическим данным, так как они могут быть достаточно просто описаны понятиями высокого уровня, и эти понятия связаны с целевыми значениями.

Работа [2] посвящена синтезу и анализу изображений пористых каркасных наноструктур, получаемых в результате химического синтеза, с использованием методов машинного обучения. Авторами предложен современный подход к генерации синтетических изображений исследуемых структур с высокой детализацией с использованием методов компьютерного зрения и машинного обучения. Опираясь передовыми методами анализа изображений, авторы [2] исследуют сложные характеристики и свойства этих структур, чтобы прийти к полному пониманию их поведения и функциональности. Полученные ими результаты не только способствуют развитию дизайна пористых материалов, но и подчеркивают эффективность машинного обучения в создании сложных структурных паттернов, прокладывая путь для нового их приложения в различных областях.

Методы синтеза изображений разработаны с использованием скрипта на языке Python, основанного на математических формулах для генерации эллипсов. Этот подход использует гибкость и эффективность моделей на основе эллипсов для представления сложных и переменных пористых пространств в рамках структур. Для генерации изображений используются формулы:

$$f = \alpha \bigcup_{i=1}^N El_i + \beta I. \quad (1)$$

В уравнении (1) α и β – определяют контрастность изображения, на изображениях $I(k, l) = 1$, изображения эллипсов El_i определяются следующим образом:

$$El_i(k, l) = \begin{cases} 1, & \frac{((k - a_i)c_i + (l - b_i)s_i)^2}{A_i^2} + \frac{((k - a_i)c_i - (l - b_i)s_i)^2}{B_i^2} \leq 1; \\ 0, & \frac{((k - a_i)c_i + (l - b_i)s_i)^2}{A_i^2} + \frac{((k - a_i)c_i - (l - b_i)s_i)^2}{B_i^2} > 1, \end{cases} \quad \left(\bigcup_{i=1}^N El_i \right)(k, l) = \max_i El_i(k, l).$$

Уравнение (1), где натуральное число N представляет собой количество пор и контрастов, удовлетворяет ограничениям $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$, $\alpha + \beta \leq 1$. Контраст $\alpha = \xi\eta$, $\beta = (1 - \xi)\eta$ выражается через две независимые случайные величины ξ и η , которые равномерно распределены на интервале $[0, 1]$. Центр эллипса (a_i, b_i) равномерно распределен по точкам сетки изображения. Параметры ориентации (c, s)

удовлетворяют следующим ограничениям: $-1 \leq c \leq 1$, $c^2 + s^2 = 1$. Предполагается, что c – однородная случайная величина в интервале $[-1, 1]$, $s = \delta\sqrt{1-c^2}$, $P(\delta=1) = P(\delta=-1) = \frac{1}{2}$.

Генератор использует стандартную метрику: $\rho(M(i, j), R(k, l)) = \sqrt{(k-i)^2 + (l-j)^2}$. Метрика включает параметры и независимые случайные величины A и B . Для их генерации использовались два генератора. Первый генератор использует экспоненциальный закон распределения с параметрами λ_1 и λ_2 . При выборе параметров следует полагаться на средние значения: $EA = \frac{1}{\lambda_1}$, $EB = \frac{1}{\lambda_2}$.

Второй генератор использует β -распределения: $A = \underline{A} + \xi(\bar{A} - \underline{A})$, $B = \underline{B} + \eta(\bar{B} - \underline{B})$, где \underline{A} , \underline{B} – наименьшие и \bar{A} , \bar{B} – наибольшие значения параметров A и B , случайные величины ξ и η не зависят от β -законов распределения:

$$f_{\xi}(x) = \frac{1}{B(\alpha_1, \beta_1)} x^{\alpha_1-1} (1-x)^{\beta_1-1}, \quad x \in [0, 1], \alpha_1 > 0, \beta_1 > 0;$$

$$f_{\eta}(x) = \frac{1}{B(\alpha_2, \beta_2)} x^{\alpha_2-1} (1-x)^{\beta_2-1}, \quad x \in [0, 1], \alpha_2 > 0, \beta_2 > 0,$$

где $B(\alpha, \beta)$ – бета-функция. Параметры α и β требуют дополнительной настройки.

Для анализа пористых материалов основополагающей является сегментация пор, которая позволяет точно определить количество и характеристики пористых каркасных структур, что, в свою очередь, дает возможность получить представление об их структурных и функциональных свойствах. Сегментация пор является нетривиальной задачей из-за сложной и неоднородной природы геометрии пор.

Выделение контуров на изображении относится к операциям типа свертки, и для использования дискретного двумерного преобразования Фурье с применением быстрого алгоритма Кули – Тьюки изображение рассматривается как двумерный тор. Операция свертки изображения f с помощью фильтра g с функцией рассеяния импульсов $g(i, j)$ может быть представлена в виде суммы:

$$(g * f)(i, j) = \sum_{-w}^w \sum_{-w}^w g(k, l) f(i-k, j-l).$$

Ядра фильтров Саппу получены путем дискретного дифференцирования по соответствующим гауссовым переменным ядра. Дифференцирование по гауссовой переменной ядра x приводит к получению ядра:

$$G_x(i, j) = C \left(\exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{h}\right) - \exp\left(-\frac{(i-1)^2 + j^2}{h}\right) \right).$$

Другой подход к решению задачи заключается в том, чтобы сформулировать ее как нахождение минимума выпуклого функционала, который нужно вычислить: $(g * f)(0, 0) = (g, f_g)$, где f – изображение без помех, идеальное изображение, а f_g – проекция выпуклого функционала, изображение на фильтре g . В то же время используется шумоизолирующее изображение: $\bar{f} = f + \sigma n$, где n – белый шум. Это применимо к другому алгоритму для вычисления $(\bar{g} * \bar{f})(0, 0) = ((\bar{g}, f_g) + \sigma(\bar{g}, n_g))$, где предполагается, что фильтры g и \bar{g} совпадают. Задача выбора ядра g заключается в следующем:

$$\min_{\bar{g}} \theta, \quad P\left(\max_{f_g \leq \beta} |(\bar{g} - g, f_g) + \sigma(\bar{g}, n_g)| \leq \theta\right) \geq \alpha, \quad (2)$$

где θ – погрешность вычисления производной.

Задача, описанная в (2), преобразуется в предположении, что случайная величина и шум распределены в соответствии с нормальным законом распределения. Из нормальности следует, что

$$\theta = \beta \bar{g} - g + \sigma \Phi^{-1} \left(\frac{1 + \alpha}{2} \right) \bar{g}, \text{ где } \Phi^{-1}(x) \text{ – обратная функция Лапласа.}$$

В работе [3] рассматривался подход к исследованию плохой повторяемости в данных, основанный на анализе сезонной динамики годового цикла для точной идентификации различных видов древесных растений, в частности кленов. Были использованы алгоритмы машинного обучения (МО) Random Forest (RF) и Gradient Boosting (GB), в том числе метод слияния спектральных данных с гиперспектральной камеры с погодными данными, такими как температура, осадки и длина светового дня, влияющими на развитие древесных растений в годовом цикле. Объединение данных позволило учесть взаимосвязь между спектральными характеристиками и климатическими условиями, что привело к повышению качества идентификации видов алгоритмами машинного обучения на 13,21 %. Использование слияния спектральных и климатических данных позволило создать комплексную модель, учитывающую спектральные характеристики и их связь с погодными условиями, что повышает точность классификации видов, а также позволяет оценить точность алгоритмов машинного обучения в сезонной динамике годового цикла для всех изученных видов.

Исследование проводилось в Южном федеральном университете в период с 2021 по 2023 г. Объектами исследования послужили пять видов кленов – *Acer campestre* L., *A. negundo* L., *A. saccharinum* L., *A. platanoides* L. и *A. ibericum* Bieb. Чтобы оценить различие спектральных данных для каждого вида, был проведен разведочный анализ данных Exploratory Data Analysis (EDA), результаты которого приведены на рис. 1.

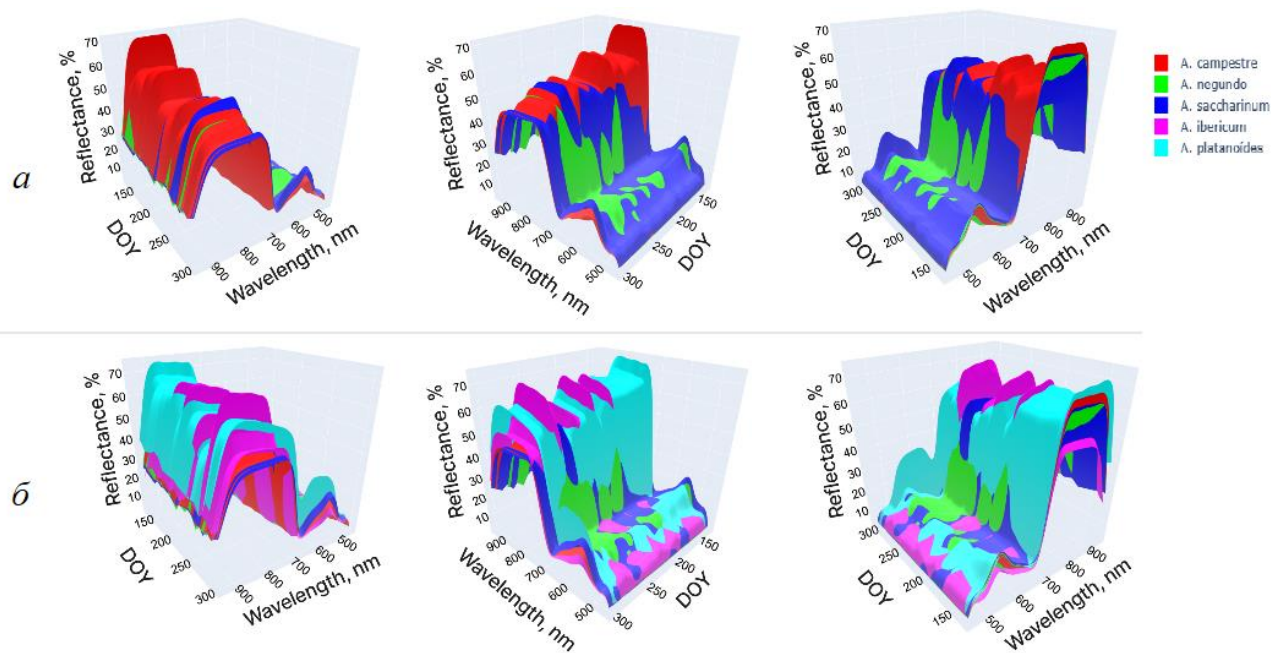


Рис. 1. Среднее значение спектров по дням за 2022 год

Первым этапом проведение анализа данных и идентификации видов, стал эксперимент с использованием спектральных данных, без учета погодных условий. На втором этапе проведения анализа данных и идентификации видов было выполнено объединение спектральных данных с метеорологическими данными, что позволило повысить точность модели машинного обучения.

Все результаты оценки точности моделей сведены в табл. 3, где можно увидеть прирост точности моделей при объединении спектральных и метеорологических данных. Точность алгоритма RF выросла на 12,83 %, алгоритма GB – на 13,21 %. Алгоритм GB показал себя лучше по сравнению с RF на 7,51 %.

Таблица 2

Результаты оценки точности модели при анализе данных и идентификации видов

Метод	Использованный набор данных	Точность
Random Forest	Спектральные данные	49,51 %
Gradient Boosting	Спектральные данные	51,87 %
Random Forest	Спектральные и метеорологические данные	55,86 %
Gradient Boosting	Спектральные и метеорологические данные	58,72 %

Авторы работы [4] представили подход к построению моделей условных вариационных автоэнкодеров (C-VAE) с нечеткими выводами при классификации. Этот подход сохраняет возможности вариационного автоэнкодера (VAE) по распутыванию, одновременно выполняя кластеризацию латентного пространства. Нечеткая модель C-VAE предоставляет полезные возможности для обнаружения аномалий, используя частично помеченные наборы данных и контролируемую генерацию новых образцов. В данной работе рассмотрен один из аспектов инструментария нечеткой логики, а именно нечеткие термины, реализованные в нечетком слое для ML-фреймворка PyTorch. Следует отметить, что представленный нечеткий слой уже может быть использован для построения нечетких или нейро-нечетких систем. В частности, можно строить мамдани-подобные системы вывода, сочетая нечеткий слой с линейными и softmax слоями. Исходный код доступен на репозитории GitHub <https://github.com/kenoma/pytorch-fuzzy>.

В своем исследовании авторы использовали следующие методы: вариационные автоэнкодеры (VAE), условные автоэнкодеры (C-VAE), нечеткие C-VAE. Предложена архитектура нечеткого C-VAE, в которой применяются дополнительные условия для реорганизации структуры латентного пространства. Реорганизация достигается за счет использования нечетких функций термов, где каждый терм связан с одним условием, т. е. меткой. Для представления нечеткой функции терма используется многомерная функция Гаусса:

$$v(z, A_i) = e^{-\left\| \begin{bmatrix} A_i \cdot \tilde{z} \\ 1 \end{bmatrix} \right\|_{1..m}^2},$$

где m – размер латентного пространства, I – номер терма (т. е. номер класса), $\tilde{z} = [z_1, z_2, \dots, z_m, 1]$ и A_i – матрица преобразования в виде:

$$A_{(m+1) \times (m+1)} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,m} & c_1 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_{m,1} & \dots & a_{m,m} & c_m \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

с положением центраида $c_1 \dots c_m$, и $a_{k,l}$ – матричный элемент, отвечающий за масштабирование и выравнивание гауссианы в m -мерном пространстве. Такое представление многомерной гауссовой терм-функции легко использовать в любом современном фреймворке машинного обучения. Набор $\{v(z, A_i)\}$ назван нечетким слоем. Идея нечеткого слоя заключается в том, что в процессе обучения каждый входной вектор z принудительно группируется ближе к центруида соответствующей терм-функции. Функции распутывания VAE в сочетании с возможностями кластеризации нечеткого слоя обеспечивают контролируемую процедуру обучения латентного пространства, которая может быть полезна для обнаружения аномалий и других задач.

Для обучения нечеткого C-VAE авторы использовали ту же функцию потерь, что и в стандартном VAE, с добавлением потерь нечеткого слоя $FZ\left(\tilde{y}, y\right)$:

$$\text{Loss} = \text{MSE}\left(\tilde{x}, x\right) + \text{KL}\left(\mu, \log \sigma^2\right) + \text{FZ}\left(\tilde{y}, y\right),$$

где $\text{MSE}\left(\tilde{x}, x\right)$ – потери при реконструкции, $\text{KL}\left(\mu, \log \sigma^2\right)$ – KL -расхождение, а $\text{FZ}\left(\tilde{y}, y\right)$ – средняя квадратичная ошибка между выходным и целевым условным вектором.

В этой статье авторы использовали набор данных MNIST 1 в качестве игровой площадки для демонстрации ключевых концепций нечеткого C-VAE. Сравняется сеть FuzzyC-VAE, ванильная сеть VAE и сеть, которая является топологическим эквивалентом сети нечеткого C-VAE с нечеткой частью, замененной двухслойным перцептроном csoftmax (MLPC-VAE).

С помощью представленного нейросетевого компонента авторы модернизировали фреймворк C-VAE и продемонстрировали его потенциальное применение в обнаружении аномалий, генерации синтетических данных и обучении на частично разделенных наборах данных. Нечеткая модель C-VAE по своей сути предназначена для реорганизации латентных многообразий в соответствии с экспертными знаниями в процессе обучения. В этой модели нечеткие термины служат в качестве контролируемого кластера. Многомерная гауссова функция была продемонстрирована как эффективное средство кондиционирования при использовании в качестве характеристической функции. На наборе данных MNIST было продемонстрировано, что система, основанная на классическом многослойном перцептоне, менее эффективна, чем нечеткий C-VAE.

В статье [5] описывается эффективная методика решения проблемы, достаточно часто возникающей в задачах видеонаблюдения и технического зрения, когда угол обзора камер достаточно широк, а обнаруженные объекты заслоняются перспективой. В основе предложенной авторами методики лежит обнаружение объектов на перспективных трансформированных (деформированных) изображениях. Такое преобразование позволяет упростить пространственную структуру изображения и, следовательно, его анализ. В некоторых случаях после предложенного преобразования задача обнаружения может быть переформулирована как одномерная. В работе предложен ряд специализированных метрик для измерения качества задачи одномерного обнаружения, а также несколько способов использования упрощенной структуры изображения при обучении модели обнаружения. Предложенные методы проиллюстрированы практическим применением позиционирования вагонов на классификационной чаше сортировочной грузовой железнодорожной станции.

Когда выходные данные модели являются двоичными, они просты, однако в рассматриваемом в [5] случае псевдоодномерного обнаружения выходные данные модели, а также наземные данные представляются в виде сегментов. В этом случае положительные моменты могут быть формализованы по аналогии с широко используемыми метриками в детектировании, на основе пересечения сегментов. Если предсказанный участок значительно пересекает один из сегментов наземных истин, то он считается истинно положительным, если нет – считается ложноположительным, все сегменты наземных истин, не пересекающиеся ни с одним из прогнозируемых сегментов, считаются ложноотрицательными. Для количественной оценки значимости пересечения авторы адаптировали известную метрику IoU к одномерному случаю:

$$\begin{aligned} \cap_{1D}(x, y) &= (\max(l(x), l(y)), \min(r(x), r(y))), \\ \cup_{1D}(x, y) &= (\min(l(x), l(y)), \max(r(x), r(y))), \\ \text{IoU}_{1D}(x, y) &= \frac{\cap_{1D}(x, y)}{\cup_{1D}(x, y)}, \end{aligned}$$

где x, y – два сегмента, а $l(\cdot)$ и $r(\cdot)$ – левая и правая границы этих сегментов (начало и конец сегмента соответственно).

Метрики обнаружения модели определяются следующим образом:

$$\text{Recall}_{1D}@\theta = \frac{\sum_i |TP@ \theta(Y_i, \hat{Y}_i)|}{\sum_i |Y_i|},$$

¹ Deng L. The MNIST database of handwritten digit images for machine learning research [best of the web] // IEEE Signal Processing Magazine. – 2012. – Vol. 29(6). – P. 141–142. – URL: <https://doi.org/10.1109/MSP.2012.2211477>.

$$\text{Precision}_{1D}@θ = \frac{\sum_i |TP@θ(Y_i, \hat{Y}_i)|}{\sum_i |\hat{Y}_i|},$$

где Y – набор истинных сегментов для области интереса; \hat{Y} – набор прогнозируемых сегментов для области интереса; θ – пороговое значение для IoU_{1D}.

Качество позиционирования измеряется только для истинно положительных результатов и определяется на основе граничной ошибки для каждого правильно распознанного сегмента:

$$PE@θ = \sum_i \sum_{y, \hat{y} \in TP@θ(Y_i, \hat{Y}_i)} |l(y) - l(\hat{y})| + |r(y) - r(\hat{y})|.$$

Функция потерь исходной модели YOLO [5] включает в себя следующие компоненты:

$$\mathcal{L}_{MSE} = \lambda_{coord} \sum_i \sum_j \mathbb{I}_{ij}^{obj} [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2] + \lambda_{coord} \sum_i \sum_j \mathbb{I}_{ij}^{obj} \left[(\sqrt{w_i} - \sqrt{\hat{w}_i})^2 + (\sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i})^2 \right].$$

Здесь i перебирает ячейки изображения и j – по потенциальным ограничивающим прямоугольникам в каждой ячейке, умножение на индикатор \mathbb{I}_{ij}^{obj} означает, что потеря наказывает ошибку координат ограничивающего прямоугольника, если этот предиктор «ответственен» за основной блок истины (т. е. имеет наибольшее значение IoU среди всех предикторов в этой ячейке сетки).

Для того чтобы учесть разную значимость измерений в такой функции потерь, добавляется весовой коэффициент $\lambda \in (0; 1)$ для одного из измерений:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{MSE}^* = \lambda_{coord} \sum_i \sum_j \mathbb{I}_{ij}^{obj} [(1 - \lambda)(x_i - \hat{x}_i)^2 + \lambda(y_i - \hat{y}_i)^2] + \\ + \lambda_{coord} \sum_i \sum_j \mathbb{I}_{ij}^{obj} \left[(1 - \lambda)(\sqrt{w_i} - \sqrt{\hat{w}_i})^2 + \lambda(\sqrt{h_i} - \sqrt{\hat{h}_i})^2 \right]. \end{aligned}$$

Статья [6] посвящена использованию алгоритмов однозадачного и многозадачного обучения с подкреплением для автономного мобильного робота. Авторы демонстрируют универсальность моделей обучения с подкреплением через эксперименты на роботе Mobile Aloha, который обладает возможностями как манипуляции, так и навигации. Основная идея работы заключается в демонстрации использования различных типов RL-алгоритмов (одно- и многозадачных, RL – Reinforcement Learning, обучение с подкреплением) для мультиконтрольных роботов, что ранее не было достаточно исследовано. Авторами приведены сравнительные результаты экспериментов с современными алгоритмами обучения с подкреплением для различных типов задач, включая навигацию, манипуляцию и их комбинацию.

В рамках единой структуры марковского процесса принятия решений (MDP) формулируются задачи навигации, манипуляции и мобильной манипуляции. Каждая задача моделируется из следующих составляющих:

- *пространство состояний* (S): представляет все возможные конфигурации робота и его окружения. Оно включает пространственные координаты робота, ориентацию, скорость, состояние манипулятивных приводов (например, открыт или закрыт захват) и положение соответствующих объектов (например, препятствий, кубиков);
- *пространство действий* (A): представляет все действия, которые робот может выполнять. Стоит из вектора управления навигацией, который включает линейную и угловую скорости, и вектора, включающего управление каждым сочленением манипулятора;
- *динамика переходов* (P): определяет вероятности $P(s'|s, a)$ того, что выполнение действия a в состоянии s приведет к состоянию s' ;
- *функция вознаграждения* (R): функция $R(s, a, s')$, предоставляющая скалярный сигнал обратной связи после перехода из состояния s в состояние s' в результате действия a .
- *терминальные условия*: каждая задача имеет условие, при котором она считается завершённой. Оно включает достижение целевого местоположения (робота и/или объекта манипуляции) в отведённое для этого время.

MDP представлен кортежем (S, A, P, R, γ) , где γ коэффициент дисконтирования. Цель в каждой задаче – найти политику $\pi: S \rightarrow A$, которая максимизирует ожидаемое накопленное вознаграждение:

$$\max_{\pi} \mathbb{E}[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t, s_{t+1})],$$

где s_t – состояние в момент времени t , $a_t = \pi(s_t)$ – действие, выполненное в соответствии со стратегией π , s_{t+1} – состояние, полученное в результате действия a_t .

Для управления базой использовалась модель робота с дифференциальным приводом на колеса. Контроллер принимает на вход желаемые линейную и угловую скорости $[u, \omega]$ и выдает желаемую угловую скорость для каждого колеса $[\dot{\theta}_L, \dot{\theta}_R]$. Чтобы продемонстрировать управление колесами робота, авторами был разработан соответствующий алгоритм.

Для оценки производительности алгоритмов RL авторы [6] провели эксперименты в симуляционной среде с использованием Mujoco и OpenAI Gym.

Хотя TDMP2 продемонстрировал многообещающие результаты при выполнении нескольких задач без необходимости настройки под конкретные задачи, другие алгоритмы также показали свои сильные и слабые стороны. PPO и SAC, несмотря на то что требовали более специфической настройки гиперпараметров с помощью таких инструментов, как RayTune и RLlib, все же смогли хорошо работать в задачах с меньшими размерностями действий. DreamerV3, используя свою модель размера S , показал среднюю производительность, особенно в сложных сценариях. С другой стороны, как FQL, так и DFQL продемонстрировали низкую производительность, что может быть связано с тем, что задачи навигации, манипуляции и мобильной манипуляции включают сложные пространства состояний и действий. Поэтому FQL и DFQL, будучи более простыми по своей природе, часто не обладают достаточной сложностью для эффективной работы с высокоразмерными непрерывными пространствами состояний и действий.

Следует также отметить еще работу [7] представленную в данной секции, в которой рассмотрено уточнение ранее предложенного алгоритма поиска приближенного канонического представителя фрагментов знаний (ФЗ), использующего метод Монте-Карло и ищущего среднее между большим числом ФЗ со скалярными оценками. ФЗ хранят тесно связанную информацию о предметной области, которая формализуется, в частности, в виде набора квантов со скалярными или интервальными оценками вероятности истинности. В случае дефицита вычислительных и временных ресурсов может быть полезен поиск канонического представителя ФЗ – перехода от объектов с интервальными оценками к наиболее репрезентативным объектам со скалярными оценками. Уточнение алгоритма заключается в замене гамма-распределения, с помощью которого генерировались скалярные оценки, на экспоненциальное распределение. В результате было экспериментально показано, что получаемые в таком случае канонические представители ФЗ формируются в 8 раз точнее.

2 Промышленная интеллектуализация

Традиционно на конференции большая часть работ посвящается прикладным технологиям искусственного интеллекта. В нынешнем году в данную секцию было подано четырнадцать докладов о применении ИИ в железнодорожной [8–12], авиастроительной [13], автотранспортной [14] областях, а также принципах внедрения искусственного интеллекта в индустрию [15, 16]. Подробная аннотация этих работ приведена ниже в настоящем разделе.

В работе [8] исследуются логические спецификации для быстрого прототипирования сложных структур и процессов, в том числе транспортных. Используется язык в классической логике предикатов с равенством и отрицаниями, обладающий вычислимой семантикой. Исполнение таких описаний может иметь экспоненциальные оценки сложности. Выделены достаточные условия и соответственно подклассы таких спецификаций, сложность построения прототипов и анализаторов по которым может быть понижена до полиномов низких степеней. Выделены системы, разрешимые за время с линейной памятью, где n – мощность задаваемых отношений, m – мощность определенности функций и отношений. Выразительность полученных классов спецификаций, как показало практическое использование, достаточна для прототипирования в различных предметных областях.

В другой работе, посвященной железнодорожной автоматизации [9], авторы представляют интеллектуализацию планирования работы грузовой сортировочной станции на основе «данных от колеса». Под «данными от колеса» авторы имеют в виду собственную концепцию данных, которые представляют собой информацию со всевозможных датчиков – рельсовых цепей, индуктивных датчиков

счета осей, радиочастотных меток, а также камер видеонаблюдения. Получение таких данных осуществимо благодаря разработанной авторским коллективом системе контроля и подготовки информации о перемещениях вагонов и локомотивов на станции в реальном времени (СКПИ ПВЛ РВ). СКПИ ПВЛ РВ осуществляет слияние информации от различных источников данных низовой автоматики и систем автоматизации технологических процессов для получения фактических данных о перемещениях подвижных единиц на станции в реальном времени.

Увеличение пропускной способности, уменьшение реального простоя вагонов на грузовых станциях является в настоящий момент одной из важнейших задач, поскольку большую часть своего жизненного цикла грузовой вагон проводит на станциях. Нелинейность процессов на станциях обусловлена наличием множества неопределенных факторов, влияющих на процессы диспетчеризации. Для решения задачи оптимизации управления маневровой работой в реальных условиях нелинейности процессов на грузовых станциях видится необходимой разработка цифрового двойника станции, основанного на реальных данных вагонной модели станции, полученных от низовых устройств. Такой цифровой двойник, что особенно важно, должен обладать возможностью прогнозирования критических параметров на основании накопленной статистики по работе конкретного объекта.

На основании вагонной модели СКПИ ПВЛ РВ позволяет автоматически беспристрастно фиксировать и протоколировать объективные показатели сортировочной станции, такие как начало и конец технологической операции, время переработки вагона на станции и пр. В настоящее время СКПИ ПВЛ РВ используется только как средство фиксации первичных данных, получаемых от напольного оборудования. При этом показатели станции рассчитываются, как правило, на основе грубой обобщенной (часто необъективной) информации, внесенной вручную дежурным персоналом или на основе плановых значений. Эта информация часто не соответствует реальным оперативным данным, так как она сформирована человеком. Поэтому показатели, рассчитываемые на основании этих данных, зачастую не соответствуют действительности. В связи с чем реальную длительность конкретных операций невозможно проанализировать, что не позволяет максимально эффективно использовать перерабатывающую способность больших станций, таких, например, как ст. Челябинск-Главный.

В 2023 г. авторским коллективом в инициативном порядке разработан дополнительный функционал СКПИ ПВЛ РВ, описанный в статье [9], который позволяет автоматизировать расчет и планирование станционной работы. На основании реальной информации авторы рассчитали относительную загрузку парков станции в течение недели по двум системам – четной и нечетной. На рис. 2 отображено количество вагонов в процентном соотношении к общей вместимости парка, где парк Г – парк приема, парк Д – сортировочный парк, и парк В – парк отправления.

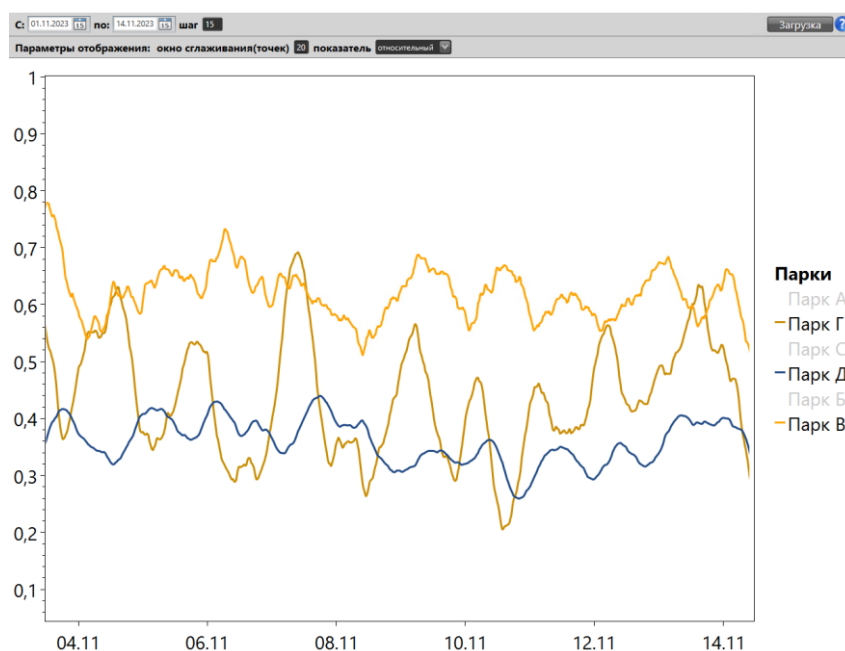


Рис. 2. Загруженность парков в период 4–13 ноября 2023 г.

На основании полученных данных авторы также представляют моделирование работы станции для планирования работы с учетом появления нештатных ситуаций. На рис. 3 показан период остановки работы станции на основе имитационного моделирования при использовании реальных данных.

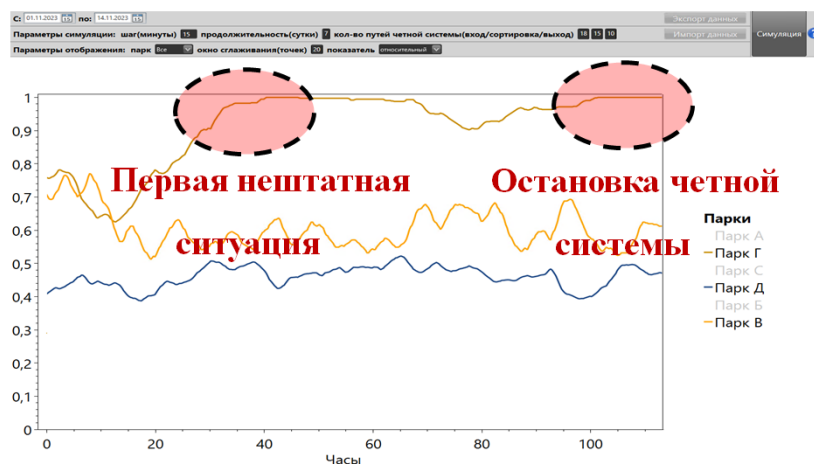


Рис. 3. Имитация ремонта путей с остановкой части станции в течение суток

В другой работе, посвященной интеллектуализации сортировочных станций, представлено описание функциональной безопасности систем технического зрения при их внедрении в железнодорожную инфраструктуру [10]. Авторы предлагают способ реализации доказательства функциональной безопасности сложных технических систем, которые основаны на машинном обучении и, соответственно, имеют неопределенное поведение при их промышленной реализации. Способ заключается в использовании датчиков «низовой автоматики» для исключения случаев опасных отказов систем искусственного интеллекта. В работе также показана реализация предложенного способа на реальных объектах сети ОАО «РЖД» (рис. 4).

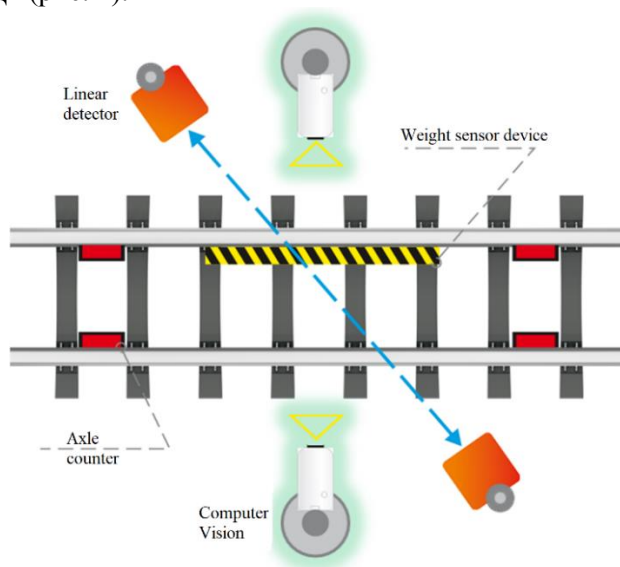


Рис. 4. Использование датчиков «низовой автоматики» в комплексе с системой компьютерного зрения

Темой другого доклада конференции стали результаты еще одной работы, посвященной компьютерному зрению на сортировочной станции [11]. В статье авторы предлагают объединить методы, основанные на работе с данными (data-driven), с методами, основанными на работе со знаниями (knowledge-driven). В данной работе изложен новый гибридный подход к решению задачи контроля подвижных единиц в сортировочном парке грузовой станции, сочетающий алгоритм компьютерного

зрения (data-driven) для выявления ключевых объектов на снимках видеокамер и алгоритм анализа данных (knowledge-driven), полученных от дискретных устройств сортировочного парка и сортировочной горки. Исследование рассматриваемой проблемы является актуальным, так как существующие на рынке решения не обеспечивают точного и исчерпывающего информирования о движении вагонов и локомотивов в сортировочном парке. Авторами предлагается объединение искусственной нейронной сети глубокого обучения для распознавания подвижных единиц при построении data-driven алгоритма и виртуальной модели сортировочного парка, основанной на мультисенсорных данных, при построении knowledge-driven алгоритма. Такое сочетание позволяет как сгладить ошибки первого и второго рода data-driven, обусловленные невозможностью получения всевозможных вариаций подвижных единиц в кадрах видеокамер, так и составить наиболее полную статическую и динамическую картину сортировочного парка, которую невозможно получить на основе дискретных сенсоров в сортировочном парке. В работе приводятся результаты работы алгоритма и его преимущества перед существующими решениями для контроля подвижных единиц в сортировочном парке. Предлагаемый подход является актуальным при решении задач компьютерного зрения при неполноте и зашумленности входных данных – изображений. В заключение авторами представлена реализация проведенного исследования на реальном объекте внедрения в области железнодорожного транспорта. Показано, как с использованием knowledge-driven составляющей реализовано распознавание зашумленных объектов (рис. 5).

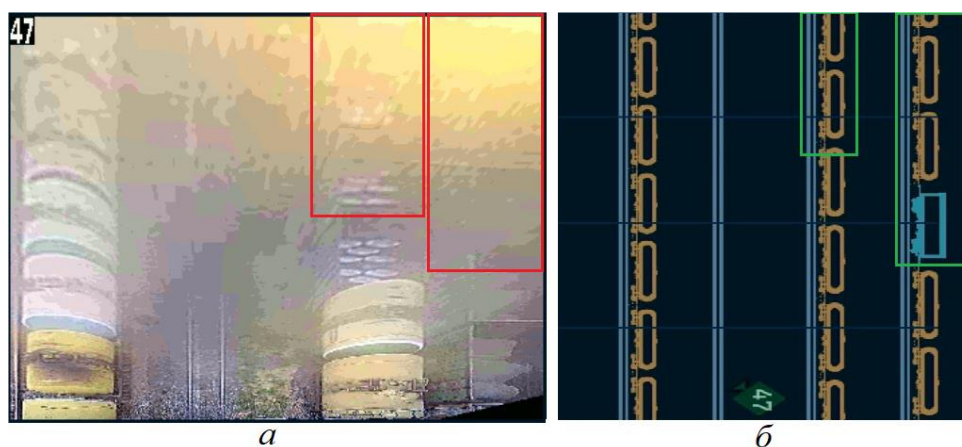


Рис. 5. Распознавание зашумленных объектов:

а – зашумленное изображение; *б* – отображение вагонов на интерфейсе системы внедрения предлагаемого в [11] алгоритма

Еще одно исследование, представленное на ПТГ'24 и относящееся к интеллектуализации железнодорожного транспорта, посвящено применению метода глубокого обучения с подкреплением для минимизации нагрузок в поезде [12]. Разработана модель продольной динамики поезда, включающая дифференциальные уравнения. Определение профиля пути позволяет проводить реалистичные вычислительные эксперименты. Углубленное обучение с подкреплением используется для изучения стратегий управления тормозными и тяговыми усилиями, направленных на минимизацию нагрузок в поезде и повышение безопасности и эффективности движения на железнодорожном транспорте. Авторами построены модели неровностей пути на плане и определены параметры нормального распределения, что позволяет при необходимости генерировать их. Получены дифференциальные уравнения движения поездов для произвольного количества единиц подвижного состава и вариантов состава поезда.

На ПТГ'24 было также доложено о результатах полезного для авиастроительной области исследования [13]. В данной статье предложен подход и программное средство для автоматизации создания баз знаний на основе анализа и преобразования концептуальных моделей в виде диаграмм переходов состояний (рис. 6). Авторы представили программное средство, реализующее предлагаемый подход – KMS (Knowledge Modeling System), которое поддерживает моделирование знаний в виде диаграмм переходов состояний. Основной особенностью предлагаемого подхода и средства является поддержка генерации кодов баз знаний на основе построенных диаграмм. В качестве целевых формализмов представления знаний выбраны продукция, таблицы решений и онтологии. В частности, в качестве основных языков представления знаний используются CLIPS (Integrated Production System) и OWL (Web On-

tology Language). Разработанный подход и программное средство были применены для прототипирования базы знаний при решении задач в области обеспечения техногенной безопасности авиационного оборудования.

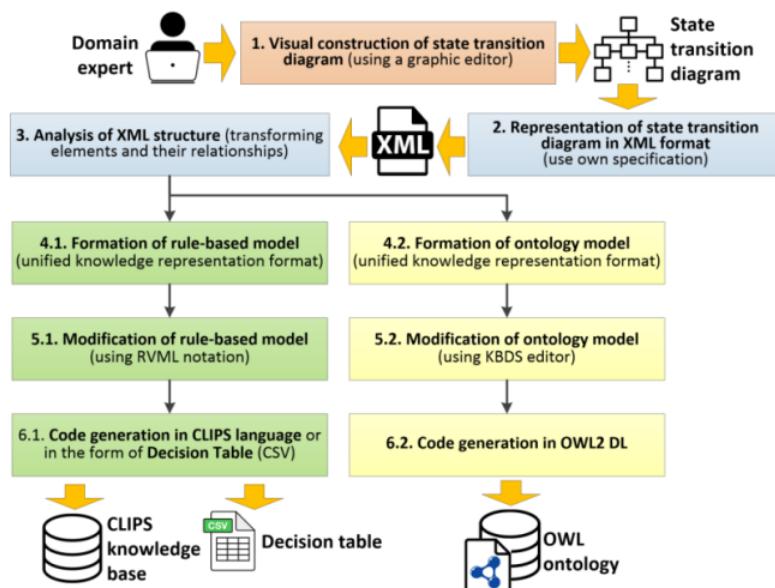


Рис. 6. Основные этапы подхода из исследования [13]

В работе [14] предложено решение для интеллектуализации автотранспортной сферы. Авторы демонстрируют разработанный многоагентный подход при реализации проектирования перекрестков (рис. 7), а также варианты реализации предлагаемых решений в соответствии с МЭК 61499 «Функциональные блоки для промышленных систем управления».

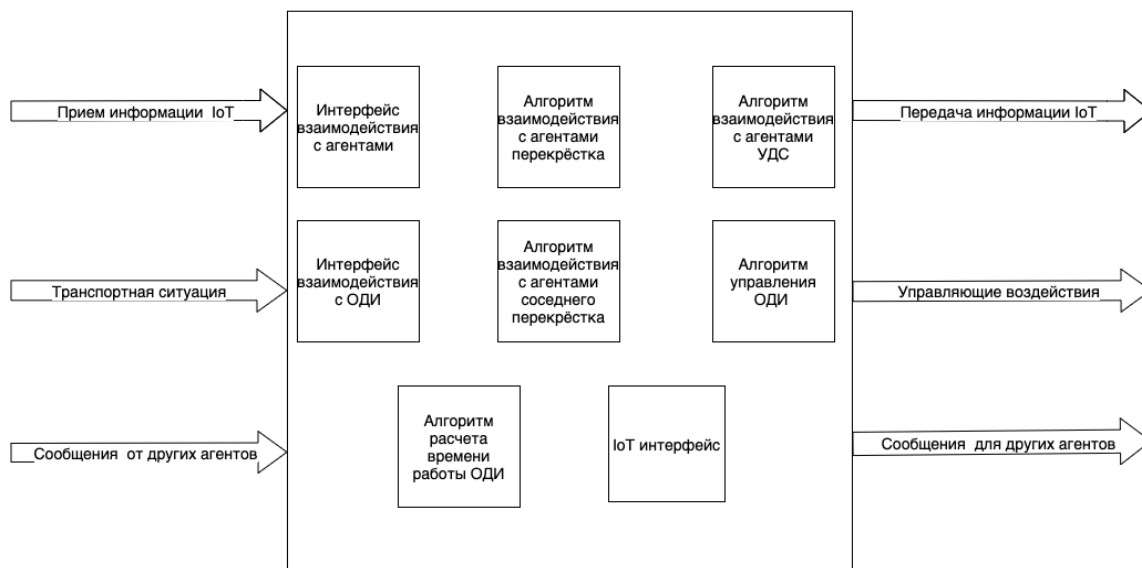


Рис. 7. Структура многоагентного подхода из [14]

В [15] рассматривается метод обеспечения интеллектуализации взаимодействия технической системы с пользователем, позволяющий отражать контекст и оценки состояния системы в терминологии конкретного пользователя. Метод дает пользователю возможность определять на естественном языке логику формирования осмысленных оценок состояния системы на основе наблюдаемых параметров и выделять для каждой оценки необходимые модальности, используемые для оповещения. Суть метода интеллектуализации заключается в том, что общий канал взаимодействия между пользователем и технической системой не заменяется, как это предлагается в рассмотренных во втором разделе статьи

методах, а дополняется интеллектуальным компонентом. Такой интеллектуальный компонент работает в одностороннем режиме и выполняет функции интерпретации формируемых базовым интерфейсом технической системы сигналов и информации. Интерпретация подразумевает формирование оценки состояния системы в определенном конечном пользователем виде. Интеллектуальная часть такого интерфейса, в отличие от известных подходов, использует принципы не искусственного, а естественного интеллекта. Таким образом, интеллектуализация обеспечивается на уровне учета индивидуальных особенностей пользователя, которые позволяют синтезировать частные механизмы взаимодействия, учитывающие особенности его естественного интеллекта.

В другой работе, посвященной формализации требований к прикладному искусственному интеллекту [16], обсуждается вопрос создания машиночитаемого контента (SMART, Standards Machine Applicable, Readable and Transferable), который может быть воспринят как естественным, так и искусственным интеллектом. Авторы предлагают двухуровневую онтологию представления документов, которые могут быть восприняты и человеком, и машиной, а также представляют прикладное использование разработанных принципов для подготовки медицинских рекомендаций (рис. 8).

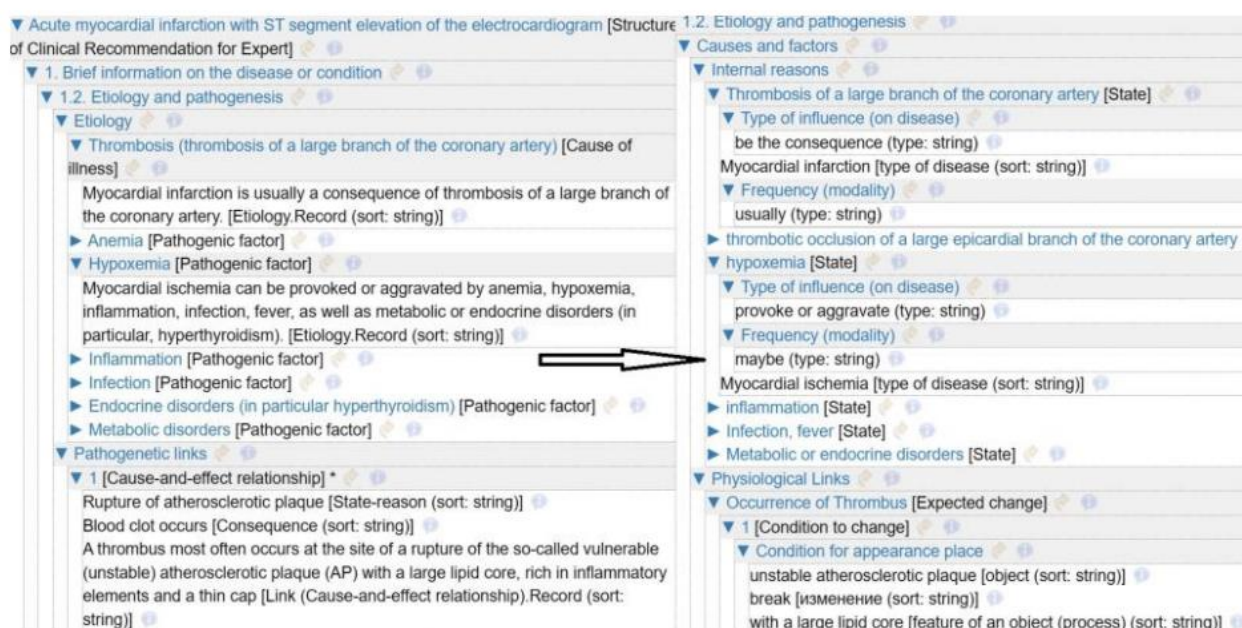


Рис. 8. Прикладное использование онтологий, предлагаемых в работе [16]

3 Кибербезопасность в Индустрии 4.0

Начиная с 2022 г. в ПТИ традиционно выделяется секция, посвященная передовым решениям в области кибербезопасности. В 2024 г. данная секция представлена исследованиями по обнаружению ботнетов [17], аномалий [18–20] и информационных атак [21]. В качестве инструментария авторы предлагают большое разнообразие методов: от федеративного обучения [22] до использования цифровых двойников [23].

Так, в [17] авторы предлагают подход к обнаружению активности ботнета, базирующийся на выявлении аномалий сетевого трафика с помощью машинного обучения. Также в статье рассмотрены основные существующие типы ботнетов на основе классификации по цели атаки и типу контроля. Кроме того, обозначены ключевые современные методы обнаружения их активности. На основании проведенного исследования, сделан вывод о том, что существующие методы обнаружения могут стать недостаточно эффективными по мере усложнения ботнетов с течением времени. Были проведены эксперименты по обнаружению ботнетов с помощью различных алгоритмов машинного обучения при использовании современных наборов данных и сделан вывод о том, какие алгоритмы наиболее эффективны для выполнения этой задачи. Статья будет полезна для разработчиков систем обнаружения вторжений, а также для исследователей в области компьютерной безопасности.

В [18] авторы предложили способ проектирования моделей для детектирования аномального поведения киберфизических систем (КФС). Система показывает высокую точность классификации на

данных, полученных при оказании различных типов деструктивного воздействия. Перспективным направлением дальнейших исследований является реализация метода многоклассовой классификации по определенному типу оказываемого воздействия, что повысит эффективность принятия контрмер по сокращению пагубного влияния на защищаемую систему.

О поиске аномалий в киберфизических системах поднят вопрос и в [19]. В этом исследовании предлагается основанная на совместной информации комплексная стратегия обнаружения аномалий, использующая Gradient Boosting Machine (GBM) и Light GBM для обнаружения киберфизических аномалий и обеспечения безопасности КФС (рис. 9). Предлагаемая методология базируется на основе набора данных о физическом и сетевом оборудовании в режиме реального времени, полученных на испытательном стенде по распределению воды. Предложенное решение позволило повысить точность на 4,6–6,0 % и 0,7–1,8 %, а также снизить частоту ложных срабатываний в сети и физических наборах данных на 4,7–6,3 % и 0,7–1,4 % соответственно.

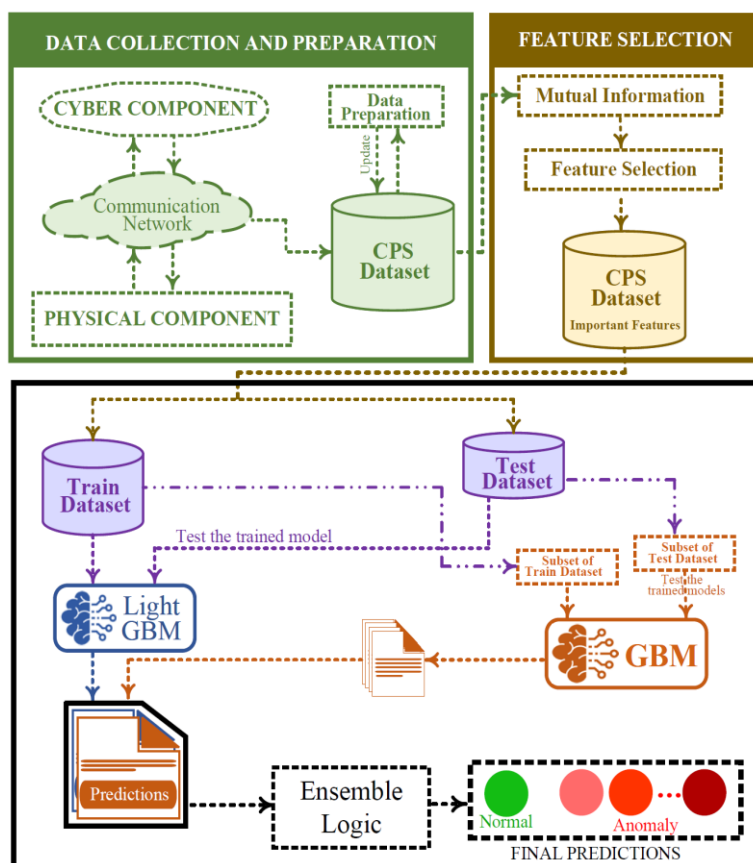


Рис. 9. Предложенный в [19] алгоритм

В [20] для решения поиска аномалий авторами предложено использование распределенных вычислений. Федеративное обучение (FL) – это парадигма распределенного машинного обучения, при которой несколько сторон совместно обучают общую модель, сохраняя конфиденциальность своих данных. Однако этот совместный процесс предоставляет клиенту полный доступ к глобальной модели, тем самым повышая риск утечки модели. Чтобы снизить этот риск, крайне важно разработать методы проверки владения моделью и отслеживания вредоносных клиентов, ответственных за утечку модели. В существующих методиках часто используются методы создания водяных знаков в формате «белого ящика», при этом процесс проверки водяных знаков требует прямого доступа к внутренним параметрам и структуре модели. Этот подход неосуществим во многих реальных сценариях, т. к. многие потенциально подозрительные модели неохотно раскрывают свои внутренние параметры. В работе [20] предложен полностью «черный ящик», который решает эти проблемы. Метод заключается в обработке исходных данных для создания основы авторского набора триггеров водяных знаков. Результаты экспериментов показывают, что данный подход сохраняет точность исходной задачи, обеспечивая при этом проверку правообладателя и отслеживание источников утечки. Кроме того, такой метод демонстрирует высокую устойчивость к различным атакам по удалению водяных знаков и их обнаружению.

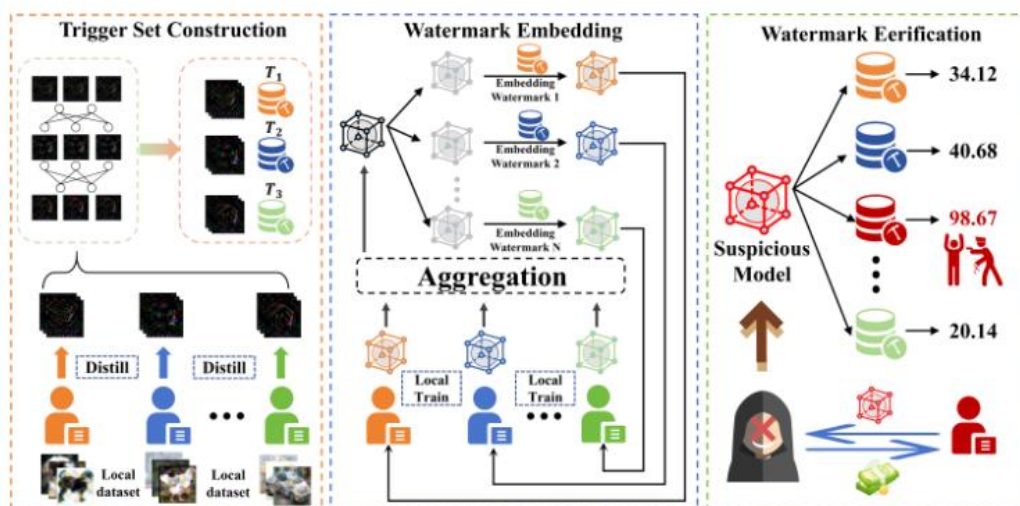


Рис. 10. Метод, предложенный в [20]

Основой такого метода является очистка (дистилляция) данных путем получения оптимизированного набора параметров θ^* из начального набора параметров θ_0 :

$$\min J(\Phi) = \frac{1}{|B|} \sum_{i=1}^{|B|} \ell(f(x_i; \theta^*), y_i),$$

$$\text{subject to } \theta^* = \text{OPT}(\theta_0, D_t; \alpha_0, \beta_0, \ell, T),$$

где α_0, β_0 – скорость и момент обучения для $\text{OPT}(\cdot, \cdot)$; $J(\Phi)$ – потери обобщения на B (minibatch); D_t – тестовый набор данных; $\ell(f(x; \theta^*), y)$ – функция потерь.

В таком виде очищенный набор данных будет поддерживать сильную корреляцию с оригинальным набором:

$$E_{(x,y)} \sim D_{Te} [m(f(x; \theta^*), y)] \cong E_{(x,y)} \sim D_{Te} [m(f(x; \theta'^*), y)],$$

где m – метрика (например, точность).

Моделью всегда является нейроклассификатор $f(x; \theta^*)$, параметризованный на θ и обученный на функции потерь $\ell(f(x; \theta^*), y)$.

После очистки набора данных предлагается «склейка» (\oplus) данных с одинаковыми признаками:

$$D_T \{x_i, y_i\} \oplus D_T \{x_j, y_j\} = D_T \{x_{ij}, y_j\}.$$

На полученный набор данных накладываются водяные знаки для последующей защиты от их потери. При этом используется критерий минимального влияния водяного знака на исходное изображение:

$$\min_{\theta_k} H'(\theta_k^f) = H(\theta_k^f) + \frac{\beta}{2} \|\theta_k^f - \theta_g^f\|^2,$$

где θ_k^f – исходный параметр глобальной модели.

На выходе происходит тестирование «подозрительных» моделей. Та модель, которая дает результат выше заданного порога, признается вредоносной.

И, наконец, в [23] предложен метод цифровых двойников. Авторами обоснована необходимость внедрения более активного подхода с точки зрения понимания, повышения осведомленности и борьбы с непреднамеренными инсайдерскими угрозами. Был предложен и апробирован новый эффективный метод защиты информационных систем от инсайдерских угроз, основанный на моделировании на основе данных и машинном обучении, с использованием цифрового двойника, который обеспечивает безопасную и благоприятную среду для решения операционных задач в эпоху индустрии 4.0/5.0.

4 Интеллектуальные технологии в социальных и медицинских науках

Всего в рамках указанной секции было зачитано 10 докладов.

В работе [24] рассмотрен метод нечеткого ситуативного управления, предназначенный для идентификации состояний пациента в условиях неполноты информации. Управление медико-технологическим процессом, включающим обследование, диагностику и лечение, осуществляется с использованием интеллектуальной системы медико-технологического процесса (СМТП). Она представляет собой набор компонентных моделей, типы и разновидности которых перечислены в табл. 3.

Таблица 3

Компонентные модели для построения композиционной гибридной модели «Поступление в стационар»

Компоненты ССМТП	Тип компонентной модели
Осмотр больного в приемном отделении	Нечетко-логическая модель
ЭКГ-исследование	Нейросетевая модель
Лабораторные исследования	Нечетко-логическая модель
Заключение о направлении в одно из специализированных отделений	Нечетко-логическая модель

Объединение компонентных моделей в соответствии с их взаимосвязями создает композиционную гибридную модель СМТП. Метод нечеткого ситуативного управления позволяет идентифицировать текущую нечеткую ситуацию, учесть специфику и различные стратегии управления в зависимости от складывающейся ситуации. Ключевой процедурой в методе нечеткого ситуативного управления является нечеткий логический вывод, который представляет обобщение традиционно дедуктивного вывода *modus ponens*. Недостаточная полнота дедукции компенсируется абдуктивным выводом. Логический вывод основан на одношаговой или многошаговой процедуре определения максимальной степени сходства текущей нечеткой ситуации с ситуациями, принятыми за эталонные, в соответствии с которыми принимаются решения или диагностические заключения. Решения, выдаваемые в результате вывода, определяют переход между состояниями пациента. Фрагмент системы ситуационного управления лечением пациента приведен ниже на рис. 11.

В работе [25] проводится исследование почерка пациентов после инсульта в процессе их реабилитации. Идентификация почерка осуществляется с использованием нескольких типов классификаторов. Целью исследования является выбор классификатора, обеспечивающего наилучшую оценку мелкой моторики пациента в период его реабилитации. В качестве классификаторов выступают такие модели, как *k*-ближайших соседей (KNN), метод опорных векторов (SVC), дерево решений (DT) и наивный байесовский классификатор (NB).

Динамическими объектами классификации являются подписи. Динамическое распознавание подписи основано на анализе нескольких характеристик почерка, таких как параметры движения, давление, азимут и угол наклона пера в определенные моменты времени, а также скорость и ускорение вышеперечисленных величин. Для распознавания подписи в базу данных записываются следующие параметры: скорость (общая, горизонтальная, вертикальная), ускорение (общее, горизонтальное, вертикальное), рывок (общий, горизонтальный, вертикальный), корреляция Спирмена (давления и скоростей, давления и ускорения), количество экстремумов (давление, скорость, ускорение). В общей сложности извлекается 45 параметров. Для анализа полученных значений создаются графики зависимости скорости от времени для двух классов (до инсульта – *a*, и после инсульта – *б*) (рис. 12).



Рис. 11. Фрагмент системы ситуационного управления (блок «Приемное отделение»)

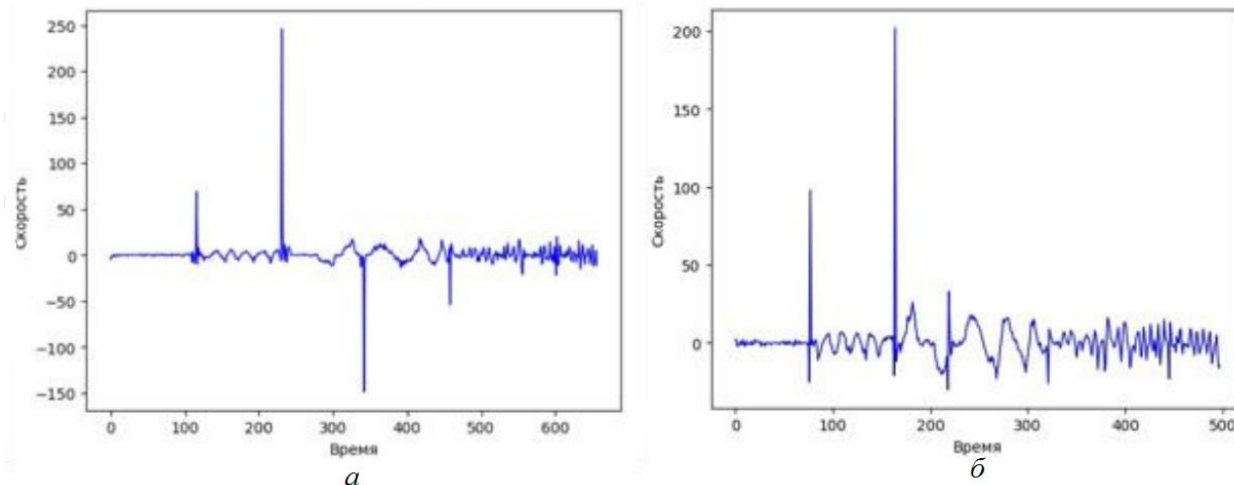


Рис. 12. График вертикальной скорости

На обоих графиках заметны резкие скачки, определяющие переход от одного элемента изображения к другому. Также видно, что график экземпляра подписи слева проходит плавно, без рывков. Справа видно множество колебаний, так как пациенты, проходящие реабилитацию после инсульта, имеют нарушения мелкомоторных движений.

Авторы статьи делают вывод, что лучшим классификатором является модель на основе сиамской нейронной сети. Для обучения нейросетевой модели авторы предлагают ансамблевый метод.

Работа [26] посвящена анализу нового класса и метода построения прогностических моделей для решения задач прогнозирования неблагоприятных событий и их применения в клинической практике.

Основным недостатком существующих моделей прогнозирования в клинической практике является их плохая интерпретируемость, что вызывает недоверие врачей к генерируемым заключениям.

Для решения проблемы авторы используют технологию объяснимого искусственного интеллекта, основанную на деревьях решений (ДР). В статье предложен новый класс прогностических моделей на основе объединения метода аддитивного объяснения Шепли, с помощью которого удается оценить степень влияния предикторов на конечную точку, и дерева решений, в структуру которого включены в качестве новых признаков факторы риска (ФР), полученные с помощью многоуровневой категоризации предикторов, имеющих наибольшую предсказательную ценность.

Новая гибридная модель позволяет модифицировать ДР, обеспечивая, с одной стороны, прозрачность принимаемого решения, а с другой – высокую эффективность модели, что объясняется использованием новых параметров, извлеченных из клинических данных в процессе выделения ФР. Процесс построения дерева решений представляет собой рекурсивный алгоритм разделения набора данных с помощью оптимальных правил. Он разбивает данные, выбирая наилучший порог отсечения, и рекурсивно строит дерево решения, обеспечивая наибольший прирост информации. Важной отличительной особенностью метода является то, что в процедуре разделения данных поиск порогов осуществляется не по уникальным значениям переменных, а из перечня ранее выделенных ФР. Для определения оптимального правила используют критерий прироста информации (энтропийный критерий) и индекс Джини, оценивающие качество разделения данных с учетом обоих классов:

$$\text{Gain}(A') = - \sum_{j=1}^n P_j(A) \cdot \log(P_j(A)) + \sum_{j=1}^n P_j(A') \cdot \log(P_j(A')),$$

где P_j – вероятность i -го класса в наборе данных; A' – подмножество данных, полученное с помощью правила; A – общий набор данных; n – количество прогнозируемых классов;

$$\text{Gini}(A') = 1 - \sum_{j=1}^n P_j(A')^2,$$

где P_j – вероятность i -го класса в наборе данных; A' – подмножество данных, полученное с помощью правила; A – общий набор данных; n – количество прогнозируемых классов.

В связи с тем, что в процессе построения дерева решений при разделении данных в узле образуются два подмножества, метрики качества усредняются с учетом масштаба подмножеств:

$$\text{Mean}(\text{Met}(A')) = (\text{len}(A_t)/\text{len}(A) \cdot \text{Met}(A_t) + \text{len}(A_f)/\text{len}(A) \cdot \text{Met}(A_f)) / 2,$$

где len – количество записей в наборе данных; A_t – подмножество данных, удовлетворяющих правилу; A_f – подмножество данных, не удовлетворяющих правилу; A – общий набор данных; Met – метрика качества разделения набора данных.

Разработанное на основе предикторной модели модифицированное ДР обеспечивает возможность интерпретации прогнозов за счет извлечения продукционных правил из ДР. В статье предикторная модель выступает в качестве прогностической модели внутригоспитальной летальности (ВГЛ) после чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ). Извлеченные из ДР правила позволяют определить степень риска ВГЛ и принять необходимые решения по корректировке лечения.

Эксперименты, проведенные авторами на данных пациентов с инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST, которым выполнялось ЧКВ, показали, что разработанная прогностическая модель демонстрирует более высокую точность по сравнению с используемым в настоящее время методом CART и позволяет получать хорошо интерпретируемые результаты прогноза.

В статье [27] также рассматривается новый класс прогностических моделей на основе дооперационных предикторов для прогнозирования послеоперационной фибрилляции предсердий (ПоФП) у больных ишемической болезнью сердца после коронарного шунтирования. Прогностические модели разработаны методами многофакторной логистической регрессии, случайного леса и стохастического градиентного бустинга. Дихотомизация предикторов выполнялась методами поиска на сетке оптимальных точек отсечения, расчета центроидов и аддитивного объяснения Шепли (SHAP).

Метод Шепли позволяет выделить пороги, на которых функция влияния предиктора на конечную точку демонстрировала сингулярность, что может наблюдаться несколько раз в диапазоне изменения значений непрерывного признака. Для выполнения многоуровневой категоризации авторы объединяли все пороговые значения, выделенные с помощью дихотомизации показателей различными методами, в том числе по методу SHAP. При этом близкие пороговые значения объединились в одно путем

усреднения. Метод центроидов предполагал использование медианы анализируемых признаков в группах сравнения, с помощью которых выделяли четыре категории для каждого показателя. Для оценки степени влияния показателей на конечную точку также применяли метод Шепли.

На основе многоуровневых предикторов авторы разработали четыре типа прогностических моделей ПоФП. Результаты экспериментов по оценке точности прогностических моделей ПоФП приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка точности прогностических моделей ПоФП на основе предикторов с многоуровневой категоризацией

Метрики	Многоуровневый SHAP	Мультиметрическая категоризация	Медианы групп и центроид	Квартили
AUC	0.795 [0.77; 0.82]	0.802 [0.78; 0.82]	0.7 [0.67; 0.77]	0.66 [0.63; 0.69]
Sen	0.735 [0.67; 0.78]	0.741 [0.7; 0.78]	0.65 [0.61; 0.69]	0.6 [0.55; 0.65]
Spec	0.71 [0.688; 0.73]	0.713 [0.69; 0.73]	0.652 [0.63; 0.68]	0.618 [0.58; 0.66]
F-score	0.503 [0.47; 0.54]	0.507 [0.48; 0.53]	0.422 [0.4; 0.44]	0.31 [0.29; 0.34]

Лучшие прогностические свойства продемонстрировала модель с предикторами, выделенными методом мультиметрической категоризации.

В работе [28] рассматривается актуальная проблема отсутствия эффективных инструментов для экспресс-определения профессиональной предрасположенности пользователей на основе анализа их профилей в социальных сетях. Цель данного исследования заключается в изучении возможности проведения профориентации с использованием многофункциональной системы в виде приложения для платформы VK Mini Apps, способной автоматически анализировать профили пользователей социальной сети «ВКонтакте», которая содержит данные о тематике подписок пользователей.

В качестве методики для определения профессионального типа личности авторы использовали типизацию, разработанную системой Holland – RIASEC codes. Набор данных, содержащий результаты психологического тестирования и ID пользователей, был получен при помощи приложения «Психологические тесты». В статье также разработан программный модуль для асинхронной выгрузки тематик групп пользователей. На вход модулю подается список ID в виде csv-файла, а по результатам работы генерируется файл, содержащий ID, идентифицирующий респондента, пол пользователя и столбец со списком тематик вида (тематика: количество групп с такой тематикой). Также в ходе предобработки из набора данных исключаются все строки, содержащие только нули (т. е. те пользователи, которые не подписаны ни на одну группу). После этого данные обезличиваются и нормализуются. Программа разработана на языке Python с использованием библиотек scikit-learn, numpy, asyncio, pandas.

В результате набор данных представляется в виде множества:

$$U = \left\{ \left(u_i^{subject}, sex_i, type_i \right), i = \overline{1, n} \right\},$$

где n – число пользователей, $u_i^{subject}$ – нормализованный вектор признаков, характеризующий тематику подписок; sex_i – пол пользователя, указанный в социальной сети «ВКонтакте»; $type_i$ – целевой вектор мультиклассовой классификации.

Пример анализируемых данных представлен в табл. 5.

Таблица 5

Пример анализируемых данных

	Автомобили	...	Электроника	Юмор	Языки	Пол	target
0	0.0827	...	0.0000	0.1654	0.0000	1	I
1	0.0000	...	0.0000	0.9625	0.0201	2	I
2	0.0089	...	0.0089	0.3917	0.0356	1	S
3	0.0000	...	0.0000	0.8939	0.0043	2	C
...

Научная значимость исследования, по мнению авторов, заключается в идентификации взаимосвязей между поведенческими паттернами в социальных сетях и психологическими особенностями в срезе профессионального самоопределения.

Помимо вышеперечисленных докладов в секции была представлена работа [29], в которой описан классификатор на основе нейронных сетей для определения речевого состояния пациента.

5 Неклассические логики и правдоподобный вывод

В данной секции было представлено немного докладов, однако все они затрагивали фундаментальные проблемы ИИ, касающиеся моделирования логических рассуждений и их применения в интеллектуальных системах поддержки принятия решений (ИСППР).

В работе [30] рассматриваются темпоральные логики ветвящегося времени и их практическое использование в составе современных распределенных ИСППР реального времени.

Для построения темпоральной логики ветвящегося времени, ориентированной на применение в ИСППР реального времени, предлагается подход на основе согласования ограничений. Реализация алгоритма вывода основывается на решении задачи согласования темпоральных ограничений (ЗСТО). Формально ЗСТО определяется набором $Z = (V, D, BTR, C)$, где $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ – конечное множество темпоральных переменных; D – область значений темпоральных переменных; $BTR = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ – конечное множество бинарных темпоральных ограничений, объединение которых является универсальным ограничением U ; $C = \{C_{ij} \mid C_{ij} = \{r_1, \dots, r_k\}; k > 0; r_1, \dots, r_k \in BTR; i, j \leq m\}$ – конечное множество ограничений, где C_{ij} – ограничение над темпоральными переменными V_i и V_j , интерпретируемое как $(V_i, r_1, V_j) \vee \dots \vee (V_i, r_k, V_j)$.

ЗСТО называется *единичной* ЗСТО, если и только если в множество C входят только точные ограничения. ЗСТО имеет решение, если существуют такие значения переменных V_i , что выполняются ограничения из множества C . Если такое означивание построить нельзя, то ЗСВО является *несогласованной*. Если ЗСТО имеет хотя бы одно решение, то ее называют *согласованной*.

Над темпоральными ограничениями определяются следующие операции: *инвертирование* (\sim): $\sim(r_1, \dots, r_k) = (\sim r_1, \dots, \sim r_k)$; *пересечение*: $S \cap T = \{r \mid r \in S, r \in T\}$; *композиция*: $T \bullet S = \{t_1, \dots, t_k\} \bullet \{s_1, \dots, s_q\} = \{t_1 \bullet s_1, t_1 \bullet s_2, \dots, t_k \bullet s_q\}$.

Множество всех возможных типов бинарных темпоральных ограничений состоит из $2|BTR|$ элементов, замкнутых относительно операций \sim, \cap, \bullet , и образует алгебру темпоральных ограничений.

Считается, что ограничение типа r_i сильнее ограничения типа r_j и записывается $r_i \rightarrow r_j$, если и только если из r_i следует r_j , но не его противоречие. Например, ограничение типа «<» сильнее, чем ограничение типа \neq , так как из первого следует второе.

Ограничение C_{ij} выполнимо для переменных V_i и V_j , если и только если существует хотя бы одно решение ЗСТО, в котором C_{ij} является ограничением для этих переменных. Минимальным ограничением C_{ij}^{\min} называется множество, состоящее только из выполнимых ограничений для V_i и V_j . ЗСТО называется *минимальной*, если все ее ограничения минимальны (т. е. из ограничения исключаются компоненты, не входящие ни в одно решение). Для любой ЗСТО всегда можно осуществить переход к эквивалентной минимальной ЗСТО или показать несогласованность ограничений.

Ветвящаяся ЗСТО (ВЗСТО) определяется как множество альтернативных сценариев S_i , унаследованных от одного начального сценария S_0 : $VZ = \{S_i\}$, где $S_i = (V_i, C_i, S_j)$ – сценарий, $i = 0, 1, \dots$, $S_0 = (V_0, D, BTR, C_0)$ – единичная ЗСТО, интерпретируемая как начальный сценарий; $S_i (i > 0)$ – наследуемый сценарий, который расширяет множество переменных V_j и множество единичных ограничений C_j сценария $S_j, j < i$, множествами V_i и C_i соответственно; D – область определения переменных (множество целых чисел), BTR – множество базовых ограничений.

На каждой ветви ВЗСТО можно определить задачи поиска минимального представления и проверки согласованности, т. е. можно говорить о согласованном или несогласованном сценарии и сценарии в минимальном представлении. Сценарий, для которого не существует наследуемых сценариев, называется *терминальным* сценарием.

Для ВЗСТО определяются следующие подзадачи: *проверка согласованности* – проверка существования как минимум одного терминального согласованного сценария $S_i \in VZ$; *проверка истинности* каких-либо утверждений для конкретного терминального сценария; *преобразование* всех ЗСВО, соответствующих согласованным сценариям, к минимальному виду; *проверка истинности* каких-либо утверждений для всех терминальных сценариев или хотя бы для одного терминального сценария.

В завершение работы [30] авторы приводят алгоритмы решения задач для ВЗСТО, построенные на основе парадигмы согласования временных ограничений, с использованием ряда улучшений и эвристик для алгоритмов вывода. Предложенные эвристики существенно снижают алгоритмическую сложность процедур вывода.

В работе [31] исследуется задача выявления причинно-следственных зависимостей в данных с использованием логических средств и методов теории вероятностей.

Центральным компонентом прикладных ИИ-систем является их процедурный «инструментарий» – проблемно ориентированные математические модели, методы и алгоритмы, способные отразить как общие принципы интеллектуального анализа данных, так и специфику конкретных областей приложения. Среди такого рода «инструментов» анализа данных и поддержки принятия решений особое место отводится средствам восстановления причинно-следственных связей, неявным образом представленных в обрабатываемых эмпирических данных. Известно, что при высокой частоте встречаемости причинно-следственных связей частотные характеристики позволяют восстанавливать эти зависимости. В данной работе рассматривается вероятностная схема, позволяющая описать редкую встречаемость причинно-следственных связей.

Рассматривается простой случай, когда исходные данные представляют случайную последовательность свойств из конечного множества $A_N = \{x_1, \dots, x_N\}$. Случайность определяется с помощью полиномиальной схемы из M испытаний с известными вероятностями $p_k = \frac{1}{N}$, $k = 1, \dots, N$.

Построенную модель авторы называют информационным пространством $IS1$. Помимо $IS1$, авторы вводят еще два ресурса – $IS2$ и $IS3$, где $IS2$ представляет множество свойств $B_N = \{y_1, \dots, y_N\}$, а $IS3$ – множество свойств $C_N = \{z_1, \dots, z_N\}$. В $IS2$ и $IS3$ также определены равновероятные полиномиальные схемы длины M . Считается, что каждая вероятностная схема вырабатывает очередное свойство синхронно.

В рассматриваемой схеме причинно-следственной связи следствие может появиться не далее чем через t шагов от появления причины в $IS1$. Для простоты полагается $t = 0$.

1 Схема « $x \rightarrow y$ & $x \rightarrow z$ » возникает, когда у свойства x есть два следствия – y и z .

2 Схема « $x \rightarrow y$ & $y \rightarrow z$ » определяется как последовательность причинно-следственных связей: x влечет появление y , и y влечет появление z . Эта схема также называется транзитивной причиной x для следствия z .

Предложенный метод выполняется за два шага в предположении неизвестности ни причины, ни следствия. Сначала реализуются синхронно три полиномиальные схемы в $IS1$, $IS2$ и $IS3$, а затем в $IS2$ и $IS3$ из появившихся в последовательности $IS1$ причин строятся их следствия.

В работе авторы демонстрируют некоторые возможности использования разработанного метода в прикладных системах ИИ для выявления зависимостей причинно-следственного характера. В ситуациях, когда доказательства дедуктивного характера имеют ограниченную применимость объяснения, формируемые на базе восстанавливаемых из анализируемых данных каузальных зависимостей, могут быть использованы как инструмент повышения доверия к результатам работы систем ИИ.

Помимо рассмотренных выше двух работ в секции неклассических логик интерес вызвала работа [32], направленная на разработку нового подхода, который логическими средствами реализует правдоподобные рассуждения для индуктивного порождения причинно-следственных зависимостей в ограниченных наборах данных. Предлагаемый подход базируется на эмпирической индукции, представленной в виде расширений индуктивных методов Д. С. Милля. В статье показывается возможность применения разработанного метода в ряде критических областей – безопасности, транспорта, медицины, где требуется интерпретируемость и объяснимость работы систем ИИ.

Заключение

В обзорной статье выполнен краткий анализ работ, представленных на конференции ПТИ'24. Рассмотрены основные направления теоретических и прикладных исследований в области современных интеллектуальных технологий. Отличительной чертой докладов в 2024 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, представленных на конференции ПТИ'24, касалась использования нейросетевых технологий по шести основным направлениям: машинное обучение и его

приложения, нейронные и байесовские сети, промышленная интеллектуализация, кибербезопасность в Индустрии 4.0, интеллектуальные технологии в социальных и медицинских науках, неклассические логики и правдоподобный вывод. 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 сборнике трудов конференции ИТИ'24 : *Lecture Notes in Networks and Systems* Vol. 1209 – <https://doi.org/10.1007/978-3-031-77688-5>, 1210 – <https://doi.org/10.1007/978-3-031-77411-9>, LNNS – Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2025.

Список литературы / References

1 **Konstantinov, A.** An explicit concept-based approach for incorporating expert rules into machine learning models / A. Konstantinov, L. Utkin // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 153–162. – ISBN 978-3-031-77688-5.

2 Synthesis and analysis of porous frame structures images using machine learning methods / A. Poltavskiy, E. Kolomenskaya, G. Beliavsky [et al.] // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 389–401. – ISBN 978-3-031-77688-5.

3 Impact of Spectral and Meteorological Data Fusion on the Accuracy of Woody Plant Identification Using Deep Machine Learning Methods / A. Alexandrov, P. Dmitriev, A. Dmitrieva [et al.] // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. – Cham : Springer International Publishing, 2024. In 2 vol. Vol. 1. – P. 207–216. – ISBN 978-3-031-77688-5.

4 **Gurov, Y.** Conditional variational autoencoders with fuzzy inference / Y. Gurov, D. Khilkov // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. – Cham : Springer International Publishing, 2024. In 2 vol. Vol. 2. – P. 91–103. – ISBN 978-3-031-77411-9.

5 **Ponomarev, A.** Advanced metrics for the detection problem on perspective transformed images / A. Ponomarev, A. Agafonov, A. Smirnov [et al.] // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 420–430. – ISBN 978-3-031-77688-5.

6 **Narendra, A.** Leveraging single and multi-task reinforcement learning algorithms for autonomous Mobile Aloha Robot / A. Narendra, D. Makarov, A. Panov // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 443–453. – ISBN 978-3-031-77688-5.

7 **Vyatkin, A.** Algebraic Bayesian networks: refinement of the approximate generation of the knowledge pattern canonical representation / A. Vyatkin, M. Abramov // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 466–474. – ISBN 978-3-031-77688-5.

8 **Ilicheva, V. V.** Complexity estimate of logical specifications execution for transport processes prototyping / V. V. Ilicheva, A. N. Guda // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 3–11. – ISBN 978-3-031-77688-5.

9 Planning station operations based on actual station performance obtained “from the wheel” / S. Kovalev, A. Sukhanov, I. Olgezyer, V. Ierusalimov // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 33–42. – ISBN 978-3-031-77688-5.

10 Safety control of the use of technical vision systems on hump humps / K. Kornienko, P. Borovlev, K. Maksimov [et al.] // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 62–69. – ISBN 978-3-031-77688-5.

11 Intelligent approach to solving the problem control over railway cars in the marshalling yard / A. Shulzhenko, A. Sukhanov, M. Butakova, V. Ierusalimov // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 62–69. – ISBN 978-3-031-77688-5.

- 12 **Bulavin, Yu.** Leveraging deep reinforcement learning for reducing longitudinal train forces in railway systems / Yu. Bulavin, O. Ignatieva // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. In 2 vol. Vol. 1. – P. 118–130. – ISBN 978-3-031-77688-5.
- 13 **Dorodnykh, N.** Using state transition diagrams for automated knowledge base construction / N. Dorodnykh, A. Yurin // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 21–32. – ISBN 978-3-031-77688-5.
- 14 **Gladkov, L.** The development of a method for managing traffic flows based on an agent-based approach / L. Gladkov, G. Veselov, D. Elkin // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 108–117. – ISBN 978-3-031-77688-5.
- 15 **Kucherov, S.** Method for intellectualization of interaction between a technical system and a user in the natural language of a domain / S. Kucherov, Y. Rogozov, A. Sviridov, A. Borisov, Y. Lipko // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. – Cham : Springer International Publishing, 2024. In 2 vol. Vol. 1. – P. 43–51. – ISBN 978-3-031-77688-5.
- 16 **Gribova, V.** SMART standards for industry / V. Gribova, E. Shalfeeva // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 1. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 70–82. – ISBN 978-3-031-77688-5.
- 17 **Zelichenok, I.** Detection of botnets using artificial intelligence methods / I. Zelichenok, K. Zhernova, A. Chechulin, L. Vitkova // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 15–24. – ISBN 978-3-031-77411-9.
- 18 **Mogilny, A.** Framework for the development of anomaly detection and classification models for cyber-physical systems / A. Mogilny, E. Basan, A. Basan // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 57–68. – ISBN 978-3-031-77411-9.
- 19 Mutual information based ensemble anomaly detection strategy for cyber-physical systems / Z. Ahmad, A. Petrovski, I. Kotenko [et al.] // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 69–78. – ISBN 978-3-031-77411-9.
- 20 **Vulfin, A.** System for detecting anomalies in information security logs / A. Vulfin, P. Lozhnikov, A. Sulavko [et al.] // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 35–45. – ISBN 978-3-031-77411-9.
- 21 **Kotenko, I.** A statistical approach to evaluation and selection of wavelets for detecting computer attacks / I. Kotenko, I. Saenko, P. Bortniker // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 3–14. – ISBN 978-3-031-77411-9.
- 22 **Zhou, D.** FedDW: Leveraging dataset distillation for black-box watermarking in federated learning models / Dawei Zhou, Jialiang Peng // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 46–56. – ISBN 978-3-031-77411-9.
- 23 **Petrovski, A.** Insider threat detection within operational technologies using digital twins / A. Petrovski, I. Kotenko, M. Arifeen [et al.] // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 25–34. – ISBN 978-3-031-77411-9.
- 24 **Kobriniskii, B.** Fuzzy situational control at the stages of the medical-and-technological process: problems and possible solutions / B. Kobriniskii // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 312–323. – ISBN 978-3-031-77688-5.
- 25 Formation of a dataset for assessing fine motor skills in handwriting after a stroke and an example of its application / E. Kostyuchenko, V. Ezhova, D. Koshechko, S. Fominykh // *Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference*. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 205–213. – ISBN 978-3-031-77411-9.

26 Predicting atrial fibrillation in patients with ischemic heart disease based on multilevel categorization / K. Shakhgelyan, B. Geltser, N. Kuksin [et al.] // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 225–235. – ISBN 978-3-031-77411-9.

27 Predicting atrial fibrillation in patients with ischemic heart disease based on multilevel categorization / K. Shakhgelyan, V. Rubleb, N. Kuksin [et al.] // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 225–235. – ISBN 978-3-031-77411-9.

28 **Chekalev, A.** Community theme analyser : Predicting career guidance in online social networks / A. Chekalev, A. Khlobystova, M. Abramov // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 153–162. – ISBN 978-3-031-77411-9.

29 Classifier based on neural networks to determine the patient's speech state / D. Novokhrestova, S. Tomilina, P. Laptev, E. Kostyuchenko // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 236–244. In 2 vol. Vol. 2. – ISBN 978-3-031-77411-9.

30 **Eremeev, A.** Research and development of a temporal model of branching time for the Intelligent systems of real-time / A. Eremeev, I. Kurilenko, N. Filinov // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 247–259. – ISBN 978-3-031-77411-9.

31 Probabilistic models for detection of causal relationships in data sequences / M. I. Zabezhailo, A. A. Grusho, N. A. Grusho, E. E. Timonina // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference. In 2 vol. Vol. 2. – Cham : Springer International Publishing, 2024. – P. 271–279. – ISBN 978-3-031-77411-9.

32 **Mikheyenkova, M.** Causal relationships as a basis for diagnosis and decision making / M. Mikheyenkova // Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'24) : Proceedings of the Eighth International Scientific Conference. – Cham : Springer International Publishing, 2024. In 2 vol. Vol. 2. – P. 260–270. – ISBN 978-3-031-77411-9.

S. M. Kovalev, M. A. Butakova, A. N. Guda, I. A. Olgezyer, A. V. Sukhanov

REVIEW OF THE PROCEEDINGS OF THE IITI'24 CONFERENCE

Abstract. This article provides a brief summary of the most interesting reports of the 8th International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies in Engineering and Production” (IITI'24), organized by the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education RSTU, JSC “NIIAS” and Harbin Polytechnic University (China) with the support of the Russian Association of Artificial Intelligence, which was held from November 1 to 7, 2024 in China (Shanghai and Harbin). The opening of the IITI'24 conference took place in Shanghai, as part of the CIEP 2024 International Experience Exchange Forum at the invitation of the Ministry of Human Resources and Social Security of China, which was attended by over 2,000 scientists from more than 120 countries.

The aim of IITI'24 was to share the best practices in fundamental and applied research in the field of artificial intelligence, information technology and automation, as well as to develop international contacts. Particular attention was paid to advanced intelligent technologies and their use in various fields of industry, including railway transport.

Keywords: intelligent information technologies, artificial intelligence, industrial intellectualization, Industry 4.0.

For citation: Review of the proceedings of the IITI'24 conference / S. M. Kovalev, M. A. Butakova, A. N. Guda [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 107–133. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_107.

Сведения об авторах**Ковалев Сергей Михайлович**

Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (РостФ НИИАС),
научный руководитель

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ksm@rfniias.ru

Бутакова Мария Александровна

Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (РостФ НИИАС),
главный научный сотрудник

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Информатика»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: m.butakova@vniias.ru

Гуда Александр Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Информатика»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой, проректор по научной работе,
e-mail: guda@rgups.ru

Ольгейзер Иван Александрович

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

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: olgeyzer@rfniias.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» (RostF NIIAS),
Scientific Supervisor

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Automation and Telemechanics in Railway Transport»,
Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
e-mail: ksm@rfniias.ru

Butakova Maria Aleksandrovna

Rostov branch of JSC «Scientific Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communications in Railway Transport» (RostF NIIAS),
Chief Researcher

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Science»,
Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
e-mail: m.butakova@vniias.ru

Guda Alexander Nikolayevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Science»,
Doctor of Engineering Sciences,
Professor
Head of the Chair, Vice Rector for Scientific Research,
e-mail: guda@rgups.ru

Olgeyzer Ivan Alexandrovich

Rostov branch of JSC «Scientific Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communications in Railway Transport» (RostF NIIAS)
First Deputy Director of the Branch

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

Суханов Андрей Валерьевич

Ростовский филиал АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (РостФ 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

Sukhanov Andrey Valeryevich

Rostov branch of JSC «Scientific Research and Design Institute of Informatization, Au-tomation and Communications in Railway Transport»
Deputy Head of the Department of Intelligent Information Technologies of the Digital Station

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Engineering and Automated Control Systems»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
email: a.suhanov@vniias.ru

И. Н. Пугачев, В. С. Тормозов

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ, ОСНОВАННОЙ НА ТЕХНОЛОГИЯХ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ И МЕТОДАХ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Аннотация. В данной статье представлена система мониторинга дорожного движения, основанная на принципах машинного зрения. В основе системы лежат простые веб-камеры, установленные над дорожным полотном, которые фиксируют изображения транспортных средств. Далее, с применением алгоритмов обработки изображений и методов машинного обучения, система осуществляет определение количества и классификацию транспортных средств на дороге.

Система включает в себя несколько ключевых модулей: модуль вычитания фона, модуль сегментации переднего плана, модуль получения контуров, модуль обучения и классификации контуров, модуль выделения свойств и модуль кластеризации. Каждый из этих модулей выполняет специфические функции, направленные на обеспечение точного и надежного обнаружения транспортных средств. Система была протестирована на изображениях дорожного движения. Результаты тестирования подтверждают способность системы адаптироваться к различным условиям и сценариям, что является критически важным для систем видеонаблюдения и управления дорожным движением.

В статье также обсуждаются перспективы дальнейшего развития системы, включая возможность использования более сложных архитектур нейронных сетей и интеграции с другими системами.

Ключевые слова: мониторинг дорожного движения, машинное зрение, обработка изображений, машинное обучение, классификация транспортных средств.

Для цитирования: Пугачев, И. Н. Разработка и анализ системы мониторинга дорожного движения, основанной на технологиях машинного зрения и методах кластерного анализа / И. Н. Пугачев, В. С. Тормозов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 134–145. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_134.

Введение

Мониторинг дорожного движения на густонаселенных городских улицах с помощью камер наблюдения – это сложная задача, требующая поиска эффективных и универсальных решений. Современные методы, такие как ручной подсчет транспортных средств и использование магнитных петель на дороге, хоть и являются дорогими, имеют ограничения в функциональности. Они позволяют лишь определить количество автомобилей на дороге, но не предоставляют информации о их классификации, скорости и размерах.

В этой работе предлагается более дешевая и универсальная система мониторинга дорожного движения, основанная на методах машинного зрения. В основе системы лежат простые веб-камеры, расположенные над дорожным полотном и обеспечивающие полный обзор. Большинство существующих исследований и приложений по мониторингу транспорта сосредоточены на наблюдении за автомобилями на шоссе, в то время как мониторинг движения в густонаселенных городских районах представляет собой гораздо более сложную задачу.

Цель данной работы – исследовать применимость и эффективность методов машинного зрения в разрабатываемой системе мониторинга транспорта. Эти методы включают в себя алгоритмы распознавания транспортных средств, анализа их скорости и классификации по различным параметрам. Внедрение таких технологий значительно улучшит качество и точность мониторинга дорожного движения, что, в свою очередь, повысит безопасность и эффективность транспортных потоков в городских условиях.

Разработка системы мониторинга дорожного движения с использованием методов машинного зрения требует решения ряда задач. Во-первых, необходимо обеспечить высокую точность распознава-

ния транспортных средств на изображениях, полученных с видеокамер. Для этого используются алгоритмы обработки изображений, которые позволяют выделить контуры автомобилей и определить их тип.

Во-вторых, важно разработать алгоритмы анализа скорости транспортных средств. Это включает в себя определение средней скорости движения по кадрам видео и выявление аномалий, таких как резкое ускорение или торможение.

В-третьих, необходимо классифицировать транспортные средства по различным параметрам, таким как тип автомобиля (легковой, грузовик, автобус и т.д.), размер и другие характеристики. Это позволит более точно анализировать транспортные потоки и принимать меры для их оптимизации.

Для решения этих задач применяются современные методы машинного обучения и обработки данных. Алгоритмы глубокого обучения обеспечивают высокую точность распознавания транспортных средств, а методы кластеризации и классификации помогают анализировать большие объемы информации и выявлять закономерности в поведении транспортных потоков.

Использование методов машинного зрения в системе мониторинга дорожного движения не только повышает точность и качество мониторинга, но и снижает затраты на его проведение. Веб-камеры, применяемые для наблюдения за дорожным движением, являются относительно недорогими устройствами, а алгоритмы машинного зрения позволяют автоматизировать процесс обработки данных и анализа транспортных потоков.

Таким образом, разработка системы мониторинга дорожного движения с использованием методов машинного зрения представляет собой перспективное направление, которое значительно улучшает качество транспортной инфраструктуры и повышает безопасность дорожного движения в городских условиях. Однако для успешного внедрения данной системы необходимо решить ряд технических и организационных задач, таких как обеспечение высокой точности распознавания транспортных средств, разработка алгоритмов анализа скорости и классификации, а также интеграция системы с существующими инфраструктурами и сервисами.

В заключение можно сказать, что разработка и внедрение системы мониторинга дорожного движения с использованием методов машинного зрения являются важным шагом на пути к созданию более эффективных и безопасных транспортных систем в городских условиях. Эта система позволит не только улучшить качество мониторинга и анализа транспортных потоков, но и снизить затраты на проведение этих работ. Важно отметить, что разработка и внедрение такой системы требует комплексного подхода, включающего в себя не только технические аспекты, но и организационные и правовые меры. Необходимо учитывать специфику городских условий, включая различные типы транспортных средств, интенсивность движения и особенности дорожной инфраструктуры.

Одним из ключевых аспектов успешной реализации проекта является обеспечение высокой точности и надежности системы мониторинга. Это требует использования современных технологий и методов обработки данных, а также проведения тщательного тестирования и верификации системы.

Кроме того, необходимо обеспечить интеграцию системы мониторинга с существующими инфраструктурами и сервисами, такими как системы управления дорожным движением и системы оповещения о чрезвычайных ситуациях. Это позволит создать единое информационное пространство, которое будет способствовать более эффективному управлению транспортными потоками и повышению безопасности дорожного движения.

В перспективе разработка системы мониторинга дорожного движения с использованием методов машинного зрения может стать основой для создания более интеллектуальных и адаптивных транспортных систем. Такие системы будут способны автоматически адаптироваться к изменениям в дорожной ситуации, прогнозировать возможные заторы и предлагать оптимальные маршруты движения. Это, в свою очередь, позволит значительно повысить эффективность использования транспортных ресурсов и снизить негативное воздействие транспорта на окружающую среду. Внедрение подобных технологий будет способствовать созданию более комфортных и безопасных условий для всех участников дорожного движения, включая пешеходов, велосипедистов и водителей транспортных средств.

Обзор системы

В современном мире, где эффективное управление дорожным движением является ключевым аспектом обеспечения безопасности и комфорта граждан, разработка инновационных технологий для подсчета транспортных средств приобретает особую значимость. Одной из таких технологий является система, предназначенная для точного и надежного подсчета количества транспортных средств определенной категории по снимку с камеры наблюдения, установленной над дорожным полотном.

Процесс разработки данной системы включает в себя использование передовых алгоритмов обработки изображений и современных технологий компьютерного зрения. Это позволяет достичь высокой точности и надежности подсчета, что является критически важным для эффективного управления дорожным движением. Особое внимание уделяется оптимизации системы для работы в режиме реального времени, что обеспечивает оперативное получение данных о количестве транспортных средств на дороге и их использование для различных аналитических целей.

Система поддерживает подсчет следующих категорий транспорта: автобус, грузовик, легковой автомобиль и мотоцикл. Это позволяет охватить широкий спектр транспортных средств и использовать полученные данные для разработки более эффективных стратегий управления дорожным движением.

Интеграция разрабатываемой системы с существующими системами управления дорожным движением и мониторинга транспортной инфраструктуры способствует созданию более эффективной и интегрированной системы управления. Результатом обработки снимка является таблица, содержащая распределение количества транспорта по вышеуказанным категориям. Это позволяет получить детальную информацию о транспортной нагрузке на различных участках дороги и использовать ее для принятия обоснованных решений.

Схема работы системы представлена на рис. 1. Она включает в себя несколько этапов: захват изображения камерой наблюдения, обработка изображения с использованием передовых алгоритмов, подсчет количества транспортных средств определенной категории и вывод результатов в удобной для анализа форме. Такая схема работы позволяет системе эффективно функционировать и обеспечивать высокую точность подсчета.



Рис. 1. Схема работы системы

Вычитание фона является важным этапом в процессе обнаружения автомобилей на изображении. Прежде чем приступить к непосредственному поиску транспортных средств, необходимо определить, какие объекты находятся на переднем плане, а какие – на заднем. Хотя теоретически систему можно было бы построить и без этой операции, вычитание фона значительно повышает надежность и эффективность поиска, ограничивая область, в которой нужно искать автомобили.

В разработанной системе вычитание фона реализовано с использованием модели гауссовых функций [1] и медианного фильтра. Эти алгоритмы позволяют выделить объекты на переднем плане, минимизируя влияние фона. Результаты их работы в виде масок переднего плана объединяются с помощью операции AND. Затем на полученной маске удаляются мелкие пятна, а сама маска подвергается дополнительной обработке с использованием последовательной дилатации и эрозии [2].

Сегментация переднего плана – это важный этап в обработке изображений, который позволяет выделить отдельные объекты на фоне и существенно улучшить качество картинки. В условиях, когда машины движутся близко друг к другу, они могут сливаться в одну область на маске переднего плана. Чтобы их разделить, необходимо провести сегментацию по цвету.

Сегментация – это не просто механическое разделение изображения на части. Это сложный процесс, требующий глубокого анализа и внимания к мельчайшим деталям. Каждый сегмент должен быть однородным по цвету и текстуре, что делает задачу сегментации весьма сложной. Существует

множество методов, используемых для сегментации изображений, таких как кластеризация, применение гистограммы и выделение краев.

Кластеризация – один из самых распространенных методов сегментации. Он основан на группировке пикселей в кластеры на основе их схожести. Гистограмма также широко применяется для сегментации, так как позволяет анализировать распределение цветов на изображении и выявлять закономерности. Выделение краев – это еще один важный метод, который помогает определить границы объектов на картинке и сделать их более четкими. Методами сегментации изображений являются: методы, основанные на кластеризации [3–7], методы с использованием гистограммы [8], методы выделения краев [9], и другие.

Таким образом, сегментация переднего плана представляет собой сложный и многогранный процесс, требующий использования различных методов и подходов. Несмотря на свою сложность, она является неотъемлемой частью обработки изображений и играет ключевую роль в повышении их качества.

Получение контуров

В результате сегментации переднего плана происходит значительное упрощение анализа изображения. Этот процесс заключается в разделении изображения на отдельные области, где цвет и текстура каждого сегмента имеют схожие характеристики. Для более точного определения границ между этими областями применяется метод разрезания графа, который позволяет учесть все нюансы и детали изображения.

После того как сегменты разделены на области, начинается процесс их объединения. Это делается для того, чтобы создать более крупные области, которые можно рассматривать как отдельные объекты. Для этого используется алгоритм, который анализирует цветовые характеристики каждого сегмента и объединяет их с другими сегментами, имеющими схожие параметры.

Затем для каждой объединенной области извлекается контур, который и будет являться ее границей. Этот процесс включает несколько этапов, начиная с сегментации и заканчивая извлечением контуров. Каждый этап важен для достижения точного результата и правильного определения границ объектов на изображении.

На первом этапе происходит предварительная обработка изображения, которая включает фильтрацию шума и улучшение контрастности. Затем происходит сегментация, где изображение делится на области с одинаковыми характеристиками. После этого применяется метод разрезания графа, который позволяет более точно определить границы между сегментами.

На следующем этапе происходит объединение сегментов в более крупные области, что позволяет создать более точные контуры объектов. Для этого используется алгоритм, который анализирует цветовые характеристики сегментов и объединяет их с другими сегментами, имеющими схожие параметры.

После этого извлекаются контуры для каждой объединенной области. Этот процесс включает использование различных методов, таких как анализ границ, выделение контуров и их аппроксимация. В результате получается набор контуров, которые представляют собой границы объектов на изображении [10–12].

Таким образом, процесс получения контуров объектов включает несколько этапов, каждый из которых важен для достижения точного и надежного результата. Сегментация переднего плана позволяет упростить анализ изображения, а метод разрезания графа и объединение сегментов позволяют более точно определить границы объектов. Извлечение контуров является заключительным этапом процесса и позволяет получить точные границы объектов, которые могут быть использованы для различных задач, таких как распознавание объектов, классификация изображений и другие [13].

Схема процесса получения контуров объектов представлена на рис. 2.

В рамках подсистемы осуществляется комплексный анализ и обработка контуров, полученных на предыдущем этапе. Этот процесс включает в себя детальное изучение ключевых характеристик и параметров каждого контура, что позволяет определить его принадлежность к определенной категории транспортных средств. Для достижения этой цели применяются различные методы и алгоритмы машинного обучения, которые обеспечивают эффективную классификацию контуров.

Подсистема также учитывает возможность того, что некоторые контуры могут быть нераспознаны или классифицированы неправильно. В таких случаях система выдает соответствующий результат, что позволяет оператору принять необходимые меры. Важно отметить, что процесс обучения и классификации контуров требует тщательной настройки параметров и алгоритмов для обеспечения высокой точности и надежности результатов. Это включает в себя сбор и анализ значительного объема данных, а также проведение множества экспериментов и тестирование различных подходов.



Рис. 2. Схема получения контуров объектов

Обучение и классификация контуров

Для повышения точности и надежности результатов подсистема использует современные методы машинного обучения, такие как нейронные сети и алгоритмы глубокого обучения. Эти методы позволяют более точно распознавать и классифицировать контуры, что особенно важно в условиях высокой скорости и сложных погодных условий.

Кроме того, подсистема учитывает возможность появления новых категорий транспортных средств, что требует постоянного обновления и адаптации алгоритмов. Это позволяет системе оставаться актуальной и эффективной в условиях постоянно меняющейся дорожной обстановки. Таким образом, подсистема представляет собой сложный и многофункциональный инструмент, который обеспечивает высокую точность и надежность при анализе и обработке контуров транспортных средств. Ее использование позволяет значительно повысить безопасность и эффективность дорожного движения, а также оптимизировать работу служб безопасности и контроля.

Схема работы подсистемы представлена на рис. 3.

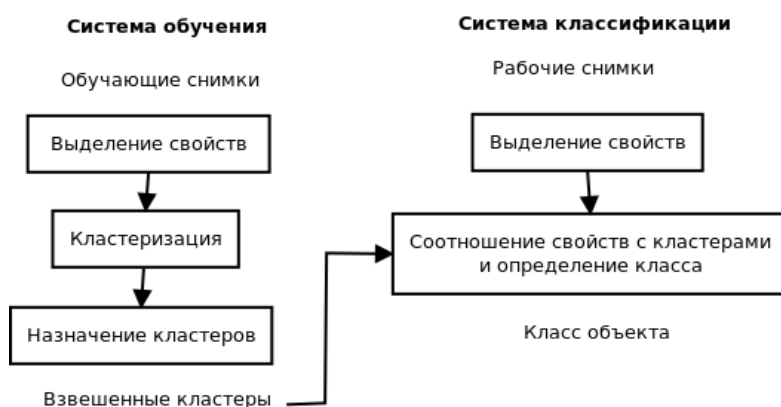


Рис. 3. Подсистема обучения и классификации

Выделение свойств

В процессе выделения свойств важно отметить значимость характеристического вектора в определении формы контура. Этот вектор, разработанный в системе Sakbot [10], является фундаментальным элементом для анализа и обработки изображений. Его использование в системе Sakbot [10] обеспечивает высокую точность и надежность в распознавании контуров, что делает его незаменимым инструментом в области компьютерного зрения.

Кроме того, характеристический вектор обладает уникальными свойствами, позволяющими ему быть инвариантным к масштабированию и повороту объектов. Это позволяет эффективно применять алгоритм в различных условиях и с различными параметрами, что значительно расширяет его возможности и применимость.

Однако стоит отметить, что процесс получения характеристического вектора является сложным и требует тщательной настройки параметров. Несмотря на это, благодаря своей универсальности

и надежности, этот алгоритм стал неотъемлемой частью многих систем компьютерного зрения, значительно улучшая качество и точность анализа изображений.

Кластеризация

В процессе кластеризации характеристических векторов контуров учебной выборки каждый контур приобретает специфические черты, характерные для его кластера. Это позволяет более детально исследовать структуру данных и выявлять скрытые закономерности, которые могут быть неочевидны при поверхностном анализе.

Алгоритм кластеризации K-means, выбранный в данном исследовании, является одним из наиболее распространенных и эффективных методов. Он позволяет разделить данные на заранее определенное количество кластеров, минимизируя внутрикластерные расстояния и максимизируя межкластерные расстояния. Это способствует достижению оптимальной группировки объектов, что, в свою очередь, способствует более глубокому пониманию данных.

В результате процедуры каждый кластер становится более однородным и четко выраженным, что упрощает интерпретацию результатов. Кластеризация также выявляет скрытые взаимосвязи и зависимости между объектами, которые могут быть неочевидны при простом анализе данных. Это открывает новые перспективы для дальнейших исследований и разработки инновационных подходов к решению задач. В данном исследовании используется формула для вычисления центроида кластера c_k в алгоритме K-means:

$$c_k = \frac{1}{|C_k|} \sum_{i \in C_k} x_i,$$

где C_k – множество точек, принадлежащих k -му кластеру, x_i – i -я точка данных, а $|C_k|$ – количество точек в C_k .

Таким образом, объединение характеристических векторов контуров в кластеры с использованием алгоритма K-means способствует более глубокому и всестороннему анализу данных, что может привести к новым открытиям и инновациям в различных областях науки и техники.

Назначение кластеров классам транспорта

В ходе выполнения процедуры кластеризации группы схожих контуров были успешно сформированы. Однако на текущем этапе не удалось однозначно определить, к какой категории транспорта относится каждая из этих групп. Для достижения этой цели необходимо провести назначение кластеров, чтобы идентифицировать наиболее вероятную категорию транспорта для каждого кластера. Схема данного процесса подробно представлена на рис. 4.

Для начала из обучающей выборки для каждого из классов были отобраны несколько примеров. Затем каждый из этих примеров был тщательно сравнен с каждым кластером. Каждому кластеру и каждой категории транспорта было присвоено значение $W_{A,X} = \frac{m}{n}$, которое отражает степень сходства контуров кластера X с примерами из выборки класса A . После этого для каждого кластера был определен класс, для которого значение $W_{A,X}$ оказалось максимальным. Этот класс был признан наиболее схожим с контурами в кластере A и получил обозначение $class_X$ [14].

Этот подход позволяет систематизировать и классифицировать группы контуров, что является важным шагом в процессе идентификации категорий транспорта.

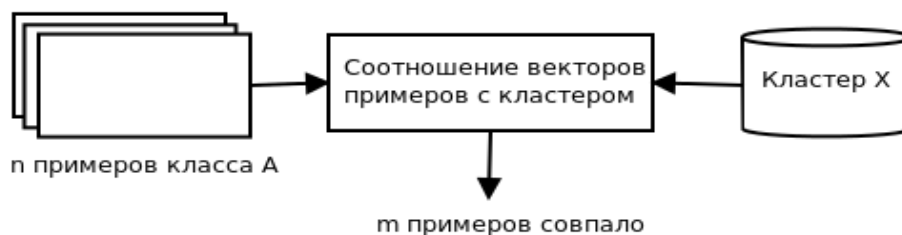


Рис. 4. Схема процесса назначения кластеров

Соотношение свойств с кластерами и определение класса

В рамках исследования данных, полученных из контура неопознанного объекта, необходимо

учитывать различные параметры и факторы, которые могут влиять на точность классификации. Одним из ключевых этапов данного процесса является сопоставление характеристического вектора с каждым кластером. Если вектор соответствует кластеру X , то это указывает на наиболее вероятный класс объекта – $class_x$. В случае, если вектор не принадлежит ни одному из кластеров, объект остается неопределенным. В таких ситуациях система должна применять дополнительные методы для определения наиболее вероятного класса [15].

При анализе данных, особенно когда объект относится к кластеру, включающему множество других классов, важно учитывать степень сходства с другими объектами в данном кластере. Это позволяет системе более точно определить наиболее вероятный класс. Однако следует учитывать, что классификация может быть подвержена ошибкам вследствие шума или недостатка данных. Для повышения надежности классификации рекомендуется применять дополнительные методы и алгоритмы.

Таким образом, тщательный анализ и сопоставление данных являются ключевыми этапами в процессе классификации [16–21]. Они способствуют обеспечению точности и надежности результатов. Важно учитывать все возможные факторы, влияющие на классификацию, и применять соответствующие методы для минимизации погрешностей.

Процесс классификации данных требует внимательного и тщательного подхода. Только так можно достичь высокой точности и надежности результатов. Следует помнить, что классификация представляет собой сложный процесс, включающий учет множества факторов и применение различных методов и алгоритмов.

Исследование функционирования программного обеспечения

Исследование функционирования программного обеспечения для анализа дорожных снимков осуществлялось на основе изображений дорожного движения города Владивостока, полученных каждые 30 секунд в дневное время при ясной атмосфере. Процесс включал несколько этапов, каждый из которых был тщательно спланирован и реализован.

На первом этапе массив изображений был разделен на обучающую и тестовую выборки. Из обучающей выборки были выделены характерные контуры различных классов транспортных средств, что способствовало улучшению способности системы к их распознаванию и классификации в дальнейшем.

На последующем этапе система прошла обучение, в рамках которого проводился анализ и классификация транспортных средств с использованием выделенных контуров. Этот процесс был необходим для того, чтобы система научилась идентифицировать и корректно классифицировать различные виды транспорта.

По завершении обучения система была применена к тестовой выборке изображений, где выполнялся их анализ с последующим распределением транспортных средств по категориям. Полученные результаты были сопоставлены с эталонными распределениями, сохраненными в специальном файле. Это позволило оценить точность и эффективность функционирования системы.

Для оценки эффективности подсчета и классификации транспортных средств использовались два критерия: погрешность подсчета и погрешность классификации. Эти показатели позволили определить степень точности системы в выполнении задачи и выявить области, требующие дальнейшего совершенствования. Исследование функционирования программного обеспечения для анализа дорожных снимков представляет собой значимый шаг в развитии технологий, направленных на повышение безопасности и эффективности дорожного движения. Результаты данного исследования могут быть использованы для разработки новых методик и алгоритмов, которые улучшат качество анализа и классификации транспортных средств. Погрешность подсчета автомобильного транспорта определялась как отношение разности между общим количеством подсчитанного транспорта и количеством транспорта на изображении к последнему:

$$M_{\text{подс}} = \frac{|K_{\text{подс}} - K_{\text{общ}}|}{K_{\text{общ}}},$$

где $M_{\text{подс}}$ – метрика погрешности подсчета по снимку; $K_{\text{подс}}$ – общее количество подсчитанного транспорта; $K_{\text{общ}}$ – количество транспорта, изображенного на снимках.

Погрешность классификации автомобильного транспорта вычислялась как отношение разности между векторами количеств подсчитанного и реального транспорта по категориям к вектору реальных количеств:

$$M_{\text{класс}} = \frac{|\bar{a} - \bar{b}|}{|\bar{b}|},$$

где $M_{\text{класс}}$ – метрика погрешности классификации по снимку; \bar{a} – вектор количеств подсчитанного транспорта по категориям; \bar{b} – вектор количеств транспорта на снимке по категориям.

В процессе тестирования были проведены эксперименты с различными параметрами системы, включая разрешение изображений, уровень освещенности и временные интервалы. Результаты экспериментов показали высокую точность подсчета и классификации, особенно при хорошем освещении и высоком разрешении изображений.

Дополнительно были проведены тесты на реальных данных, собранных в различных погодных условиях и в разное время суток. Эти тесты подтвердили способность системы адаптироваться к разнообразным условиям и выдавать точные результаты.

В дальнейшем планируется усовершенствование системы за счет внедрения новых алгоритмов и методов обработки изображений, а также увеличения объема обучающих данных для повышения точности классификации.

Система успешно справилась с задачей подсчета и классификации транспортных средств на различных последовательностях изображений дорожного движения. Это свидетельствует о ее способности адаптироваться к разнообразным условиям и сценариям, что является критически важным для систем видеонаблюдения и управления дорожным движением.

Результаты тестирования

На рис. 5 представлены графики зависимости погрешностей подсчета и классификации от количества примеров, использованных в процессе обучения модели. Наблюдается снижение погрешностей с увеличением объема данных, что указывает на способность модели к обучению и повышению производительности.

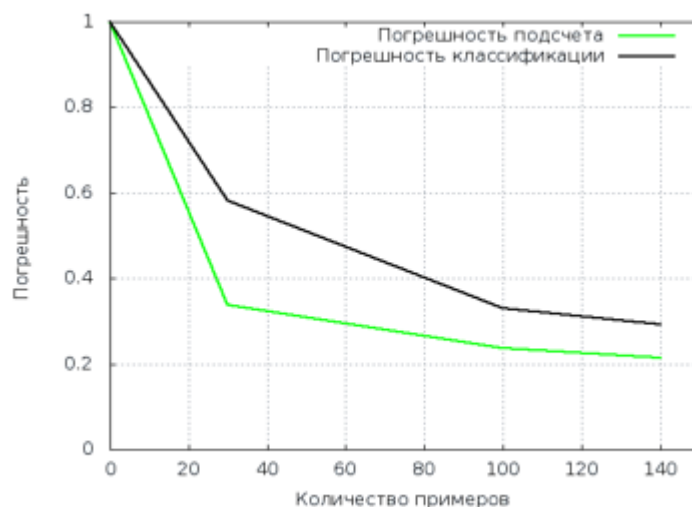


Рис. 5. Графики зависимостей погрешностей подсчета и классификации от числа примеров

Для обучающей выборки погрешность составила 21 %, что является сравнительно низким значением, учитывая сложность задачи. Это свидетельствует о хорошем усвоении моделью закономерностей и её способности эффективно обобщать полученные знания на новые данные.

Для тестовой выборки погрешность при 140 примерах составила 32,4 %. Это указывает на способность модели достигать высокой точности на новых данных, однако дальнейшее обучение необходимо для улучшения результатов.

Результаты тестирования подтверждают высокую эффективность системы в подсчете и классификации транспортных средств. Зависимость погрешностей от объема данных показывает, что модель может значительно улучшить свою производительность с увеличением количества примеров. Это открывает перспективы для дальнейшего обучения и разработки более точных моделей, которые смогут эффективно работать в реальных условиях дорожного движения. Важно отметить, что результаты

могут варьироваться в зависимости от качества и разнообразия данных, используемых для обучения. Поэтому важно продолжать работу над улучшением качества данных и разработкой более сложных моделей, способных учитывать различные сценарии и условия дорожного движения.

Заключение

В данной работе представлены общие принципы работы системы мониторинга транспорта, использующей технологии машинного зрения. Данная система является не только эффективным и экономичным способом мониторинга транспорта, она также дает возможности для исследований в области машинного зрения.

Механизмы классификации контуров с использованием кластерного анализа, предложенные в этой работе, являются в своем роде уникальными и открывают еще одну нишу для исследований в области машинного зрения.

Тем не менее, несмотря на достигнутые результаты, модель все еще нуждается в доработке для повышения точности и надежности. В частности, необходимо уделить внимание оптимизации параметров модели и улучшению алгоритмов обработки изображений. Кроме того, важным аспектом является сбор и анализ дополнительных данных, которые могут улучшить обобщающую способность модели.

Одним из возможных направлений для дальнейших исследований является использование более сложных архитектур нейронных сетей, таких как сверточные нейронные сети (CNN) или рекуррентные нейронные сети (RNN). Эти архитектуры могут обеспечить более глубокое понимание пространственных и временных зависимостей в данных, что может привести к улучшению результатов.

Кроме того, стоит рассмотреть возможность интеграции модели с другими системами, такими как системы управления дорожным движением или системы мониторинга окружающей среды. Это позволит создать более комплексную и эффективную систему, способную решать широкий спектр задач в области анализа дорожного движения.

Список литературы

- 1 **Bouwman, T.** Background Modeling using Mixture of Gaussians for Foreground Detection / T. Bouwman, F. El Baf, B. Vachon. – A Survey. – Recent Patents on Computer Science. – November 2008. – DOI 10.2174/1874479610801030219.
- 2 **Smids, M.** Background Subtraction for Urban Traffic Monitoring using Webcams / M. Smids. – P. 1–43. – Universiteit van Amsterdam, FNWI, 2006.
- 3 Синергия подходов к совершенствованию интеллектуальных транспортных систем городов в России и Белоруссии / И. Н. Пугачев, Д. В. Капский, Д. В. Навой [и др.]. – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2020. – 230 с. – ISBN 978-5-7389-3154-3.
- 4 **Пугачев, И. Н.** Совершенствование методов оценки качества и безопасности дорожного движения / И. Н. Пугачев, Н. Г. Шешера, А. В. Каменчуков. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2018. – 160 с.
- 5 **Бурков, С. М.** Задачи системного анализа и методология формирования интеллектуальной системы управления транспортным комплексом города / С. М. Бурков, Г. Я. Маркелов, И. Н. Пугачёв // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2013. – № 4. – С. 83–90. – ISSN 1996-3440.

References

- 1 **Bouwman, T.** Background Modeling using Mixture of Gaussians for Foreground Detection / T. Bouwman, F. El Baf, B. Vachon. – A Survey. – Recent Patents on Computer Science. – November 2008. – DOI 10.2174/1874479610801030219.
- 2 **Smids, M.** Background Subtraction for Urban Traffic Monitoring using Webcams / M. Smids. – P. 1–43. – Universiteit van Amsterdam, FNWI, 2006.
- 3 Synergy of approaches to improving intelligent transport systems of cities in Russia and Belarus / I. N. Pugachev, D. V. Kapsky, D. V. Navoy [et al.]. – Khabarovsk : Pacific State University, 2020. – 230 p. – ISBN 978-5-7389-3154-3.
- 4 **Pugachev, I. N.** Improving methods for assessing the quality and safety of road traffic / I. N. Pugachev, N. G. Sheshera, A. V. Kamenchukov. – Khabarovsk : Publishing house of the Pacific State University, 2018. – 160 p.
- 5 **Burkov, S. M.** Tasks of system analysis and methodology for the formation of an intelligent control system for the city transport complex / S. M. Burkov, G. Ya. Markelov, I. N. Pugachev // Bulletin of the Pacific State University. – 2013. – No. 4. – P. 83–90. – ISSN 1996-3440.

6 **Pham, D. L.** Current methods in medical image segmentation / D. L. Pham, C. Xu, J. L. Prince // *Annu Rev Biomed Eng.* 2000;2 : 315-37. – DOI 10.1146/annurev.bioeng.2.1.315.

7 **Koenderink, J. J.** The structure of images / J. J. Koenderink // *Biol Cybern.* 1984 ; 50(5) : 363-70. – DOI 10.1007/BF00336961.

8 **Тормозов, В. С.** Подсчет и распознавание автомобилей на спутниковых снимках / В. С. Тормозов // *Ученые заметки ТОГУ.* – 2017. – Т. 8. – № 3. – С. 126–134. – ISSN 2079-8490.

9 **Barrow, H. G.** Interpreting line drawings as three-dimensional surfaces / H. G. Barrow, J. M. Tenenbaum // *Artificial Intelligence*, 17(1–3), 75–116. – DOI 10.1016/0004-3702(81)90021-7.

10 **Тормозов, В. С.** Метод детектирования и классификации транспортных средств на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения / В. С. Тормозов // *Промышленные АСУ и контроллеры.* – 2019. – № 6. – С. 18–24. – DOI 10.25791/asu.06.2019.678.

11 **Пугачев, И. Н.** Методика подсчета транспортных средств с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения / И. Н. Пугачев, Г. Я. Маркелов, В. С. Тормозов // *Вестник Тихоокеанского государственного университета.* – 2017. – № 2 (45). – С. 13–20. – EDN ZEGASL. – ISSN 1996-3440.

12 **Пугачев, И. Н.** Ускорение алгоритма детектирования транспортных средств на спутниковых снимках с помощью процедуры фильтрации гипотез / И. Н. Пугачев, Г. Я. Маркелов, В. С. Тормозов // *Вестник Российского нового университета. Серия : Сложные системы : модели, анализ и управление.* – 2019. – № 1. – С. 130–139. – DOI 10.25586/RNU.V9187.19.01.P.130.

13 **Vezhnevets, A.** Avoiding boosting overfitting by removing confusing samples / A. Vezhnevets, O. Barinova // *Lecture Notes in Computer Science.* – 2007. – Vol. 4701 LNAI. – P. 430–441. – DOI 10.1007/978-3-540-74958-5_40.

14 **Suzuki, S.** Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following / S. Suzuki, K. Abe // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing.* Volume 30, Issue 1, April 1985. – P. 32–46. – URL: [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90016-7).

15 **Золкин, А. Л.** Интеллектуальная программно-информационная система для диагностирования и прогнозирования технического состояния тяговых электродвигателей / А. Л. Золкин, В. С. Тормозов, Д. В. Гридина // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 92–97. – DOI 10.37313/1990-5378-2020-22-4-92-97.

6 **Pham, D. L.** Current methods in medical image segmentation / D. L. Pham, C. Xu, J. L. Prince // *Annu Rev Biomed Eng.* 2000;2:315-37. – DOI 10.1146/annurev.bioeng.2.1.315.

7 **Koenderink, J. J.** The structure of images / J. J. Koenderink // *Biol Cybern.* 1984 ; 50(5) : 363-70. – DOI 10.1007/BF00336961.

8 **Tormozov, V. S.** Counting and recognition of cars on satellite images / V. S. Tormozov // *Scientific notes of PSU.* – 2017. – Vol. 8. – No. 3. – P. 126–134. – ISSN 2079-8490.

9 **Barrow, H. G.** Interpreting line drawings as three-dimensional surfaces / H. G. Barrow, J. M. Tenenbaum // *Artificial Intelligence*, 17(1–3), 75–116. – DOI 10.1016/0004-3702(81)90021-7.

10 **Tormozov, V. S.** Method of detection and classification of vehicles on ultra-high-resolution satellite images / V. S. Tormozov // *Industrial ACS and controllers.* – 2019. – No. 6. – P. 18–24. – DOI 10.25791/asu.06.2019.678.

11 **Pugachev, I. N.** Methodology for counting vehicles using high spatial resolution satellite images / I. N. Pugachev, G. Ya. Markelov, V. S. Tormozov // *Bulletin of the Pacific State University.* – 2017. – No. 2 (45). – P. 13–20. – EDN ZEGASL. – ISSN 1996-3440.

12 **Pugachev, I. N.** Acceleration of the algorithm for detecting vehicles on satellite images using the hypothesis filtering procedure / I. N. Pugachev, G. Ya. Markelov, V. S. Tormozov // *Bulletin of the Russian New University. Series : Complex Systems : Models, Analysis and Control.* – 2019. – No. 1. – P. 130–139. – DOI 10.25586/RNU.V9187.19.01.P.130.

13 **Vezhnevets, A.** Avoiding boosting overfitting by removing confusing samples / A. Vezhnevets, O. Barinova // *Lecture Notes in Computer Science.* – 2007. – Vol. 4701 LNAI. – P. 430–441. – DOI 10.1007/978-3-540-74958-5_40.

14 **Suzuki, S.** Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following / S. Suzuki, K. Abe // *Computer Vision, Graphics, and Image Processing.* Volume 30, Issue 1, April 1985. – P. 32–46. – URL: [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90016-7).

15 **Zolkin, A. L.** Intelligent software and information system for diagnostics and forecasting the technical condition of traction electric motors / A. L. Zolkin, V. S. Tormozov, D. V. Gridina // *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* – 2020. – Vol. 22. – No. 4. – P. 92–97. – DOI 10.37313/1990-5378-2020-22-4-92-97.

16 Shadow detection algorithms for traffic flow analysis : a comparative study / A. Prati, I. Mikic, C. Grana, M. M. Trivedi. – ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585), Oakland, CA, USA, 2001. – P. 340–345. – DOI 10.1109/ITSC.2001.948680.

17 **Тормозов, В. С.** Улучшение работы алгоритма детектирования и классификации транспортных средств на спутниковых снимках путем сокращения области поиска с использованием геоинформации о дорогах / В. С. Тормозов // Вестник Российского нового университета. Серия : Сложные системы : модели, анализ и управление. – 2019. – № 2. – С. 56–63. – DOI 10.25586/RNU.V9187.19.02.P.056.

18 **Лукьяница, А. А.** Цифровая обработка видеозображений / А. А. Лукьяница, А. Г. Шишкин. – Москва : Ай-Эс-Эс-Пресс, 2009. – 518 с. – ISBN 978-5-9901899-1-1.

19 **Ng, J. Y.** Image-based Vehicle Classification System / J. Y. Ng, Y. H. Tay // The 11th Asia-Pacific ITS Forum and Exhibition (ITS-AP 2011), Kaoshiung, Taiwan. June 8–11, 2011. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1204.2114>.

20 Numerical evaluation of the traffic flow indicators using super-resolution satellite imagery / N. Pugachev, G. Ya. Markelov, V. S. Tormozov, A. O. Nosenko // In the collection : 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934802.

21 **Пугачев, И. Н.** Обучение и использование сверточной нейронной сети для детектирования и классификации транспортных средств на спутниковых снимках высокого разрешения / И. Н. Пугачев, Г. Я. Маркелов, В. С. Тормозов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2019. – № 10. – С. 20–25. – DOI 10.25791/asu.10.2019.933.

16 Shadow detection algorithms for traffic flow analysis : a comparative study / A. Prati, I. Mikic, C. Grana, M. M. Trivedi. – ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585), Oakland, CA, USA, 2001. – P. 340–345. – DOI 10.1109/ITSC.2001.948680.

17 **Tormozov, V. S.** Improving the performance of the algorithm for detecting and classifying vehicles in satellite images by reducing the search area using geoinformation about roads / V. S. Tormozov // Bulletin of the Russian New University. Series : Complex systems : Models, Analysis and Control. – 2019. – No. 2. – P. 56–63. – DOI 10.25586/RNU.V9187.19.02.P.056.

18 **Lukyanitsa, A. A.** Digital processing of video images / A. A. Lukyanitsa, A. G. Shishkin. – Moscow : ISS-Press, 2009. – 518 p. – ISBN 978-5-9901899-1-1.

19 **Ng, J. Y.** Image-based Vehicle Classification System / J. Y. Ng, Y. H. Tay // The 11th Asia-Pacific ITS Forum and Exhibition (ITS-AP 2011), Kaoshiung, Taiwan. June 8–11, 2011. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1204.2114>.

20 Numerical evaluation of the traffic flow indicators using super-resolution satellite imagery / N. Pugachev, G. Ya. Markelov, V. S. Tormozov, A. O. Nosenko // In the collection : 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934802.

21 **Pugachev, I. N.** Training and using a convolutional neural network for detecting and classifying vehicles in high-resolution satellite images / I. N. Pugachev, G. Ya. Markelov, V. S. Tormozov // Industrial ACS and Controllers. – 2019. – No. 10. – P. 20–25. – DOI 10.25791/asu.10.2019.933.

I. N. Pugachev, V. S. Tormozov

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A ROAD TRAFFIC MONITORING SYSTEM BASED ON MACHINE VISION TECHNOLOGIES AND CLUSTER ANALYSIS METHODS

Abstract. This article presents a traffic monitoring system based on the principles of machine vision. The system is based on simple webcams mounted above the roadbed that capture images of vehicles. Further, using image processing algorithms and machine learning methods, the system determines the number and classification of vehicles on the road. The system includes several key modules: a background subtraction module, a foreground segmentation module, a contour acquisition module, a contour training and classification module, a property allocation module and a clustering module. Each of these modules performs specific functions aimed at ensuring accurate and reliable vehicle detection. The system has been tested on traffic images. The test results confirm the system's ability to adapt to various conditions and scenarios, which is critically important for video surveillance and traffic management systems. The article also discusses the prospects for further development

of the system, including the possibility of using more complex neural network architectures and integration with other systems.

Keywords: traffic monitoring, machine vision, image processing, machine learning, vehicle classification.

For citation: Pugachev, I. N. Development and analysis of a road traffic monitoring system based on machine vision technologies and cluster analysis methods / I. N. Pugachev, V. S. Tormozov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 134–145. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_134.

Сведения об авторах

Пугачев Игорь Николаевич

Хабаровский Федеральный
исследовательский центр Дальневосточного
отделения Российской академии наук
(ХФИЦ ДВО РАН),
заместитель директора по научной работе,

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Изыскания и проектирования
железных и автомобильных дорог»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ipugachev64@mail.ru

Тормозов Владимир Сергеевич

Тихоокеанский государственный
университет,
кандидат технических наук, доцент высшей
школы кибернетики и цифровых
технологий,
e-mail: 007465@pnu.edu.ru

Information about the authors

Pugachev Igor Nikolaevich

Khabarovsk Federal Research Center
Far Eastern Branch of the Russian Academy
of Sciences (KhRC FEB RAS),
Deputy Director for Research,

Far Eastern State Transport University
(FESTU),
Chair «Surveying and Design of Railways
and Highways»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ipugachev64@mail.ru

Tormozov Vladimir Sergeevich

Pacific National University,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor of the Higher School
of Cybernetics and Digital Technologies,
e-mail: 007465@pnu.edu.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 338.001.36

DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_146

*В. Д. Верескун, В. С. Воробьев, Н. Ю. Купреева, И. Б. Репина***ФОРМИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ
СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РФ**

Аннотация. Обоснованы организационно-технологические решения по развитию транспортной сети Северо-Восточного региона индустриального освоения РФ. Дана характеристика Верхне-Ленского ТПК: нефтедобывающего комплекса, производства минеральных удобрений, лесопромышленного комплекса и др. Приведены результаты проектных изысканий по формированию основных направлений железнодорожной линии Усть-Кут – Киренск – Непа – Верхнечонский центральный пункт сбора (ЦПС) нефти. Проанализированы Бамовско-Ульканский, Бамовско-Киренчский и Бамовско-Макаровский варианты, Тунгусское и Калининское направление, а также Ярактинский вариант. Сделан вывод, что Северо-Сибирская магистраль как основа Северного транспортного коридора станет второй после Транссибирской магистрали артерией в пределах Ближнего Севера, соединяющей Азиатскую и Европейскую части страны.

Ключевые слова: стратегия, транспортная сеть, железнодорожная линия, модернизация, территориально-производственный комплекс, ресурсы, изыскания, логистика.

Для цитирования: Формирование развития транспортной сети Северо-Восточного региона РФ / В. Д. Верескун, В. С. Воробьев, Н. Ю. Купреева, И. Б. Репина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 146–152. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_146.

Введение

В настоящее время актуализирована проблема методологического обоснования строительства Северо-Сибирской железнодорожной магистрали, в том числе с учётом необходимости дополнения западного участка маршрута до порта Сабетта, обусловленного разработкой нефтяных и газовых месторождений Севера, активизацией освоения Северного морского пути, дополнения восточного участка от Усть-Илимска до п. Хребтовая – Усть-Кут, позволяющего создать инфраструктурные условия для развития экономики Сибири и формирования северного пояса экономического развития страны, который будет способствовать разгрузке Транссибирской железнодорожной магистрали при исчерпании ее пропускной способности, а также обеспечению транспортной безопасности России [1–5].

Модернизация БАМа, актуализация востребованности Северо-Сибирской магистрали, обоснование ее новых маршрутов обязывает продлить исследования по планировавшейся сети железных дорог на севере Иркутской области, необходимости ее анализа и роли в освоении территории и развитии территориально-производственных комплексов (ТПК) [6, 7]. Наиболее значимым звеном формирования железнодорожной сети Севера Иркутской области является Верхне-Ленский территориально-производственный комплекс (ТПК), представленный западным участком Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, железными дорогами Тайшет – Лена и Хребтовая – Усть-Илимская.

Железная дорога Тайшет – Лена, соединяющая Транссибирскую магистраль с портом Осетрово (г. Усть-Кут), введена в постоянную эксплуатацию в пятидесятых годах. Дорога электрифицирована, почти на всем протяжении уложены вторые пути, заканчивается реконструкция и расширение станционных обустройств.

Железная дорога Хребтовая – Усть-Илимск, построенная как железнодорожный выход к строящейся в то время Усть-Илимской ГЭС, представлена однопутной линией на тепловозной тяге, имеет железнодорожный выход к Усть-Илимскому лесопромышленному комплексу (ст. Промышленная). Дорога в настоящее время работает практически на пределе своих возможностей.

В связи с этим необходим анализ и научное обоснование развития действующей транспортной сети и создание новой, образующих в совокупности опорную транспортную сеть региона, обеспечивающую эффективное освоение природных ресурсов и транспортно-логистические отечественные и международные связи.

Основная часть

1 Минерально-сырьевой потенциал региона

Нефтедобывающий комплекс. Потенциальные ресурсы углеводородного сырья Непско-Ботубинской нефтегазоносной области, расположенной на территории Верхне-Ленского ТПК и соседней территории Республики Саха (Якутия), оцениваются в 13,2 млрд т, в том числе в границах Иркутской области в 8,7 млрд т, в Якутии в 4,5 млрд т условных углеводородов.

Одной из особенностей месторождений рассматриваемой нефтегазовой области является то, что они комплексные, т. е. содержат как нефть, конденсат, так и природный газ. Объем запасов природного газа Непско-Ботубинского свода по категориям С1 (возможностью освоения существующими технологиями и оборудованием) и С2 (перспективными техническими и организационными решениями, соответствующими новейшим достижениям науки и техники) составляет 359 и 248 млрд м³, в том числе в Иркутской области – 86 и 38 млрд м³ и в Республике Саха (Якутия) – 273 и 210 млрд м³.

Развитие нефтедобывающего комплекса требует больших объемов материально-технических ресурсов. Грузы внешнего завоза представлены: технологическими грузами для бурения, добычи нефти и промышленного строительства. Кроме того, требуется большой объем перевозок местных строительных материалов (щебень, песок, гравий, лесоматериалы). Инертные материалы будут доставляться автотранспортом с прилегающих месторождений – Усть-Непского и Догконского месторождений ПГС, Усть-Гаженского месторождения строительного камня. Пиломатериалы, брусчатые дома, столярные изделия выпускаются Верхнечонским деревообрабатывающим предприятием (п. Калинино), которое работает на местном древесном сырье.

Транспортировка нефти в Иркутской области предусматривается железнодорожным транспортом от Верхнечонского, Даниловского, Дулиньминского ЦПС (центрального пункта сбора нефти) до Усть-Кута.

Производство минеральных удобрений. Непский калийный бассейн расположен в районе Непы в 140–300 км к северу от трассы западного участка БАМа. Его площадь составляет около 40 тыс. км², в том числе наиболее перспективная на выявление обогащенных сильвинитовых руд часть – около 10 тыс. км². Прогнозные ресурсы бассейна оцениваются в 70 млрд т сильвинитовых руд. Непское месторождение сильвинитов является крупнейшим в РФ и по качеству калийных солей превосходит месторождения Урала и Белоруссии.

На базе Непского месторождения сильвинитов планировалось строительство калийного завода с вводом I очереди на 500 тыс. т и II очереди на 500 тыс. т. Полная мощность завода должна была составить 1700 тыс. т, или 2800 тыс. т калийных удобрений в год.

Размещение месторождений полезных ископаемых и связанное с этим размещение производств нефтедобывающей промышленности в верховьях р. Чона, Непского калийного завода в районе р. Гаженка западнее Непы, наличие богатейших лесных запасов западнее Киренска, а также строительство речного догрузочного порта в Киренске в связи с необратимым обмелением р. Лена на участке Осетрово – Киренск определяет направление железнодорожной трассы и групп вариантов развития ТПК.

2 Результаты проектных изысканий по формированию основных направлений железнодорожной линии Усть-Кут – Киренск – Непа – Верхнечонский ЦПС

В связи с актуализацией исследований по Северо-Сибирской железнодорожной магистрали (далее – Севсиб): порт Сабетта – Бованенково – Салехард – Новый Уренгой – Коротчаево – Сургут – Нижневартовск – Белый Яр – Лесосибирск – Ярки – Усть-Илимск – Хребтовая, – а также ответвления от Севсиба: Белый Яр – Томск – Юрга – Новокузнецк – Таштагол – Горно-Алтайск – Урумчи – целесообразно восстановить выполненные проектные изыскания по формированию основных направлений железнодорожной линии Усть-Кут – Киренск – Непа – Верхнечонский ЦПС, осуществлявшихся с двух полигонов [8] (рисунок):

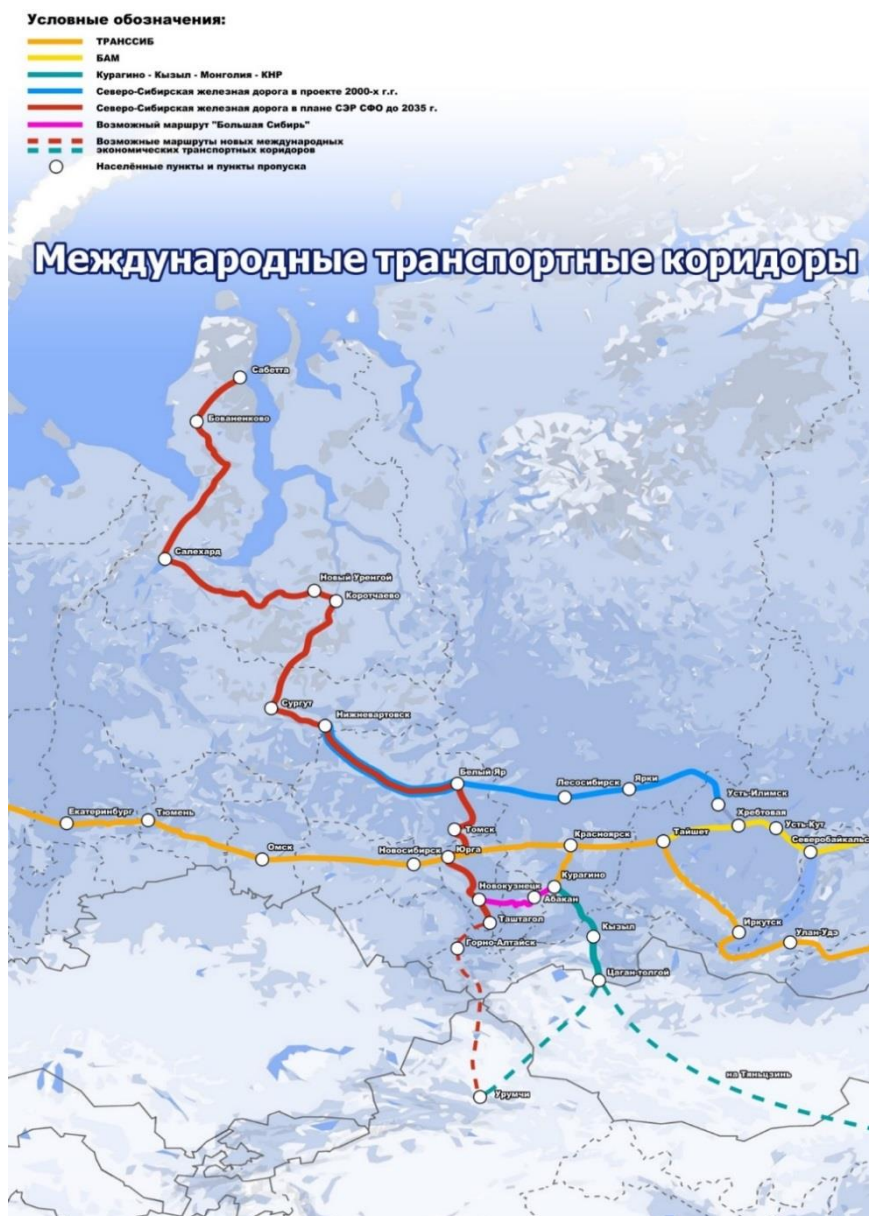
– первый полигон – В. Карелино (313 км) – Киренск – примыкание к существующей сети железных дорог;

– второй полигон – В. Карелино – Непа – Калинино – Верхнечонский ЦПС.

На первом полигоне по двум группам направления трассы, Ленскому и Бамовскому, по картам масштаба 1:25000 было протрассировано шесть вариантов:

– Ленский, Водораздельный, Водораздельный с использованием кратной тяги – Ленская группа вариантов с примыканием к станции Лена-Восточная;

– Ульканский, Киренгский и Макаровский – Бамовская группа вариантов с примыканием к станции Звездная (Таюра).



Карта международных транспортных коридоров

На втором полигоне В. Карелино – Непа – Калинино – Верхнечонский ЦПС протрассировано по картам масштаба 1:25000 два варианта: «Тунгусское направление» и «Северное направление». Кроме того, с целью прохождения трассы вблизи разведанных месторождений нефти, а также сокращения пробегов грузов нефтяного комплекса и калийных солей протрассирован Ярактинский вариант с примыканием к станции Лена-Восточная. От ст. Лена-Восточная трасса положена по левому склону долины реки Лена, выше отметок ГВВ 0,33 %, и следует до Киренска, повторяя ее изгибы и повороты.

Долина реки Лена характеризуется большой извилистостью, наличием прижимных мест с неблагоприятными физико-геологическими явлениями (лавины, осыпи, камнепады). Долина обжита, все удобные площадки заняты под сельхозугодия. Практически весь левый берег реки заповеден в археологическом отношении (стоянки древнего человека, наскальные рисунки, захоронения).

Рельеф местности не позволил полностью избежать занятия сельхозугодий, поэтому на ряде участков трасса пересекает площади, занятые под пашни. На отдельных участках трасса проложена по прижимам с отсыпкой земляного полотна в русло р. Лена. Для защиты пути от каменных осыпей и обвалов на этих участках предусматривается сооружение камнеулавливающих стенок и траншей. В качестве защиты откосов насыпей, отсыпаемых в русло реки Лена, от продольных размывающих течений и разрушающего воздействия волн от крупнотоннажного речного флота предусматривается укладка сборных монолитных бетонных плит по откосу бермы.

Участковая ст. Киренск предусмотрена на левом берегу р. Лена на прямой в плане, на площадке вблизи от площадки проектируемого Киренского догрузочного порта. От ст. Киренск трасса уложена по правому борту долины р. Телячиха, а затем по долине р. Мандарина.

Поднимаясь руководящим уклоном, трасса достигает Тунгусско-Ленского водораздела и через седло с отметкой 434,3 спускается в долину р. Колмогорово. По долине р. Колмогорово трасса руководящим уклоном спускается в долину реки Нижняя Тунгуска и пересекает её.

Участок трассы Ленского варианта от ст. Киренск (км 269) до ст. В. Карелино (км 313) протяжением 41 км является общим для Водораздельного, Бамовско-Ульканского, Бамовско-Макаровского и Бамовско-Киренгского вариантов.

Водораздельный вариант начинается так же, как и Ленский вариант, от ст. Лена-Восточная, проходит по левому борту долины р. Лена до р. Половинная и руководящим уклоном по первому борту достигает водораздела. По правому борту долины трасса следует до пересечения с р. Малая Тира (км 123), а после идет вольным ходом, избегая заболоченные участки и старицы.

С целью сокращения строительной длины и объемов работ наиболее перспективного Водораздельного варианта было выполнено трассирование по картам М 1:25000 участков варианта с использованием краткой тяги ($i_p = 18 \%$). Трасса рассматриваемого варианта, так же как Ленского и Водораздельного вариантов, начинается от ст. Лена-Восточная, проходит по левому берегу р. Лена до 30 км, затем, поворачивая на север и используя узкую долину р. Казарки, трасса напряженным ходом достигает водораздела рек Лена и М. Тира (км 64).

От ст. Переходная выполнено трассирование участка кратной тяги до 161 км основного варианта. В целом сокращение строительной длины на участке Лена – В. Карелино – Киренск составило 25 км. Однако снижения стоимости сооружения земляного полотна и искусственных сооружений не произошло ввиду того, что трасса проложена в наиболее неблагоприятных условиях, чем основной вариант.

Увеличились расходы на пробег поездов и амортизационные отчисления на подвижной состав, что привело к увеличению годовых эксплуатационных расходов по варианту.

Проанализированы Бамовско-Ульканский, Бамовско-Киренгский и Бамовско-Макаровский варианты. Изучено Тунгусское направление.

Калининское направление было продиктовано месторасположением базового поселка нефтяников и его промбазой. Задача трассировки Северного направления состояла в уходе с заболоченной поймы р. Н. Тунгуска и сокращении строительной длины за счет прямого выхода к Непскому калийному заводу, строительство которого предполагалось в пойме р. Гаженка.

Ярактинский вариант. Трасса Ярактинского варианта начинается от ст. Лена-Восточная и до 64 км, используя трассу Водораздельного варианта ($i_p = 9 \%$), достигает водораздела рек Лена и Тира. В целом задача, поставленная при трассировке варианта, выполнена: достигнуто сокращение эксплуатационной длины до Верхнечонского ЦПС на 13 км, при этом удлинение линии до ст. Киренск составило 60 км, трасса проложена в непосредственной близости от Ярактинского и Дулисьминского нефтяных месторождений, однако запасы и годовой объем их добычи незначительны.

Сокращение строительной длины и стоимости строительства с учетом строительства подъездной железнодорожной линии к Киренску не достигнуто. Однако проект по развитию Северо-Сибирской магистрали (Севсиб) способен уравнивать социально-экономические позиции разных регионов, предоставив равный доступ к транспортной инфраструктуре. Это позволяет поставить проблему формирования транспортной сети северного пояса экономического развития страны [9, 10].

3 Обсуждение

В России происходит смена стратегических направлений во взаимодействии со странами мира. В перспективе Китай способен заменить торговые связи России с Европой. Восточный вектор взаимодействия России и Китая будет способствовать росту и развитию Севера, Сибири и Дальнего Востока. Россия диверсифицирует свою внешнюю торговлю и международные перевозки, развивая соответствующую инфраструктуру в восточных и северных регионах страны. В целом необходимо адаптировать транспортно-логистические комплексы к новым условиям. Северо-Сибирская магистраль обеспечит России национальную безопасность в экономическом, геополитическом, мирохозяйственном, энергетическом, ресурсном, и наконец, стратегическом аспектах. Данная дорога, являясь основой Северного транспортного коридора, станет второй после Транссибирской магистрали артерией в пределах Ближнего Севера, соединяющей Азиатскую и Европейскую части страны.

Выводы и предложения

Важным направлением повышения эффективности социально-экономического развития северо-восточного региона РФ является повышение уровня технико-экономических обоснований по созданию крупных народно-хозяйственных объектов освоения природных ресурсов, в т. ч. совершенствование и оптимизация реализации транспортных сетей. Применительно к новому железнодорожному строительству, которое в больших масштабах ведется в сложных специфических условиях Сибири, эта проблема требует научного обоснования организационно-технологических решений по развитию транспортной сети Северо-Восточного региона индустриального освоения РФ.

Проблему предлагается решать на основе программно-целевого подхода, позволяющего рассматривать её комплексно на современном научном уровне и обеспечивающего четкую ориентацию решений и программу их реализации на достижение лучших конечных народно-хозяйственных результатов.

Результаты проектных изысканий по формированию основных направлений железнодорожной линии Усть-Кут – Киренск – Непа – Верхнечонский ЦПС позволяют рекомендовать принять стратегическое решение о проектировании данной дороги в увязке с завершением третьего этапа модернизации БАМа.

Список литературы

- 1 Азиатская часть России: новый этап освоения северных и восточных регионов страны : монография / Отв. ред. В. В. Кулешов. – Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 2008. – 427 с. – ISBN 978-5-89665-173-4.
- 2 Азиатская часть России : моделирование экономического развития в контексте опыта истории / Отв. ред. В. А. Ламин, В. Ю. Малов. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. – 464 с. – ISBN 978-5-7692-1243-7.
- 3 Траектории в высоких широтах : монография / под ред. Ю. В. Неелова, А. В. Артеева, В. А. Ламина [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2011. – 440 с. – ISBN 978-5-02-018981-2.
- 4 **Безруков, Л. А.** Проблемы формирования транспортной системы Сибирской Арктики / Л.А. Безруков // ЭКО. – 2018. – № 4. – С. 29–47. – DOI 10.30680/ECO0131-7652-2018-4-29-47.
- 5 **Воробьев, В. С.** О перспективных контурах формирования транспортной системы Арктической территории России / В. С. Воробьев, М. В. Пак // Вопросы новой экономики. – 2020. – № 1 (53). – С. 36–44. – ISSN 1994-0556.
- 6 Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 года № 877-р. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111037> (дата обращения: 25.11.2024).
- 7 **Воробьев, В. С.** Экономическое обоснование сценариев развития сухопутного транспорта Сибири : монография / В. С. Воробьев, М. В. Пак. – Новосибирск : АНС СибАКС, 2017. – 92 с. – ISBN 978-5-4379-0512-8.
- 8 **Пак, М. В.** Оценка сценариев развития транспортной системы Арктики в условиях неопределенности / М. В. Пак // Таможенное дело : актуальные проблемы : материалы II Всероссийской

References

- 1 The Asian part of Russia: a new stage in the development of the northern and eastern regions of the country : monograph / Ed. V. V. Kuleshov. – Novosibirsk : IEOPP SB RAS, 2008. – 427 p. ISBN 978-5-89665-173-4.
- 2 The Asian part of Russia : modeling economic development in the context of historical experience / Ed. V. A. Lamin, V. Yu. Malov. – Novosibirsk : Publishing house of the SB RAS, 2012. – 464 p. – ISBN 978-5-7692-1243-7.
- 3 Trajectories in high latitudes: monograph / edited by Yu. V. Neelov, A. V. Arteev, V. A. Lamin [et al.]. – Novosibirsk : Nauka, 2011. – 440 p. – ISBN 978-5-02-018981-2.
- 4 **Bezrukov, L. A.** Problems of forming the transport system of the Siberian Arctic / L. A. Bezrukov // ECO. – 2018. – No. 4. – P. 29–47. – DOI 10.30680/ECO0131-7652-2018-4-29-47.
- 5 **Vorobyov, V. S.** On the promising contours of the formation of the transport system of the Arctic territory of Russia / V. S. Vorobyov, M. V. Pak // Issues of the New Economy. – 2020. – No. 1 (53). – P. 36–44. – ISSN 1994-0556.
- 6 Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030, approved by order of the Government of the Russian Federation of June 17, 2008 No. 877-r. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111037> (date of access: 11/25/2024).
- 7 **Vorobyov, V. S.** Economic substantiation of scenarios for the development of land transport in Siberia : monograph / V. S. Vorobyov, M. V. Pak. – Novosibirsk : ANS SibAKS, 2017. – 92 p. – ISBN 978-5-4379-0512-8.
- 8 **Pak, M. V.** Assessment of scenarios of the Arctic transportation system development under uncertainty / M. V. Pak // Customs business : current

научно-практической конференции с международным участием. – Новосибирск : СГУПС, 2021. – С. 108–112. – ISBN 978-5-00148-242-0.

9 Северо-Сибирская магистраль: предпроектные исследования : монография / В. Я. Ткаченко, В. Ю. Малов, В. Д. Верескун [и др.]. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. – 240 с. – ISBN 5-93461-423-1.

10 Прокофьева, Т. А. Строительство Северо-Сибирской магистрали – один из главных приоритетов развития транспортной системы Сибири и экономики России / Т. А. Прокофьева, С. С. Гончаренко // Россия в современном мире : экономическая оценка : коллективная монография / Т. Г. Семенова, Е. А. Скобликов, Л. П. Чижова [и др.] ; под общей редакцией Н. А. Адамова. – Москва : Профессор, 2017. – С. 99–109. – ISBN 978-5-9909184-6-7.

problems : proceedings of the II All-Russian scientific-practical conference with international participation. – Novosibirsk : SGUPS, 2021. – P. 108–112. – ISBN 978-5-00148-242-0.

9 The North Siberian Railway: pre-design studies : monograph / V. Ya. Tkachenko, V. Yu. Malov, V. D. Vereskun [et al.]. – Novosibirsk : SGUPS Publishing House, 2010. – 240 p. – ISBN 5-93461-423-1.

10 Prokofieva, T. A. Construction of the North Siberian Mainline is one of the main priorities for the development of the transport system of Siberia and the Russian economy / T. A. Prokofieva, S. S. Goncharenko // Russia in the modern world : economic assessment : collective monograph / T. G. Semenkova, E. A. Skoblikov, L. P. Chizhova [et al.] ; under the general editorship of N. A. Adamov. – Moscow : Professor, 2017. – P. 99–109. – ISBN 978-5-9909184-6-7.

V. D. Vereskun, V. S. Vorobyov, N. Yu. Kupreeva, I. B. Repina

FORMATION OF THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT NETWORK OF THE NORTH-EASTERN REGION OF THE RF

Abstract. The article substantiates organizational and technological solutions for the development of the transport network of the North-Eastern region of industrial development of the Russian Federation. The characteristics of the Verkhne-Lensky TPK are given: oil producing complex, mineral fertilizers production, timber industry complex, etc. The results of design surveys for the formation of the main directions of the railroad line Ust-Kut - Kirensk - Nepa - Verkhnechonsky Central Collection Point (CPS) of oil are given. Bamovsko-Ulkansky, Bamovsko-Kirensky and Bamovsko-Makarovsky variants, Tunguska and Kalininsky directions, as well as Yarakinsky variant are analyzed. It is concluded that the North Siberian Railway as the basis of the Northern Transport Corridor will become the second artery within the Near North after the Trans-Siberian Railway, connecting the Asian and European parts of the country.

Keywords: strategy, transport network, railway line, modernization, territorial-production complex, resources, surveys, logistics.

For citation: Formation of the development of the transport network of the North-Eastern region of the RF / V. D. Vereskun, V. S. Vorobyov, N. Yu. Kupreeva, I. B. Repina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 146–152. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_146.

Сведения об авторах

Верескун Владимир Дмитриевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
доктор технических наук, профессор, ректор,
e-mail: vvd@rgups.ru

Воробьев Валерий Степанович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),

Information about the authors

Vereskun Vladimir Dmitrievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Rector of the University,
e-mail: vvd@rgups.ru

Vorobyov Valery Stepanovich

Siberian State Transport University (STU),
Chair «Technology, Organization and Economics of Construction»,

кафедра «Технология, организация и экономика строительства»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: vorobjev@stu.ru

Купреева Наталья Юрьевна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Экономической теории и антикризисного управления»,
старший преподаватель,
e-mail: super.nat1008@yandex.ru

Репина Ирина Борисовна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Инженерная геодезия»,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий документовед кафедры,
e-mail: Repinaib76@mail.ru

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of Chair,
e-mail: vorobjev@stu.ru

Kupreeva Natalya Yuryevna

Siberian State Transport University (STU),
Chair «Economic Theory and Crisis Management»,
Senior Lecturer,
e-mail: super.nat1008@yandex.ru

Repina Irina Borisovna

Siberian State Transport University (STU),
Chair «Engineering Geodesy»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Leading Documentation
Specialist of the Chair,
e-mail: Repinaib76@mail.ru

В. Д. Верескун, А. Н. Гуда, Э. А. Мамаев

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ И НАДЕЖНОСТЬЮ В ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОСТАВОК

Аннотация. Рассматриваются методические подходы к обеспечению надежности и снижению рисков в реализации транспортно-логистических цепей поставок. Проведен анализ концептуальных подходов к оценке и управлению рисками, классификации и учета рисков, направлений повышения надежности реализации транспортно-логистических цепей как многоагентных систем. Рассмотрены разные подходы к формализованному представлению моделей надежности транспортно-логистических цепей, статистические и динамические аспекты управления рисками, модели привлечения инвестиций для повышения надежности транспортно-логистических цепей с учетом экономической привлекательности для агентов и фокусной компании в цепи. Показаны направления обеспечения надежности и снижения рисков в условиях стохастичности поведения агентов, возможностей резервирования сегментов логистических цепей, вариативности рынка – наличия монополии, олигополии и конкурентного рынка.

Ключевые слова: транспортно-логистическая цепь поставок, логистика и транспортировка, моделирование, оптимальность решений, управление рисками, надежность цепи поставок.

Для цитирования: Верескун, В. Д. Методы управления рисками и надежностью в транспортно-логистических цепях поставок / В. Д. Верескун, А. Н. Гуда, Э. А. Мамаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 153–160. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_153.

Введение

Современные методы оценки эффективности организации транспортно-логистических цепей используют критерии качества услуг, включающие надежность реализации поставок – полное соответствие заявленным условиям поставки. Эта сфера услуг имеет особенность – пространственная и временная протяженность реализации услуги с привлечением, как правило, множества участников при реализации комплексной транспортно-логистической услуги [1]. Именно фактор многоагентности в реализации транспортно-логистических услуг формирует существенный уровень рисков (энтропии, неопределенности), генерирует репутационные риски не только для конкретного агента (элемента, звена цепи), но и для всех участников реализации решения. Следует также отметить и другие особенности в реализации транспортно-логистических цепей, такие как гетерогенность участников по функциональным задачам и форме организации бизнеса, разный уровень конкуренции на отдельных сегментах рынка транспортно-логистических услуг, ограниченность выбора для реализации решений в отдельных сегментах, разный уровень надежности агентов, связанные как инфраструктурными, так и организационно-технологическими особенностями функционирования [2, 3].

Задачи управления рисками и надежностью организации транспортно-логистических цепей приобретают особую значимость в условиях цифровой экономики, транспорта и логистики, предусматривают внедрение технологий выбора оптимальных решений и их реализацию без привлечения логистов-проектировщиков цепей поставок [4–6].

В этих условиях развитие методической базы принятия решений по выбору, реализации транспортно-логистических цепей с учетом рисков и обеспечения высокой надёжности (реализуемости) в условиях воздействия внешних и внутренних факторов становится актуальной задачей. В работе приводится исследование методических подходов оценки надежности и управления рисками в транспортно-логистических цепях поставок, которые используются на разных уровнях их планирования и реализации.

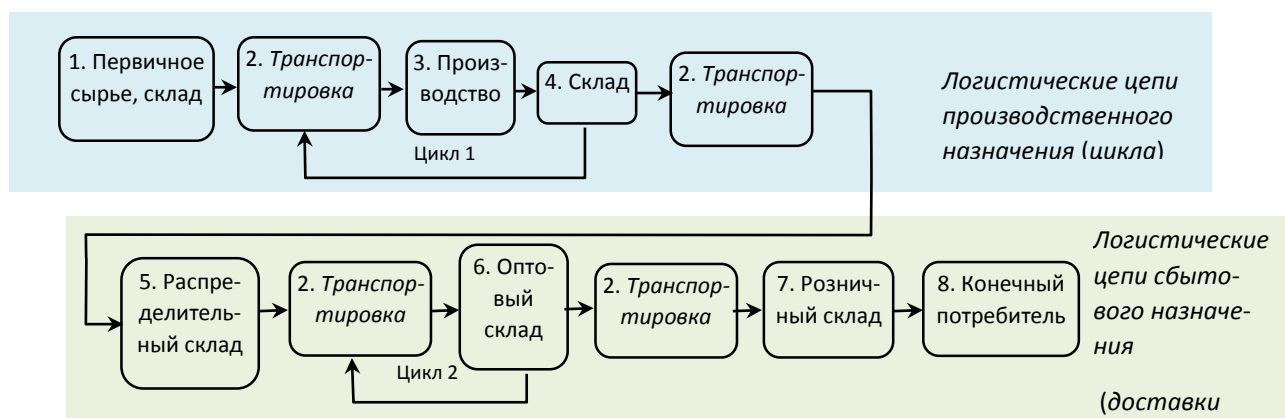
Постановка задачи

Формализация транспортно-логистических цепей поставок представляет определенные сложности: с одной стороны, требуется их определенная универсальность, с другой стороны, ориентация на достижение поставленной цели и решение сформулированных задач, требуют отказа от высокой степени обобщения их постановки.

Целью исследования являются модели и методы управления рисками и надежностью, которые позволяют представлять транспортно-логистическую цепь как последовательность взаимосвязанных элементов (субъектов бизнеса), обеспечивающие выполнение декларированных функций над материальным потоком.

В соответствии с целью транспортно-логистическую цепь можно представить последовательностью бизнес-единиц, обеспечивающей перемещение в пространстве материального (грузового) потока из точки зарождения (источника) в точку потребления (стока). Все операции над материальным потоком выбранными бизнес-единицами должны быть допустимыми.

Пусть в транспортно-логистической системе функционируют B видов субъектов хозяйствования, W_b – множество субъектов, реализующее функции вида b , $W = \cup_{b \in B} W_b$. Допустимые связи между хозяйствующими субъектами можно представить многослойным ориентированным графом $G_b = (W, D)$, $D = W \times W$. Формализованная схема реализации логистических цепей поставок, приведенная на рисунке [1, 7], представляется для каждого заказа-заявки цепью в графе G_b . Граф G_b является взвешенным, каждая вершина и дуга характеризуется вектором параметров, имеющие отношение к мощности реализации потока, временными, стоимостными параметрами и параметрами, определяющие надежность соответствующего узла при реализации потока каждого вида. То есть для каждой вершины $w \in W$ и дуги $d \in D$ определены векторы параметров I_w, I_d .



Формализованная схема реализации транспортно-логистических цепей

Множество видов потоков, реализуемых на этом графе, обозначим P . Компоненты векторов I_w и I_d для каждого элемента графа определяют «возможности» по реализации потока соответствующими элементами.

Таким образом, задача оптимальной организации материального потока на графе G_b сводится к определению цепи, доставляющей наилучшее значение по одному (или множеству) критериев, вычисляемые по определенному функционалу по параметрам векторов входящих в эту цепь вершин и дуг. Для двух вершин x и y для потока $f \in F$ величиной $S_f(x, y)$ определим цепь $x = w_0, w_1, \dots, w_n = y$, такую, что $(w_i, w_{i+1}) \in D$, компоненты векторов-характеристик I_w и I_d по реализуемости потока $f \in F$ являются допустимыми как по вершинам w_i , так и по дугам (w_i, w_{i+1}) , $i = 0, 1, \dots, n$.

В приведенной постановке определения оптимальной транспортно-логистической цепи опущены ограничения на множественность реализуемых потоков G_b , видоизменение характера потока при его прохождении через вершины и дуги G_b и другие ограничения, не влияющие на цели исследования. Пусть в компонентах векторов I_w и I_d первой компонентой являются величины, характеризующие надежность и реализуемость потока (риски) при его прохождении через вершину (дугу) цепи.

Пусть $\Omega_{(x,y)}^f = \{C_1, C_2, \dots, C_{|\Omega_{(x,y)}^f|}\}$ множество цепей (путей), соединяющее вершины x и y на графе G_b для реализации потока вида $f \in F$ (для удобства индекс потока $f \in F$ можно опустить):

$$C_i = \{x = w_0^i, w_1^i, \dots, w_n^i = y \mid (w_i^i, w_{i+1}^i) \in G_b, i = 0, 1, \dots, n\};$$

$$I_{C_i}^w = \{w_0^i, w_1^i, \dots, w_n^i\}, I_{C_i}^d = \{(w_0^i, w_1^i), (w_1^i, w_2^i), \dots, (w_{n-1}^i, w_n^i)\}.$$

В I_w и I_d компонента m определяет величину риска при порождении потока через вершину и дугу соответственно. Обозначим эти величины через $I_w^m(w_i)$ и $I_d^m(w_i, w_i)$.

Тогда нахождение оптимального пути для двух вершин x и y на графе G_b сводится к оптимизации функционала, т.е.

$$Z\{(x, y)^{opt}\} = \max_{C_l} \sum_{w_i^l \in I_{C_l}^w} I_w^m(w_i^l) + \sum_{(w_i^l, w_{i+1}^l) \in I_{C_l}^d} I_d^m(w_i^l, w_{i+1}^l).$$

Задача на максимум целевого функционала выражает критерий надежности (реализуемости) потока, а для рисков в аналогичной постановке мы имеем задачу на минимизацию функционала.

Методы решения

Функционально модели управления рисками и надежностью могут подразделяться на детерминированные и стохастические [8].

В *детерминированной модели* требуется определить транспортно-логистическую цепь поставок, доставляющую максимальное значение критерия эффективности, который определяет величины рисков и надежности.

В *однокритериальной постановке* задача сводится к поиску пути на ориентированном графе с минимальным (или максимальным) значением критерия риска (надежности). Классические алгоритмы нахождения кратчайшего пути на графе могут послужить методической основой нахождения оптимального решения. В алгоритме могут быть реализованы дополнительные ограничения на предельные допустимые значения рисков и надежности. Например, дуги и вершины графа с недопустимыми значениями параметров надежности и рисков могут быть исключены из постановки задачи и в расчетах не будут участвовать.

В общем случае модификация алгоритма нахождения кратчайшего пути будет зависеть от конкретной постановки задачи управления рисками. Рассмотрим некоторые варианты, например, нахождения транспортно-логистической цепи оптимальной надежности. Если рассматривать транспортно-логистическую сеть (x, y) как последовательность независимых элементов с вероятностями отказов при реализации потока на вершинах w_i и дугах (w_i, w_{i+1}) , $i = 0, 1, \dots, n$, равными $Q_p(w_i)$ и $Q_p(w_i, w_{i+1})$, ее надежность определяется $P(x, y) = \prod_{w_i} (1 - Q_p(w_i)) \prod_{(w_i, w_{i+1})} (1 - Q_p(w_i, w_{i+1}))$. $Q_p(w_i)$ и $Q_p(w_i, w_{i+1})$ являются параметрами – компонентами векторов-характеристик I_w и I_d .

Для случая многокритериального выбора оптимальной транспортно-логистической цепи используется алгоритм выделения Парето-оптимальных решений по каждому критерию, и дополнительный алгоритм отбора наилучшего решения, например, алгоритмы типа свертки критериев или последовательности уступок, упорядочив критерии в порядке убывания значимости для лица, принимающего решения.

Конкретные реализации алгоритмов имеют следующий вид:

1 Определение критериев оценки эффективности выбора оптимальной транспортно-логистической цепи на графе G . Например, стоимость реализации потока на единицу потока, время реализации потока, сохранность потока, надежность реализации потока по времени, стоимости, сохранности и др. Определим упорядоченный в порядке убывания их значимости набор таких критериев \tilde{Z}_j^* , $j = 1, \dots, m$.

2 Определим $\Omega_f^j(x, y)$ – множества Парето-оптимальных решений выбора транспортно-логистической цепи $S_f(x, y)$ по критерию j .

3 Возможны ситуации:

– $\bigcap_j \Omega_f^j(x, y) \neq \emptyset$, т.е. существует непустое множество оптимальных по всем критериям решений, довольно маловероятное. В таком случае требует решения задача многокритериального выбора в полученном множестве решений;

– $\bigcap_j \Omega_f^j(x, y) = \emptyset$, причем $\Omega_f^j(x, y) \neq \emptyset$. Оптимальным будет решение, которое является единственным входящим в два последовательных упорядоченных множества $|\Omega_f^j(x, y) \cap \Omega_f^{j+1}(x, y)| = 1$;

– множество Парето-оптимальных решений по очередному критерию не включает решения из предшествующего множества, т.е. $\Omega_f^j(x, y) - \Omega_f^{j+1}(x, y) \neq \emptyset$. Тогда оптимальное решение определяется экспертным или иным способом лицом, принимающим решение, из множества $\Omega_f^j(x, y) \neq \emptyset$.

В случае использования свертки критериев алгоритм нахождения оптимальной транспортно-логистической цепи сводится к расчету мультипликативного критерия по каждой дуге и вершине. Следующие действия сводятся к алгоритмам типа нахождения кратчайших путей на полученном графе сети с полученными весами.

Динамические модели. Оптимизация транспортно-логистических цепей в статической постановке требует нахождения оптимального решения в сложившихся условиях (конкретный момент времени), однако в случае неудовлетворительности найденного решения с позиций надежности необходимо рассмотреть вопросы совершенствования логистической системы. Другими словами, многоагентная транспортно-логистическая система в условиях конкуренции должна развиваться на принципах самоорганизации, привлечения ресурсов (капитала) в привлекательные сегменты рынка. Но в условиях олигополии или монополии по отдельным сегментам рынка или видам потоков логистическая система, как самоорганизующаяся организационно-экономическая система, может развиваться по разным траекториям, связанные с формой привлечения ресурсов.

Рассмотрим следующие варианты поведения агентов в условиях их олигополии и (или) монополии, т.е. в условиях зависимости агентов рынка от поведения и активности основных участников рынка. Например, монопольное положение железнодорожного транспорта, олигопольное положение портовых комплексов и операторов специализированного подвижного состава позволяют им в определенных условиях не заниматься развитием технологий, повышением надежности и снижением рисков.

Решение таких задач имеет двухэтапный характер. Первый этап – определение «узкого места» в системе надежности организации транспортно-логистических цепей и безальтернативности использования других. Этот вопрос решается моделями типа нахождения минимального сечения в графе G_v .

Второй этап – определение варианта привлечения инвестиций (средств, ресурсов) для повышения надежности и снижения рисков за счет ресурсов (инвестиций) участников (агентов) транспортно-логистических цепей. В этом случае целесообразно выделять в логистической цепи доминирующую фокусную компанию (агента), экономические интересы которой доминируют над остальными, например, ОАО «РЖД», «Деловые линии», «Почта России» [9, 10].

Для множества K -агентов ($k = 0, 1, \dots, |K|$) определены риски управления R , $r = 0, 1, \dots, |R|$. Доминирующие интересы в снижении рисков у фокусной компании $k = 0$. Величину влияния на работу каждого вида риска r агентом k , выраженную вероятностью возникновения отказа со стороны агента на заданном периоде времени t , и приводящую к нарушению вида j , определим как $p_{rkj}(t)$. Экономический ущерб от возникновения такого отказа для контрагента обозначим e_{rkj} . Агент k имеет возможности по снижению риска в работе, зависящие от объема выделяемых средств, $p_{rkj}(x_{rk}, t)$ – изменение вероятности безотказной работы r за период времени t при выделении средств x_{rk} , $e_{rkj}(p_{rkj}(t), x_{rk})$ – уменьшение потерь агента k при выделении средств x_{rk} за период времени t на развитие надежности управления r , устраняющий технологическое нарушение вида j , за счет безотказности. Каждый агент имеет возможности по выделению средств на обеспечение надежности и снижения рисков в объеме S_k . Тогда модели оптимизации распределения средств на обеспечение надежности элементов транспортно-логистической цепи имеют виды, приведенные в таблице.

В задачах 1–4 целевые функции (1.1), (2.1), (3.1), (4.1) выражают суммарный ущерб от рисков для участников транспортно-логистической цепи – агентов; (1.2), (2.2), (3.2) – ограничения на доступные средства агентов, направляемые на мероприятия по уменьшению отказов, снижению рисков и повышению надежности. Условие неотрицательности управляемых переменных заданы в (1.3), (2.3), (3.3), (4.4), условия (4.2) определяют превышение эффекта от увеличения надежности над затрачиваемыми на это средствами, условия (4.3) определяют экономическую целесообразность выделения средств для конкретного ресурса и контрагента.

Допускается также конкурентное распределение средств на повышение надежности в условиях взаимозависимости работы контрагентов транспортно-логистической цепи. В этом случае вопросы финансирования мер на снижение отказов становятся предметом «торга» между контрагентами.

Таким образом, детерминированные модели управления рисками отвечают на вопросы:

- на какие направления целесообразно распределять средства для повышения надежности реализации материального потока в условиях мультиагентного функционирования транспортно-логистических цепей;
- какие направления привлечения средств на снижение рисков возможны в условиях распределенности экономических интересов агентов;
- какие варианты консолидации ресурсов для снижения рисков допустимы в транспортно-логистической цепи.

В стохастических моделях управления рисками следует принимать следующие допущения:

- логистическая цепь представляется сложной архитектурой, допускающей резервирование элементов, представляемые конкурентными агентами на рынке логистических услуг;

- агенты имеют разные случайные характеристики надежности (вероятности выполнения договорных обязательств);
- стоимость услуг (включения в транспортно-логистическую цепь) агентов различная и зависит от надежности и рисков;
- доступны статистические показатели деятельности агентов на рынке транспортно-логистических услуг (виды деятельности, вероятность невыполнения обязательств, стоимость услуг, технологические и производственные мощности и др.);
- в прогнозируемый период времени реализации решений по управлению рисками транспортно-логистических цепей показатели агентов считаются постоянными.

**Модели привлечения инвестиций (ресурсов)
для повышения надежности транспортно-логистических цепей**

Модель – задача	Описание
1 Оптимальное распределение средств на повышение надежности фокусной компании ($k = 0$)	$\sum_j \sum_{r=1}^{ R } \sum_{k=1}^{ K } e_{roj}(p_{roj}(t), x_{rk}) \rightarrow \min_{\ x_{rk}\ }, \quad (1.1)$ <p>при ограничениях</p> $\sum_{r=1}^{ R } x_{rk} \leq S_k, \quad k = 0, 1, \dots, K , \quad (1.2)$ $x_{rk} \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots, K , \quad r = 0, 1, \dots, R \quad (1.3)$
2 Оптимальное распределение средств на повышение надежности агента k	$\sum_j \sum_{r=1}^{ R } e_{rk0}(p_{rk0}(t), x_{rk}) \rightarrow \min_{\ x_{rk}\ }, \quad (2.1)$ <p>при ограничениях</p> $\sum_{r=1}^{ R } x_{rk} \leq S_k, \quad (2.2)$ $x_{rk} \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots, K , \quad r = 0, 1, \dots, R \quad (2.3)$
3 Оптимальное распределение средств на повышение надежности с консолидацией ресурсов агентов с фокусной компанией ($k = 0$)	$\sum_j \sum_{r=1}^{ R } e_{rk0}(p_{rk0}(t), x_{rk}) \rightarrow \min_{\ x_{rk}\ }, \quad (3.1)$ <p>при ограничениях</p> $\sum_{k=0}^{ K } \sum_{r=1}^{ R } x_{rk} \leq \sum_{k=0}^{ K } S_k, \quad (3.2)$ $x_{rk} \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots, K , \quad r = 0, 1, \dots, R \quad (3.3)$
4 Распределение средств на повышение надежности в условиях экономической целесообразности для агента	$\sum_j \sum_{r=1}^{ R } e_{rkj}(p_{rkj}(t), x_{rk}) \rightarrow \min_{\ x_{rk}\ }, \quad (4.1)$ <p>при ограничениях</p> $\sum_j \sum_{r=1}^{ R } e_{rkj}(p_{rkj}(t), x_{rk}) \geq S_k, \quad k = 0, 1, \dots, K , \quad (4.2)$ $\sum_j e_{rkj}(p_{rkj}(t), x_{rk}) \geq x_{rk}, \quad k = 0, 1, \dots, K , \quad (4.3)$ $r = 0, 1, \dots, R . \quad (4.4)$ $x_{rk} \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots, K, \quad r = 0, 1, \dots, R $

В этих условиях формирование транспортно-логистической цепи с высокой степенью надежности (минимальными рисками) сводится к следующим моделям выбора:

1 Выбор (определение) пути в графе $G_{\text{в}}$ с оптимальным аддитивным критерием эффективности цепи. При этом все звенья цепи принимаются равнозначными по уровню влияния риска на реализацию материального потока. В этом случае в графе $G_{\text{в}}$ виды услуг сегментированы, получение услуги от альтернативных агентов маловероятно, и это соответствует условиям монопольного рынка.

2 Оптимальный выбор пути в графе $G_{\text{в}}$ по определенному критерию с резервированием отдельных альтернативных сегментов, т.е. поиск всех оптимальных путей или равнозначных при допущенных отклонениях целевой функции. В этом случае в графе $G_{\text{в}}$ существуют альтернативные сегменты для формирования транспортно-логистической цепи, который соответствует условиям олигополистического или конкурентного рынка транспортно-логистических услуг.

Надежность и риски реализации вышеприведенных транспортно-логистических цепей рассчитываются как надежность (риски) технической системы с резервированием, причем резервирование можно рассматривать «холодным», если реализация транспортно-логистической цепи декларирует использование на отдельных участках агентов без обязательного их привлечения к реализации потока, и «горячим», если в реализации транспортно-логистической цепи могут участвовать агенты по договору о сотрудничестве, в котором агент может подключиться к реализации логистической цепи по первому требованию.

В более общем случае модели управления рисками являются дополнительными моделями к моделям оптимальной организации транспортно-логистических цепей.

Выводы

Управление рисками и надежностью в транспортно-логистических цепях поставок является одной из ключевых задач, направленных на снижение непроизводительных издержек в стоимости конечной продукции и обеспечение конкурентоспособности. Многоагентность, гетерогенность, функциональная и технологическая разница в уровне развития элементов и другие факторы увеличивают риски и надежность. В этих условиях рассмотрение задачи управления рисками в цепях поставок должно производиться с учетом множества факторов и поведения процессов, которые интегрально должны обеспечивать гарантии реализации цепей поставок с минимальными издержками [11].

Приведенные в исследовании модели и подходы позволят решить эти задачи при условии их соответствия целям и задачам рассматриваемой организационно-экономической среды реализации логистических цепей.

Как показывает анализ, конкурентная вовлеченность в реализацию транспортно-логистических цепей агентов рынка доказывает востребованность использования оптимизационных и иных моделей управления рисками для увеличения эффективности принимаемых решений.

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 **Мамаев, Э. А.** Модель активности агентов в транспортно-логистических и технологических системах / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, К. А. Годованый // Инженерный вестник Дона. – № 12. – 2021. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7345 (дата обращения: 15.11.2024).

3 **Пакулина, Е. В.** Анализ логистических рисков в современных условиях / Е. В. Пакулина, О. Д. Покровская, А. А. Мигров // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 172–196. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-2-172-196.

4 **Дыбская, В. В.** Квантовая логистика: новый взгляд на оптимизацию логистической деятельности в цепях поставок / В. В. Дыбская, В. И. Сергеев, И. В. Сергеев // Логистика. – 2024. – № 5 (210). – С. 42–48.

5 **Дмитриев, А. В.** Обеспечение экономической безопасности и устойчивости цепей поставок в условиях цифровизации / А. В. Дмитриев, В. В. Щербаков // Вестник факультета управления СПбГЭУ. – 2023. – № 15. – С. 11–18. – eISSN 2541-951X.

6 **Дмитриев, А. В.** Обеспечение экономической безопасности при внедрении цифровых технологий в транспортной логистике / А. В. Дмитриев, В. А. Нос // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). –

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 Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

2 **Mamaev, E. A.** The model of agent activity in transport, logistics and technological systems / E. A. Mamaev, A. N. Guda, K. A. Godovany // Engineering Journal of Don. – No. 12. – 2021. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7345 (date of access: 11/15/2024).

3 **Pakulina, E. V.** Analysis of logistics risks in modern conditions / E. V. Pakulina, O. D. Pokrovskaya, A. A. Migrov // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Vol. 13. – No. 2. – P. 172–196. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-2-172-196.

4 **Dybskaya, V. V.** Quantum logistics: a new look at optimizing logistics activities in supply chains / V. V. Dybskaya, V. I. Sergeev, I. V. Sergeev // Logistics. – 2024. – No. 5 (210). – P. 42–48.

5 **Dmitriev, A. V.** Ensuring economic security and sustainability of supply chains in the context of digitalization / A. V. Dmitriev, V. V. Shcherbakov // Bulletin of the Management Department of Saint-Petersburg State University of Economics. – 2023. – No. 15. – P. 11–18. – eISSN 2541-951X.

6 **Dmitriev, A. V.** Ensuring economic security when implementing digital technologies in transport logistics / A. V. Dmitriev, V. A. Nos // Vestnik of Rostov State University of Economics (RINH). – 2024. – Vol. 31. – No. 1. – P. 21–29. – DOI 10.54220/v.rsue.1991-0533.2024.1.85.003.

2024. – Т. 31. – № 1. – С. 21–29. – DOI 10.54220/v.rsue.1991-0533.2024.1.85.003.

7 О моделях трансформации деятельности логистического оператора / К. А. Годованый, В. В. Зырянов, А. И. Колобов, Э. А. Мамаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 55–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_55.

8 **Маколова, Л. В.** Прогнозирование логистических рисков в цепях поставок на основе моделирования процессов / Л. В. Маколова, О. И. Веревкина // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2022. – № 4 (33). – С. 41–47. – ISSN 2415-8658.

9 **Болодурина, И. П.** Применение правил нечеткой логики для анализа данных и принятия решений при управлении грузоперевозками в условиях неопределенности / И. П. Болодурина, Е. А. Спешилов // Вестник ЮУрГУ. – (Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»). – 2023. – Т. 23. – № 2. – С. 52–64. – DOI 10.14529/ctcr230205.

10 Вопросы совершенствования транспортной отрасли в условиях развития подключённых транспортных средств / Д. В. Капский, С. В. Богданович, П. В. Куренков, Н. А. Филиппова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 3. – С. 64–73. – DOI 10.25198/2077-7175-2024-3-64.

11 **Гришкова, Д. Ю.** Анализ логистических рисков в условиях переориентации грузопотоков в восточном направлении / Д. Ю. Гришкова, Н. С. Чигрин // Социально-экономический и гуманитарный журнал. – 2024. – № 2 (32). – С. 83–89. – DOI 10.36718/2500-1825-2024-2-83-89.

7 About the models of transformation of the logistics operator's activities / K. A. Godovany, V. V. Zyryanov, A. I. Kolobov, E. A. Mamaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – № 1. – P. 55–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_55.

8 **Makolova, L. V.** Forecasting logistics risks in supply chains based on process modeling/ L. V. Makolova, O. I. Verevkin // Transport of the Asia-Pacific Region. – 2022. – No. 4 (33). – P. 42–51. – ISSN 2415-8658.

9 **Bolodurina, I. P.** Application of fuzzy logic rules for data analysis and decision making in cargo transportation management under uncertainty / I. P. Bolodurina, E. A. Speshilov // Bulletin of the South Ural State University. Computer technologies, automatic control, radio electronics” – 2023. – Vol. 23, No. 2. – P. 52–64. – DOI 10.14529/ctcr230205.

10 Issues of transport sector improvement in the context of connected vehicles development / D. V. Kapski, S. V. Bogdanovich, P. V. Kurenkov, N. A. Filippova // Intellect. Innovations. Investments. – 2024. – No. 3. – P. 64–73. – DOI 10.25198/2077-7175-2024-3-64.

11 **Grishkova, D. Yu.** Logistic risks analysis in conditions of cargo flow reorientation in the eastern direction / D. Yu. Grishkova, N. S. Chigrin // Social and economic and humanitarian magazine. – 2024. – No. 2 (32). – P. 83–89. – DOI 10.36718/2500-1825-2024-2-83-89.

V. D. Vereskun, A. N. Guda, E. A. Mamaev

RISK AND RELIABILITY MANAGEMENT METHODS IN TRANSPORT AND LOGISTICS SUPPLY CHAINS

Abstract. The article considers methodological approaches to ensuring reliability and reducing risks in the implementation of transport and logistics supply chains. The article analyzes conceptual approaches to risk assessment and management, risk classification and accounting, and directions for increasing the reliability of transport and logistics chains as multi-agent systems. The article considers different approaches to the formalized representation of reliability models of transport and logistics chains, statistical and dynamic aspects of risk management, and investment attraction models for increasing the reliability of transport and logistics chains as well as statistical and dynamic aspects of risk management, and investment attraction models for increasing the reliability of transport and logistics chains, taking into account the economic attractiveness for agents and the focal company in the chain. The article shows the directions for ensuring reliability and reducing risks in the context of stochastic behavior of agents, the possibility of reserving segments of logistics chains and market variability – the presence of a monopoly, oligopoly and a competitive market.

Keywords: transport and logistics supply chain, logistics and transportation, modeling, optimality of solutions, risk management, reliability of supply chain.

For citation: Vereskun, V. D. Risk and reliability management methods in transport and logistics supply chains / V. D. Vereskun, A. N. Guda, E. A. Mamaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 153–160. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_4_153.

Сведения об авторах

Верескун Владимир Дмитриевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
доктор технических наук, профессор, ректор,
e-mail: vvd@rgups.ru

Гуда Александр Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Информатика»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой, проректор по научной работе,
e-mail: guda@rgups.ru

Мамаев Энвер Агапашаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: mamaev_enver@mail.ru

Information about the authors

Vereskun Vladimir Dmitrievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Rector of the University,
e-mail: vvd@rgups.ru

Guda Alexander Nikolayevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Science»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair, Vice Rector for Scientific Research,
e-mail: guda@rgups.ru

Mamaev Enver Agapashaevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Logistics and Management of Transport Systems»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: mamaev_enver@mail.ru

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин

ОЦЕНКА РИСКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАЛОИНТЕНСИВНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ

Аннотация. Оценка риска эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий позволяет выявлять и существенно снижать потенциальные затруднения в их работе. В статье предложен инструмент оценки рисков мероприятий для повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных линий, включающий в себя механизм контроля показателей работы подобных линий. Предлагаемый механизм контроля показателей основан на наборе технических, технологических и экономических показателей, которые являются случайными величинами с заданными средними значениями и ковариационной матрицей, учитывающей корреляции между показателями и сезонной неравномерностью. Разработан комплекс вариантов эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий (МИЛ), учитывающий изменение показателей для выбора эффективных направлений при заданных начальных условиях. Представлены результаты моделирования оценки вероятности возникновения альтернативных вариантов с использованием метода Монте-Карло для вероятностного распределения рисков и их совокупного воздействия на показатели. Дана количественная и качественная оценка возможных вариантов эксплуатации МИЛ при изменении ее финансового результата.

Ключевые слова: управление процессами перевозки, малоинтенсивные линии, потребная пропускная способность, наличная пропускная способность, железнодорожный транспорт, оценка рисков.

Для цитирования: Ковалев, К. Е. Оценка рисков при эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 161–172. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_161.

Введение

Одной из задач эксплуатации железнодорожного транспорта является повышение эффективности работы железнодорожных линий. Большинство исследований, например, [1–5], рассматривает ситуацию, когда потребная пропускная способность ($N_{потр}$) динамично растёт (t_1, t_2, t_3, t_4) и превышает наличную пропускную способность ($N_{налич}$) с увеличением продолжительности жизненного цикла линии. В таких ситуациях применяется поэтапный комплекс повышения наличной пропускной способности для удовлетворения потребностей в перевозках (рис. 1).

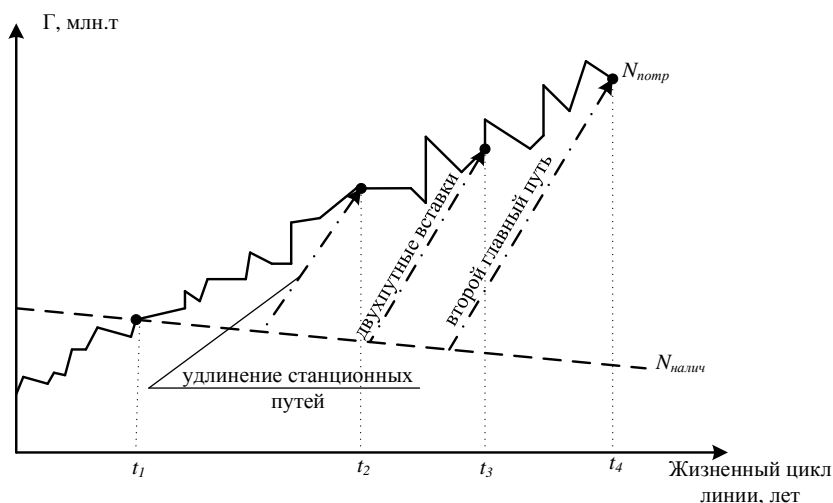


Рис. 1. Существующий подход к соотношению потребной и наличной пропускных способностей

Но имеется ряд ситуаций, когда потребная пропускная способность в течение жизненного цикла линии снижается по независящим от железнодорожного транспорта причинам (миграция населения, социальные и экономические преобразования, изменений структуры пассажиропотоков и грузопотоков), что приводит к появлению малоинтенсивных железнодорожных линий (МИЛ) (рис. 2) [6–8].

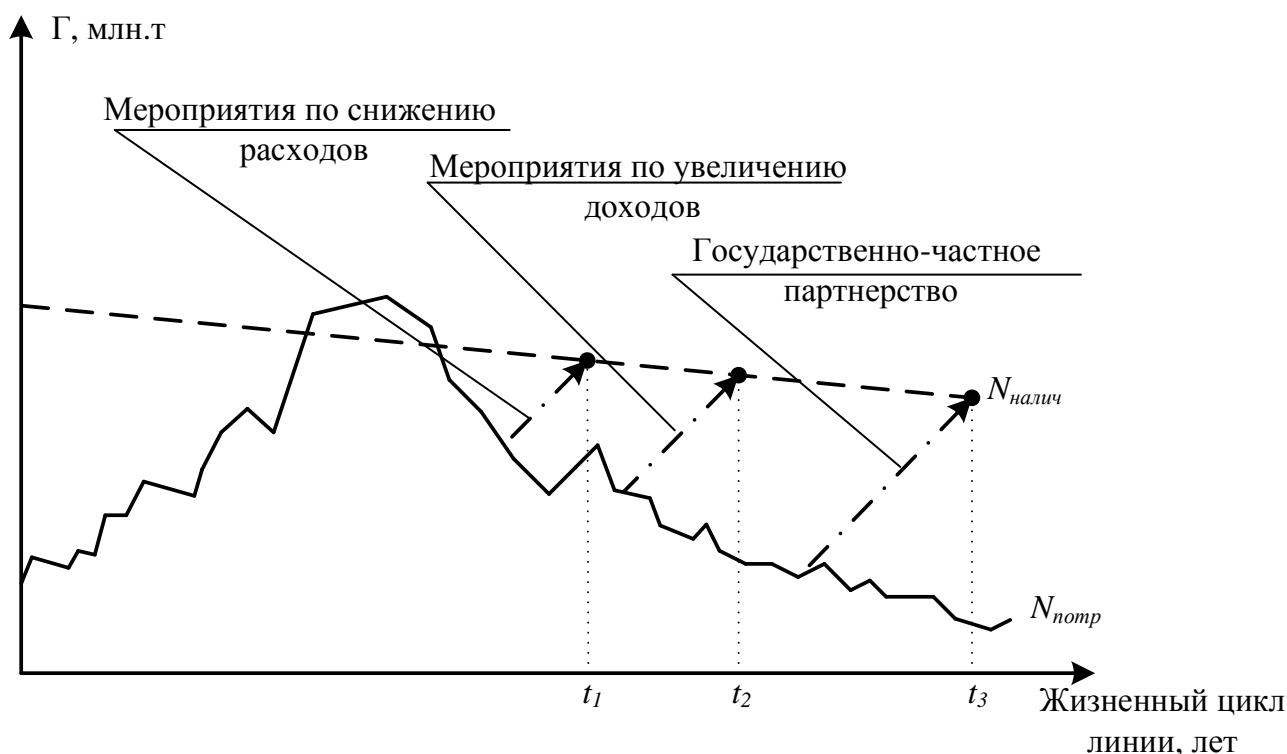


Рис. 2. Предлагаемый подход к соотношению потребной и наличной пропускных способностей на МИЛ

В этом случае разрабатывается ряд организационных мероприятий, направленных на снижение расходов, повышение доходов и государственно-частное партнёрство для улучшения рентабельности эксплуатации таких линий [9]. МИЛ являются элементом логистической транспортной системы, обеспечивая доступ к отдаленным районам и связывая их с более крупными транспортными узлами.

Для определения эффективности мероприятий по повышению эффективности эксплуатации МИЛ и принятия обоснованных управляющих решений необходима разработка инструмента контроля технических, технологических и экономических показателей с использованием оценки рисков для комплекса технических, технологических и экономических показателей.

Основная часть

Одним из ключевых аспектов повышения эффективности работы МИЛ является разработка и внедрение механизма контроля показателей, который системно, информационно и горизонтально интегрирован с механизмами смарт-диагностики [10] и планирования [11]. Предлагаемый механизм позволяет минимизировать потенциальные негативные последствия рисков и оптимизировать работу МИЛ по набору критериев за счет идентификации возможных рисков и их последствий при реализации мероприятий по повышению эффективности эксплуатации МИЛ.

Оценка рисков предоставляет возможность выявить и количественно оценить затруднения, связанные с различными аспектами работы железнодорожных линий, включая техническое состояние инфраструктуры, организацию перевозок и финансовую устойчивость. На основе этой информации разрабатываются корректирующие меры, направленные на снижение вероятности возникновения проблем и уменьшение их негативного воздействия. Процедура контроля показателей работы МИЛ представлена на рис. 3.

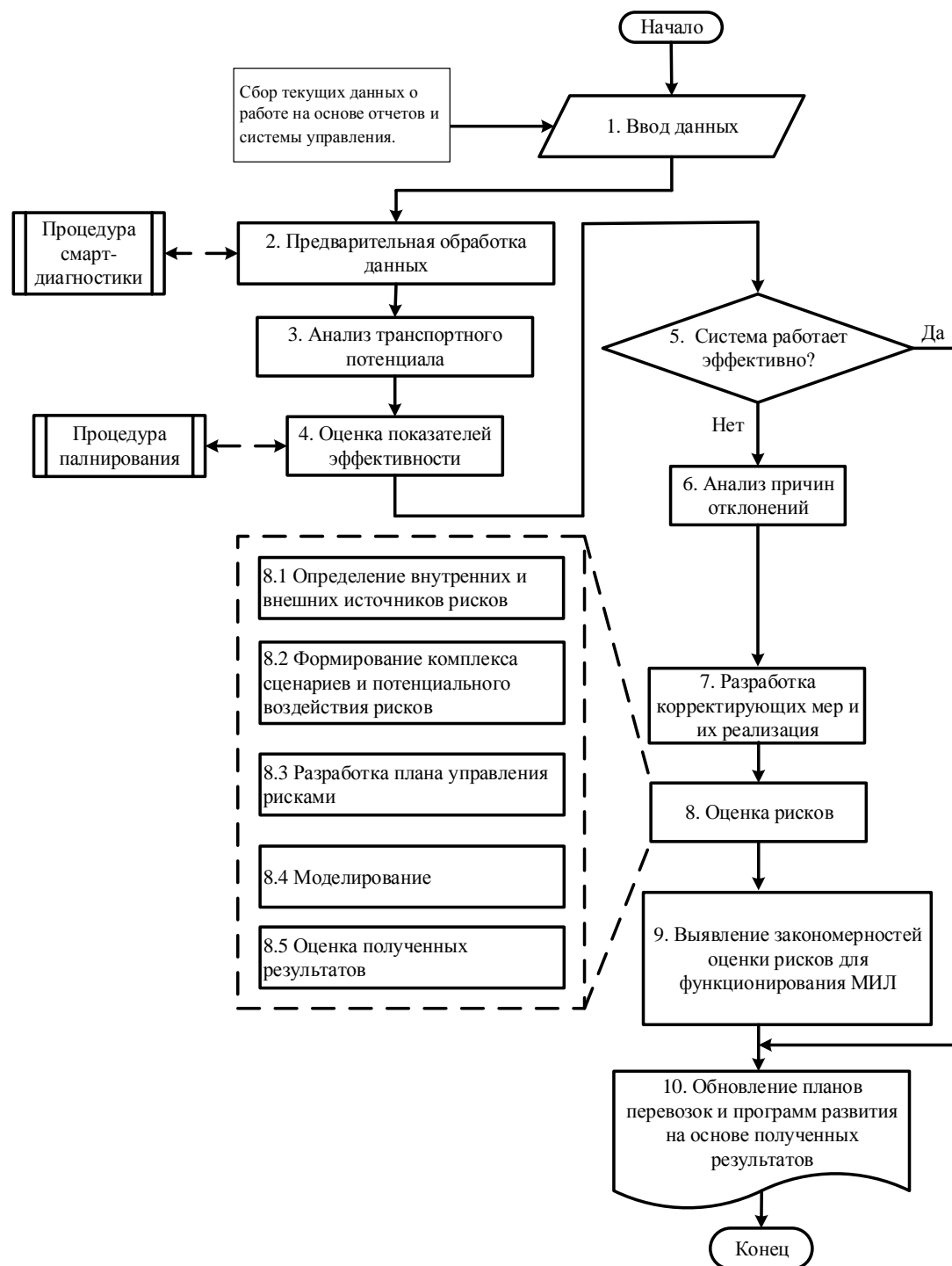


Рис. 3. Процедура контроля показателей работы МИЛ

Процедура контроля показателей работы МИЛ с использованием оценки рисков состоит из сбора данных о работе линий на основе отчетов выполнения показателей. Предварительной обработки данных на основе процедуры смарт-диагностики и анализа транспортного потенциала с использованием оценки текущих возможностей инфраструктуры. В случаях когда МИЛ работает неэффективно, принимается управляющее воздействие о необходимости корректирующих действий или изменении стратегии. Реализуется анализ причин отклонений, идентифицируются и классифицируются отклонения (технических, технологических и экономических показателей) и дается оценка выявленных отклонений.

После чего разрабатываются корректирующие меры, включающие оптимизацию организационных процессов и процедур, оценку ресурсов и временных затрат на реализацию корректирующих мер. При этом предлагается проводить оценку рисков (п. 8 рис. 3) корректирующих мероприятий с использованием следующей последовательности:

1 Определение внутренних и внешних источников рисков, включающих технические, технологические и экономические показатели.

2 Формирование комплекса вариантов эксплуатации и потенциального воздействия рисков и анализ чувствительности системы к различным видам рисков.

3 Разработка плана управления по минимизации негативного воздействия и возможности управления внешними и внутренними рисками.

4 Моделирование. Формирование плана модельных экспериментов и реализация их на модельном комплексе включая сбор и анализ данных по результатам экспериментов.

5 Оценка полученных результатов эксперимента. Корректировка плана управления рисками на основе полученных данных. Внесение изменений в программу управления рисками на МИЛ.

Затем формируются теоретические и практические выводы для оценки рисков показателей работы МИЛ, после чего выполняется корректировка планов перевозок с учетом выявленных рисков и возможностей развития МИЛ, а также пересмотр маршрутов для улучшения эффективности использования железнодорожной транспортной сети.

Постановка задачи оценки рисков эксплуатации МИЛ. Пусть имеется модель системы S , характеризующая работу железнодорожной линии

$$S = \{T, X, U, f, h\}, \quad (1)$$

где T – временной горизонт планирования;

$X(t)$ – вектор состояний системы на момент времени;

$U(t)$ – вектор управляющих воздействий на систему на момент времени t (технические, технологические и экономические мероприятия);

$f(X(t), U(t))$ – функция динамики состояний системы;

$h(X(t))$ – функция измерения показателей эффективности работы железнодорожной линии.

Целевые показатели эффективности работы МИЛ (Y) имеют вид:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}, \quad (2)$$

где y_1, y_2, \dots, y_n – целевые показатели работы линии (например, минимизация затрат, повышение безопасности, увеличение грузопотока).

Риски (R) представляют вероятности наступления неблагоприятных событий при изменении управляющих воздействий:

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}, \quad (3)$$

где r_1, r_2, \dots, r_m – риск нарушения целевого показателя работы линии.

Требуется разработать математическую модель оценки риска нарушения целевых показателей работы МИЛ при внедрении новых управляющих воздействий. При этом функция риска (Φ) для каждого целевого показателя имеет вид:

$$\Phi(y_i, U) = P(Y_i < y_i^*, U); \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где $P(Y_i < y_i^*, U)$ – вероятность того, что фактический показатель эффективности Y_i окажется ниже установленного порога y_i^* при заданном наборе управляющих воздействий U .

Модель системы имеет вид:

$$\begin{aligned} X(t+1) &= f(X(t), U(t)); \forall t \in T, \\ Y(t) &= h(X(t)); \forall t \in T. \end{aligned} \quad (5)$$

Требуется решить оптимизационную задачу минимизации рисков:

$$\min_U \sum_{i=1}^n w_i \Phi(y_i, U), \quad (6)$$

где w_i – весовые коэффициенты значимости показателей.

При накладываемом ограничении, по которому управляющее воздействие $U(t)$ должно находиться в допустимых пределах временного горизонта планирования,

$$U(t) \in U_d; \forall t \in T. \quad (7)$$

Таким образом, задача сводится к поиску набора управляющих воздействий, который минимизирует риски нарушения целевых показателей работы железнодорожной линии, учитывая ограничения на ресурсы и другие условия работы системы.

Модель оценки рисков изменения технических, технологических и экономических показателей МИЛ позволяет дать качественную оценку мероприятий по повышению эффективности работы. Отличие предлагаемой модели является учет временных аспектов жизненного цикла линии, сезонной неравномерности перевозок и корреляционных зависимостей между показателями.

Исходные данные представлены набором технических, технологических и экономических показателей МИЛ. Технические показатели $T(t) = \{T1(t), T2(t), \dots, Tn(t)\}$, к которым относятся:

1 Коэффициент надежности железнодорожной инфраструктуры:

$$k_n = \frac{t_{\sigma}}{t_o}, \quad (8)$$

где t_{σ} – время безотказной работы;

t_o – общее время эксплуатации.

Принимается в соответствии с нормативными документами для однопутных неэлектрифицированных линий 0,92.

2 Коэффициент использования тягового подвижного состава:

$$k_m = \frac{l_{\phi}}{l_n}, \quad (9)$$

где l_{ϕ} – фактический пробег тягового подвижного состава;

l_n – плановый пробег тягового подвижного состава.

3 Система СЦБ (принимается, для упрощения вычислений, при эксплуатации электрожелезной системы (ЭЖС) = 0,3; полуавтоматической блокировки (ПАБ) = 0,5; и автоматической блокировки (АБ) = 0,8).

4 Коэффициент использования линии

$$K_u = \frac{N_{нотр}}{N_{налич}}, \quad (10)$$

$N_{нотр}$ – потребная пропускная способность участка;

$N_{налич}$ – наличная пропускная способность участка.

Технологические показатели $G(t) = \{G1(t), G2(t), \dots, Gm(t)\}$, к которым относятся:

1 Количество грузовых поездов $N_{zp} \leq 16$;

2 Грузонапряженность (I), не более 5 млн т-км брутто/км;

3 Количество вагонов с грузовыми операциями n_{zp} , ваг/сут;

4 Общее количество отправляемых вагонов:

$$\sum N_{om} = \sum N_{\sigma n} + \sum N_{cn} + \sum N_m. \quad (11)$$

где $\sum N_{\sigma n}$ – количество вагонов без переработки;

$\sum N_{cn}$ – количество вагонов с переработкой;

$\sum N_m$ – количество местных вагонов.

Экономические показатели $E(t) = \{E1(t), E2(t), \dots, Ek(t)\}$, к которым относятся:

- 1 Расходы по службам инфраструктуры, движения и тяги, (P) млн руб.
- 2 Выручка за грузовые, пассажирские, пригородные перевозки (B), млн руб.
- 3 Эксплуатационные затраты на 1 км железной дороги:

$$\mathcal{E}_3 = \frac{\sum P}{L}, \quad (12)$$

L – протяженность линии.

- 4 Финансовый результат (Φ) млн руб./год:

$$\Phi = \frac{B}{P} \cdot 100\%. \quad (13)$$

Показатели $T(t)$, $G(t)$, $E(t)$ являются случайными величинами с заданными средними значениями и ковариационной матрицей, учитывающей корреляции между показателями.

Переменные в ковариационной матрице могут иметь положительные и отрицательные значения в зависимости от характера взаимосвязей между показателями на этапе диагностики с использованием нечетких когнитивных карт.

Сезонные колебания неравномерности транспортных потоков учитываются периодической функцией к средним значениям показателей в виде вектора в момент времени t , имеющим вид:

$$X(t) = \mu(t) + S(t) + \epsilon(t), \quad (14)$$

где $\mu(t)$ – вектор средних значений показателей;

$S(t)$ – сезонная неравномерность;

$\epsilon(t)$ – случайная ошибка с заданной ковариационной матрицей.

Оценка эффективности эксплуатации МИЛ реализуется на основе набора технических, технологических и экономических показателей, преобразованных с помощью нелинейной функции, имеющей вид:

$$F(t) = a \cdot \sum_{i=1}^n w_{Ti} \cdot T_i' + b \cdot \sum_{j=1}^m w_{Gj} \cdot G_j' + c \cdot \sum_{k=1}^k w_{Ek} \cdot E_k' + d \cdot \prod_{i,j,k} (T_i, G_j, E_k), \quad (15)$$

где T', G', E' – преобразованные значения технических, технологических и экономических показателей;

a, b, c, d – весовые значения элементов;

$\prod_{i,j,k} (T_i, G_j, E_k)$ – произведение значений преобразованных показателей для оценки полученного

результата.

Показатели T, G, E преобразуются с помощью нелинейной функции гиперболического тангенса в виде $T_i' = f_T(T_i), G_i' = f_G(G_i), E_i' = f_E(E_i)$.

Преимуществами использования функции гиперболического тангенса по сравнению с другими функциями является использование значения в диапазоне $[-1, 1]$, что позволяет эффективно обрабатывать данные, т. к. среднее значение активаций ближе к нулю, а также функции гиперболического тангенса имеют более крутой градиент ближе к 0, что позволяет учитывать небольшие изменения входных данных. Функция гиперболического тангенса сигмоидальной функции имеет вид

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (16)$$

где e – основание натурального логарифма

e^x – экспоненциальная функция, которая показывает, как быстро увеличивается функция по мере роста x ;

e^{-x} – экспоненциальная функция для отрицательного x , которая уменьшается по мере увеличения x ;

$e^x - e^{-x}$ – разница между значениями определяет амплитуду колебания функции.

Среднее значение преобразованных технических показателей T' есть среднее значение всех преобразованных показателей и отражает общее техническое состояние.

После определения набора показателей реализуется оценка рисков эффективности эксплуатации МИЛ по следующей последовательности:

1 Генерация вариантов показателей на основе заданных распределений и ковариационной матрицы методом Монте-Карло [12–15].

2 Расчет функции эффективности для каждого варианта.

3 Вычисление вероятности того, что значение функции эффективности опустится ниже заданного порога F_{min} .

$$R(t) = P(F(t) < F_{min}). \quad (17)$$

4 Реализуется байесовское обновление параметров на основе новых данных по мере их поступления.

5 Анализ результатов и принятие решений о целесообразности проводимых мероприятий.

Представленный набор показателей позволяет комплексно оценить риски показателей работы МИЛ при разработке мероприятий по повышению эффективности их эксплуатации.

Рассмотрим более подробно блок 8, включающий процедуру контроля эксплуатации МИЛ на основе оценки рисков (рис. 3). Определение внутренних и внешних источников рисков формируется по набору средних значений показателей X_n (выражений (8–15)) в виде матрицы (A):

$$(A) = \begin{pmatrix} 0,92 & 0,6 & 0,5 & 0,4 \\ 0,5 & 0,5 & 0,3 & 0,65 \\ 0,6 & 0,4 & 0,63 & -0,2 \end{pmatrix}$$

Средние значения показателей определены с использованием метода min–max нормализации в диапазоне значений $[-1, 1]$ с использованием формулы

$$X_n = 2 \cdot \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} - 1, \quad (18)$$

где X – исходное значение;

X_{max}, X_{min} – максимальное и минимальное значение в вариационном ряду.

Достоинством применяемого метода минимаксной нормализации является простота интерпретируемости результатов, сохранение структуры данных и учет взаимосвязей значений показателей.

Формирование комплекса вариантов появления рисков для МИЛ основан на анализе возможных технических, технологических и экономических рисков, их взаимосвязей и возможности возникновения комплексных кризисных ситуаций.

Технические риски возникают вследствие устаревания инфраструктуры, недостаточного уровня технического обслуживания, а также возможных отказов оборудования. Технологические риски возникают в связи с нарушением технологии эксплуатации МИЛ. Экономические риски зависят от тарифной политики, цен на ресурсы и изменение объемов перевозок.

Для комплексного подхода к разработке вариантов рассмотрены различные комбинации перечисленных рисков, их синергетическое взаимодействие и вероятность возникновения критических ситуаций. Рассмотрен следующий набор вариантов.

Вариант 1. Отрицательный экономический результат эксплуатации МИЛ. Вызванный низкими

размерами перевозок в пассажирском и грузовом сообщении, при этом затраты на содержание инфраструктуры превышают получаемый доход перевозочных видов деятельности. При этом порог эффективности составляет $[-0,2; -0,1]$.

Вариант 2. Нулевой экономический результат эксплуатации МИЛ. Вызванный незначительным увеличением размеров перевозок в пассажирском и грузовом сообщении, при этом затраты на содержание инфраструктуры равны получаемый доход перевозочных видов деятельности. При этом порог эффективности составляет 0.

Вариант 3. Положительный экономический результат эксплуатации МИЛ. Вызванный увеличением размеров перевозок в пассажирском и грузовом сообщении, при этом затраты на содержание инфраструктуры меньше получаемого дохода от перевозочных видов деятельности, эффективность МИЛ составляет $[0,1; 1]$.

После идентификации и формирования вариантов проведено моделирование оценки вероятности возникновения альтернатив, с использованием метода Монте-Карло для оценки вероятностного распределения рисков и их совокупного воздействия на показатели (таблица).

Оценка рисков с учетом временного горизонта

Временные периоды	Порог эффективности									
	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,100	0,89	1,00	1,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,010	0,61	1,00	1,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,020	0,35	0,99	1,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,29	0,97	1,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,41	0,98	1,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,020	0,70	1,00	1,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,100	0,95	1,00	1,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,100	1,00	1,00	1,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,470	1,00	1,00	1,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,790	1,00	1,00	1,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,740	1,00	1,00	1,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,370	0,97	1,00	1,00

На основании проведенной оценки формируются стратегии по минимизации воздействия рисков и обновляется план перевозок и программа развития на основе полученных результатов.

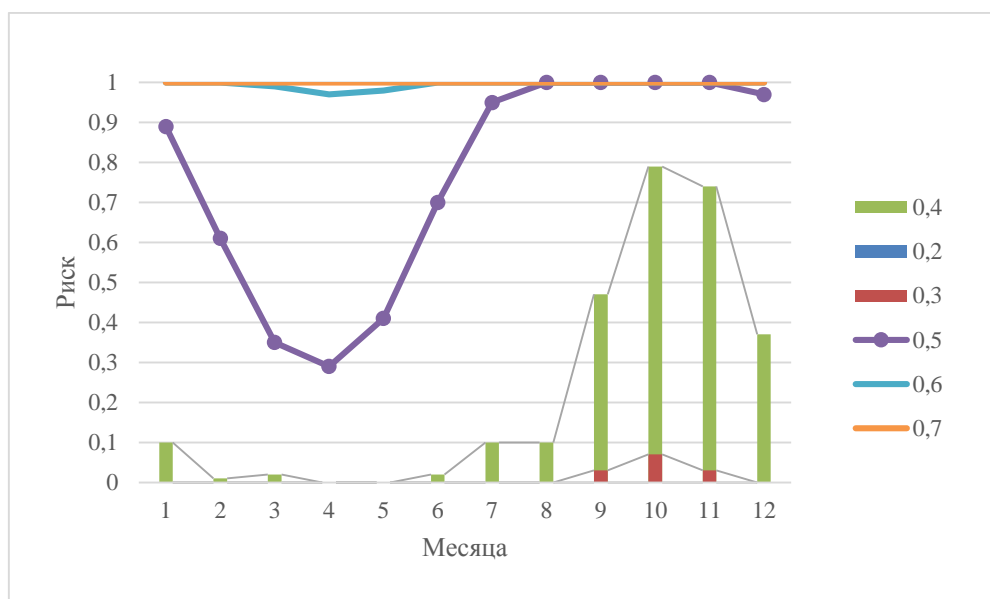


Рис. 4. Воздействие рисков на технические, технологические, и экономические показатели при заданных порогах эффективности линии

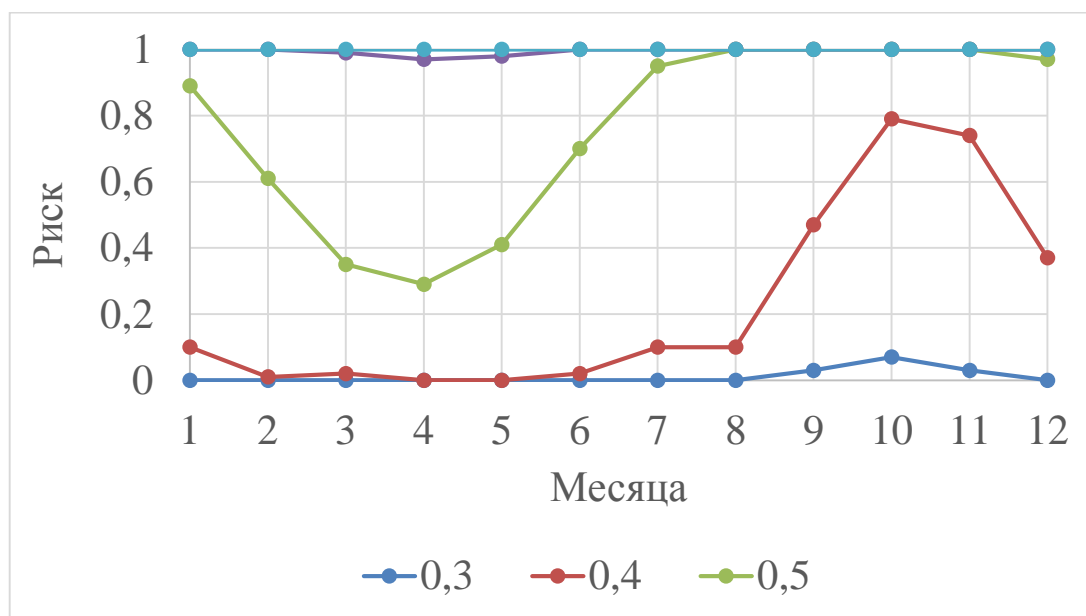


Рис. 5. Детализация рисков на технические технологические, и экономические показатели при положительной эффективности линии в диапазоне 0,3÷0,5

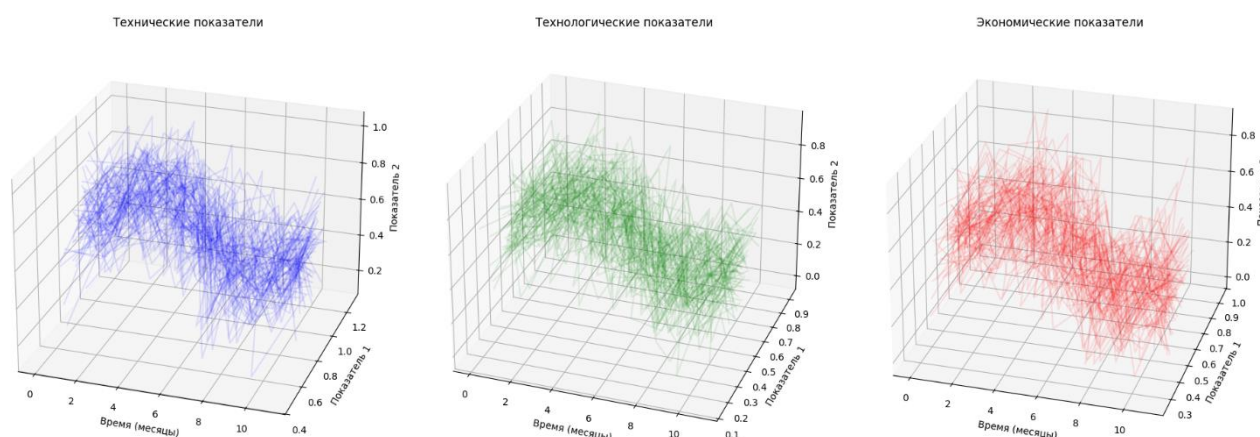


Рис. 6. Графики формирования вариантов оценки рисков от набора технических, технологических и экономических показателей

Как видно из таблицы и рис. 4–6, при эффективности эксплуатации МИЛ в диапазоне от $-0,2$ до $0,2$ риск невыполнения показателей отсутствует, что свидетельствует о возможности положительного финансового результата при существующей технологии работы и имеющемся грузопотоке. Рост риска невыполнения комплекса технических, технологических и экономических показателей наблюдается на пороге эффективности от $0,3$ до $0,6$. При эффективности работы более $0,6$ вероятность риска составляет 1 , что характеризует невозможность выполнения перечисленных показателей.

Выводы

В результате проведенного исследования установлен сложный характер учета рисков в логистических транспортных системах, функционирующих на базе МИЛ. Эти линии, в силу специфики своей эксплуатации и низких размеров перевозок, подвержены ряду специфических рисков, которые отсутствуют на большинстве линий других категорий, что связано с неправомерностью перевозок, ограниченными ресурсами на поддержание инфраструктуры.

В этом контексте предложенный интегрированный механизм контроля показателей работы позволяет обеспечить своевременное выявление и оценку рисков на ранних этапах их возникновения.

Преимуществом предложенного механизма является способность объединять набор технических, технологических и экономических показателей, что позволяет получить комплексное представление о состоянии МИЛ.

Интегрированный механизм контроля дает возможность адаптировать предлагаемые технические, технологические и экономические изменения в работе МИЛ, что обеспечивает гибкость и адаптивность эксплуатации таких линий. Применение предлагаемого механизма позволит оптимизировать использование ресурсов и улучшит экономический результат эксплуатации МИЛ.

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 The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management / Y. K. Chan, P. Gaffney, K. Neailey, W. H. Ip // The TQM Magazine. – 1998. – Vol. 10, No. 6. – P. 420–424. – DOI 10.1108/09544789810239146.

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. – DOI 10.1016/j.trc.2009.09.003.

6 Никитин, А. Б. Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малодеятельных 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, Vol. 402. – Springer, Cham. – DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_76.

8 Кириленко, О. Н. Экономическая эффективность методов эксплуатации малодеятельных линий / О. Н. Кириленко // Экономика железных дорог. – 2014. – № 8. – С. 79–85. – ISSN 1727-6500.

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 Putey 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 Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 240–251. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_240.

3 The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management / Y. K. Chan, P. Gaffney, K. Neailey, W. H. Ip // The TQM Magazine. – 1998. – Vol. 10, No. 6. – P. 420–424. – DOI 10.1108/09544789810239146.

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. – DOI 10.1016/j.trc.2009.09.003.

6 Nikitin, A. B. Possibility of introducing digital radio communication and organizing data transmission between stations on low-density 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 Kirilenko, O. N. Economic efficiency of methods of operating low-density lines / O. N. Kirilenko // Railway Economy. – 2014. – No. 8. – P. 79–85. – ISSN 1727-6500.

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 **Соболь, И. М.** Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболь ; Главная редакция физико-математической литературы. – Москва : Наука, 1973. – 313 с.

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 / Л. Д. Юнусова // Международный научный журнал. – 2020. – № 4. – С. 64–67. – DOI 10.34286/1995-4638-2020-73-4-64-67.

16 **IN 50324-1992.** Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system) [Тела твердые. Модельные испытания на трение и износ при трении скольжения] : международный (зарубежный) стандарт. ISO 17.040.20. Properties of surfaces [Свойства поверхностей]. Дата опубликования 01.07.1992. Язык оригинала : немецкий. – 6 с. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (дата обращения: 23.10.2024).

17 **ASTM G99-17.** Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (дата обращения: 23.10.2024).

9 **Vakulenko, S. P.** Low-traffic lines : status and optimization options / S. P. Vakulenko, A. V. Kolin, N. Yu. Ev reanova // 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 Computational 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 : Black-Scholes model and Monte Carlo method / L. D. Yunusova // International Scientific Journal. – 2020. – No. 4. – P. 64–67. – DOI 10.34286/1995-4638-2020-73-4-64-67.

16 **IN 50324-1992.** Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system) [Solid bodies. Model tests for friction and wear during sliding friction] : international (foreign) standard. ISO 17.040.20. Properties of surfaces. Publication date 01.07.1992. Original language : German. – 6 p. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (date of access: 10/23/2024).

17 **ASTM G99-17.** Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (date of access: 10/23/2024).

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

RISK ASSESSMENT IN THE OPERATION OF LOW-INTENSIVE RAILWAY LINES

Abstract. Risk assessment of low-intensity railway lines operation allows identifying and significantly reducing potential difficulties in line operation. The article proposes a risk assessment tool for measures to improve the efficiency of low-intensity lines operation, which includes a mechanism for monitoring line performance indicators. The proposed mechanism for monitoring indicators is based on a set of technical, technological and economic indicators, which are random variables with specified average values and a covariance matrix that takes into account correlations between indicators and seasonal unevenness. A set of options for operating low-intensity railway lines (LIL) has been developed, taking into account changes in indicators for selecting effective directions under specified initial conditions. The article presents the results of modeling the assessment of the probability of alternative options using the Monte Carlo method for the probabilistic distribution of risks and their combined impact on indicators. A quantitative and qualitative assessment of possible options for LIL operation is given when its financial result changes.

Keywords: transportation process management, low-intensity lines, required capacity, available capacity, rail transport, risk assessment.

For citation: Kovalev, K. E. Risk assessment in the operation of low-intensity railway lines / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 4. – P. 161–172. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_161.

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_kostia@mail.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_kostia@mail.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 Chair,
e-mail: novitchihin@bk.ru

С. М. Наурузбаев

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА НАПРАВЛЕНИЯХ КОРИДОРА «СЕВЕР – ЮГ»

Аннотация. Выполнена оценка оптимального использования пропускной способности альтернативных маршрутов следования, входящих в состав транспортного коридора «Север – Юг». Представлена блок-схема распределения грузопотока, принятия решений о развитии инфраструктуры и освоении грузопотока для эффективного управления транспортными потоками на направлении коридора «Север – Юг». Основным критерием принятия решений является пропускная способность, рассчитываемая по методике, применяемой в открытом акционерном обществе «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»), учитывающей дополнительные резервы пропускной способности. Для разгрузки основного направления коридора «Север – Юг» и формирования сети альтернативных маршрутов следования в транспортном коридоре для обеспечения гарантированных перевозок на случай форс-мажорных обстоятельств рассмотрена возможность распределения грузопотока по параллельным ходам, организации тяжеловесного движения, внедрения автоматической локомотивной сигнализации (АЛСО) с подвижными блок-участками, строительство двухпутной вставки и второго пути. Принимаются решения о необходимости ввода мероприятия по повышению пропускной способности и организации пропуска всех поездов по основному направлению коридора «Север – Юг». Данная методика предполагает ввод исходных данных. Сложность заключается в необходимости учитывать пропускные способности не одного маршрута, а совокупность нескольких параллельных маршрутов при решении данной задачи.

Ключевые слова: критерии, анализ, оценка, пропускная способность, транспортный коридор, блок-схема, распределение грузопотока, транспортные расходы.

Для цитирования: 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. – С. 173–183. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_173.

Введение

В настоящее время в соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года наблюдается реализация транзитного потенциала России на базе интеграции железнодорожного транспорта в международные транспортные системы и развития рынка логистических услуг. Выполнение основных логистических принципов, позволяющих привлечь дополнительные объемы грузопотока, невозможно без дальнейшего развития информационных систем.

Если раньше информационные системы носили справочный характер, то сейчас перед ними ставятся задачи выполнения информационно-управляющих функций, что относится к основным направлениям развития научных исследований в области железнодорожного транспорта.

Одной из таких функций является принятие решения по распределению грузопотока по параллельным маршрутам, зависящим от пропускных способностей рассматриваемых элементов транспортной инфраструктуры, наличие которых обязательно для выполнения требований, предъявляемых к транспортным коридорам.

Требуется разработать алгоритм проверки пропускных способностей и обосновать необходимость ввода мер для комплексного освоения грузопотока с учетом суммарных возможностей параллельных маршрутов, начиная с технологических решений при сохранении существующей инфраструктуры и заканчивая инфраструктурными изменениями.

Следует отметить, что в условиях постоянного роста и развития рыночных отношений эффективное управление логистикой является одним из основных источников формирования конкурентных преимуществ как для отдельных предприятий, так и для страны в целом.

Основная часть

Для эффективного использования мощностей транспортного коридора и минимизации затрат на развитие инфраструктуры необходимо сначала развивать технологию, которая включает в себя управление грузопотоками и планирование. Это обеспечит конкурентоспособность страны, поэтому важно изучение факторов, влияющих на экономику любого государства [1, 2].

На принципе эффективного использования всех видов имеющихся ресурсов и мощностей построена работа многих успешных отечественных компаний. При этом решение принимается с привлечением программного обеспечения. Например, ПАО «Сбербанк» и правительство Астраханской области обсудили вопросы внедрения технологий искусственного интеллекта (AI) в логистику, судоходство и работу портов для решения конкретных задач по развитию морской и портовой инфраструктуры, контролю движения грузов внутри порта, расчету товарного запаса на складе, прогнозированию уровня воды в Волго-Каспийском канале в процессе обучения и подготовки отраслевых специалистов. Здесь рассматривается морской транспорт, а транспортные коридоры также включают в себя и железнодорожный транспорт, имеющий свои особенности функционирования, которые должны быть учтены. Это указывает на необходимость дальнейшего развития решений в данном направлении, только уже для железнодорожного транспорта.

А. Т. Осьмининым была разработана концепция, направленная на минимизацию участия человека в принятии решения по распределению грузопотока, ставшая основой создания интеллектуальной системы, обеспечивающей планирование работы, моделирование, прогнозирование развития ситуации [3]. В работе [4] профессор А. Т. Осьминин рассматривал алгоритм определения возможности перевозки по альтернативному железнодорожному маршруту, в качестве критерия выбора использовались условия загрузки инфраструктуры, что предполагает учет пропускных способностей, а также минимальных расстояний для перевозки, чтобы максимально соблюсти интересы грузоотправителей в минимизации тарифов за перевозку, зависящих от расстояния. То есть известны разработки с привлечением параллельных маршрутов следования для освоения грузопотока с учетом всех имеющихся пропускных способностей. Однако данное программное обеспечение рассматривает пропускную способность участков как постоянную величину, и оценка возможностей ее повышения для эффективного освоения грузопотока не является задачей этой разработки. Кроме того, следует обязательно решить проблему обоснования для клиента необходимости перевозки груза непрямым путем и увеличения тарифа за перевозку.

Еще одним удачным отечественным опытом по повышению пропускных способностей припортовых дорог, загруженных экспортным грузопотоком, является создание логистических центров, которые играют важную роль в управлении транспортными потоками и дальнейшем повышении экономической эффективности функционирования транспортной системы страны, увеличении пропускной способности [5]. Однако их основная деятельность связана с распределением грузопотоков в оперативном порядке, когда груз уже в пути, и пропускная способность участков рассматривается как постоянное значение.

В отличие от этого в работе [6] исследования направлены на оптимизацию наличной пропускной способности с применением имитационного моделирования. На Белорусской железной дороге уже имеется опыт расчета наличной пропускной способности железнодорожных участков с помощью программы, которая позволяет ускорить расчет и оценивать варианты по изменению технической оснащенности участков. Но решение для сокращения затрат должно также включать в себя возможность применения технологических решений, которые в этой программе не учитываются.

На основе вышесказанного в рамках данного исследования предлагается разработка алгоритма выбора маршрутов следования в зависимости от пропускной способности параллельных маршрутов и принятия решений по ее повышению в первую очередь за счет технологических возможностей, а затем за счет технического оснащения. В качестве объекта исследования рассматривается направление коридора «Север – Юг», включающее в себя транскаспийскую ветвь и западную сухопутную ветвь через территорию Азербайджана. В качестве параллельных маршрутов предлагается рассмотреть направления, проходящие по территории Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД): Санкт-Петербург – Котельниково – Тихорецкая – Самур – Астара, Санкт-Петербург – порт Усть-Донецкий – порт Астара. При выборе параллельных маршрутов мы руководствовались возможностью обхода самого загруженного участка Приволжской железной дороги Верхний Баскунчак – Астрахань, где происходит слияние поездопотоков с нескольких направлений.

Данная методика предполагает ввод исходных данных (табл. 1) и оценку пропускной способности в соответствии с утвержденными методическими указаниями ОАО «РЖД». Выбор того или

иного мероприятия по повышению пропускной способности зависит от предстоящего объема перевозок и достигаемых технико-экономических показателей [7–10]. Методические подходы оценки потенциала грузопотоков транспортного коридора рассмотрены в исследованиях [11–13]. На основе этого разрабатывается порядок принятия решений, алгоритм которого представлен далее.

На первом этапе (рисунок) выполняется проверка достаточности существующей наличной пропускной способности и потребной пропускной способности. Для этого вводятся исходные данные (блок 1), перечень которых представлен в табл. 1. Далее устанавливается необходимое количество грузовых поездов, которое требуется для освоения ожидаемого грузопотока (блок 2). Чтобы оценить возможность его освоения, выполняется расчет наличной пропускной способности, который зависит от количества путей на перегоне, для чего вводится блок проверки условия (блок 3), и в зависимости от количества путей выполняется расчет по ветке «да» для однопутного участка (блоки 4–6) и по ветке «нет» для двухпутного участка (блоки 7 и 8). Полученные значения используются для установления потребной пропускной способности (блок 9). С помощью блока проверки условия (блок 10) выполняется проверка неперевышения потребной пропускной способности над наличной. При выполнении условия выдается рекомендация по организации пропуска поездов по основному направлению рассматриваемого коридора (блок 11) и алгоритм действий принятия решений ограничивается первым этапом. В случае невыполнения условий алгоритм действий переходит ко второму этапу, в котором выполняется оценка первого мероприятия по повышению пропускной способности, заключающегося в перераспределении грузопотоков на параллельные ходы (блок 12).

На втором этапе осуществляется проверка пропускных способностей параллельных маршрутов в аналогичном порядке (блоки 13–18), как для основного маршрута следования на первом этапе. Далее проверяется не просто условие неперевышения потребной пропускной способности над наличной, а устанавливается размер резерва на параллельном маршруте (блок 19), наличие которого позволит перенаправить часть поездопотока с основного направления. На основе этого делается перерасчет потребной пропускной способности на основном направлении (блок 20). После этого выполняется проверка условия неперевышения скорректированной потребной пропускной способности основного направления над наличной пропускной способностью (блок 21) и делаются выводы либо о завершении поиска решения повышения пропускных способностей (блок 22), либо о необходимости внедрения новых мероприятий.

В качестве второго по очередности мероприятия по повышению пропускной способности рассматривается организация тяжеловесного движения (блок 23). Сначала устанавливается суммарное возможное количество грузовых поездов (блок 24). Проверяется условие возможности освоения всего груза, если все поезда будут тяжеловесными (блок 25). При выполнении этого условия (блок 26) определяется необходимое количество тяжеловесных поездов и принимается решение об организации движения рассчитанного количества тяжеловесных поездов и поездов нормативного веса на основном направлении коридора «Север – Юг» (блок 27). В противном случае необходимо рассмотреть возможность внедрения системы АЛСО (блок 28). Сначала определяется наличная пропускная способность после внедрения АЛСО (блок 29) и устанавливается суммарное возможное количество грузовых поездов (блок 30). Выполняется проверка условия неперевышения наличной пропускной способности над суммарным возможным количеством грузовых поездов (блок 31), при выполнении которого необходимо реализовать внедрение АЛСО и организовать движение поездов нормативного веса (блок 32). При невыполнении данного условия проверяется возможность освоения грузопотоков только тяжеловесными поездами (блок 33). Если ими будет освоен полностью весь грузопоток, то определяется количество таких тяжеловесных поездов (блок 34), вследствие этого реализуется мероприятие АЛСО вместе с тяжеловесным движением (блок 35). Иначе определяется количество путей на участке (блок 36): если участок однопутный, то вводится мероприятие по строительству двухпутной вставки (блок 37), в противном случае проводится дальнейшее увеличение веса поезда (блок 38). Выполняется расчет наличной пропускной способности двухпутного участка (блок 39) и дальше выполняется проверка условия неперевышения наличной пропускной способности над потребной (блок 40). При выполнении условия принимается решение о строительстве двухпутной вставки (блок 41), в противном случае необходимо рассмотреть возможность строительства второго пути (блок 42).

Таблица 1

Исходные данные

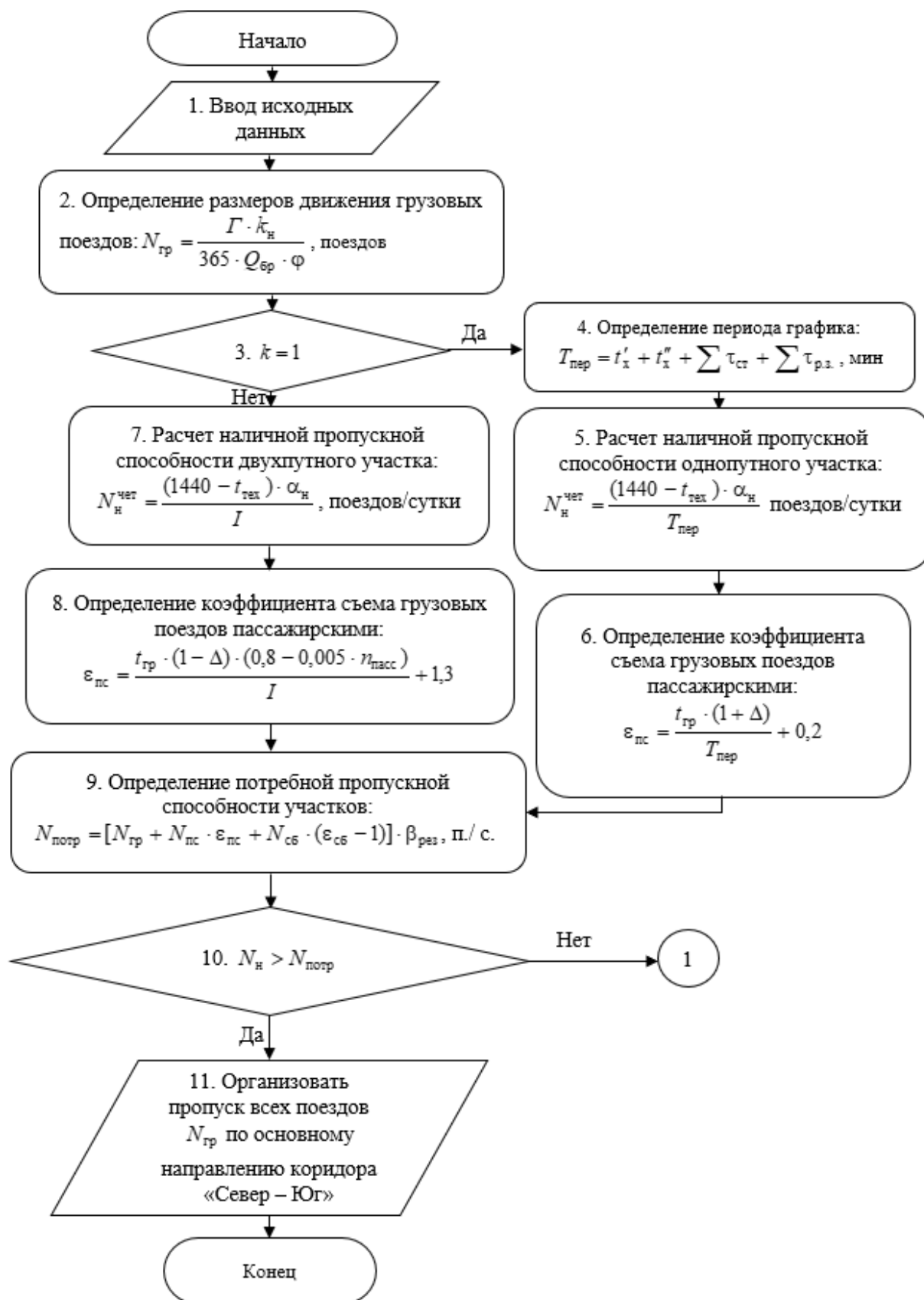
Обозначение	Наименование параметров, используемых в формулах
Γ	Грузооборот, т
k_n	Коэффициент неравномерности перевозок
$Q_{бр}$	Норма веса состава поезда с учетом грузов, т
φ	Отношение массы составов без грузов к массе состава с грузом
k	Количество путей
t'_x, t''_x	Время движения между раздельными пунктами четных и нечетных поездов, мин
$\tau_{ст}$	Расчетные интервалы времени, обеспечивающие безопасность движения, мин
$\sum \tau_{р.з.}$	Время разгонов и замедлений на участке, мин
$t_{тех}$	Продолжительность времени технологических «окон», мин
α_n	Коэффициент надежности работы технических средств
I	Расчетный интервал времени между поездами попутного направления, мин
$t_{гр}$	Время движения грузового поезда по ограничивающему перегону, мин
Δ	Соотношение суммарного времени хода пассажирских поездов к суммарному времени хода грузовых поездов
$n_{пасс}$	Общее количество пассажирских поездов на участке
$N_{гр}, N_{пс}, N_{сб}$	Число грузовых, пассажирских и сборных поездов
$\beta_{рез}$	Резерв пропускной способности участка
$\Gamma_{сут}$	Суточный грузопоток, который необходимо освоить
B_T, B_n	Принятый вес тяжеловесного поезда и нормативный вес поезда, млн т
n_n, n_T	Количество поездов нормативного веса и тяжеловесных поездов

Предложенный алгоритм позволяет автоматизировать принятие решения по повышению пропускной способности с учетом всех имеющихся технических возможностей, включая параллельные маршруты.

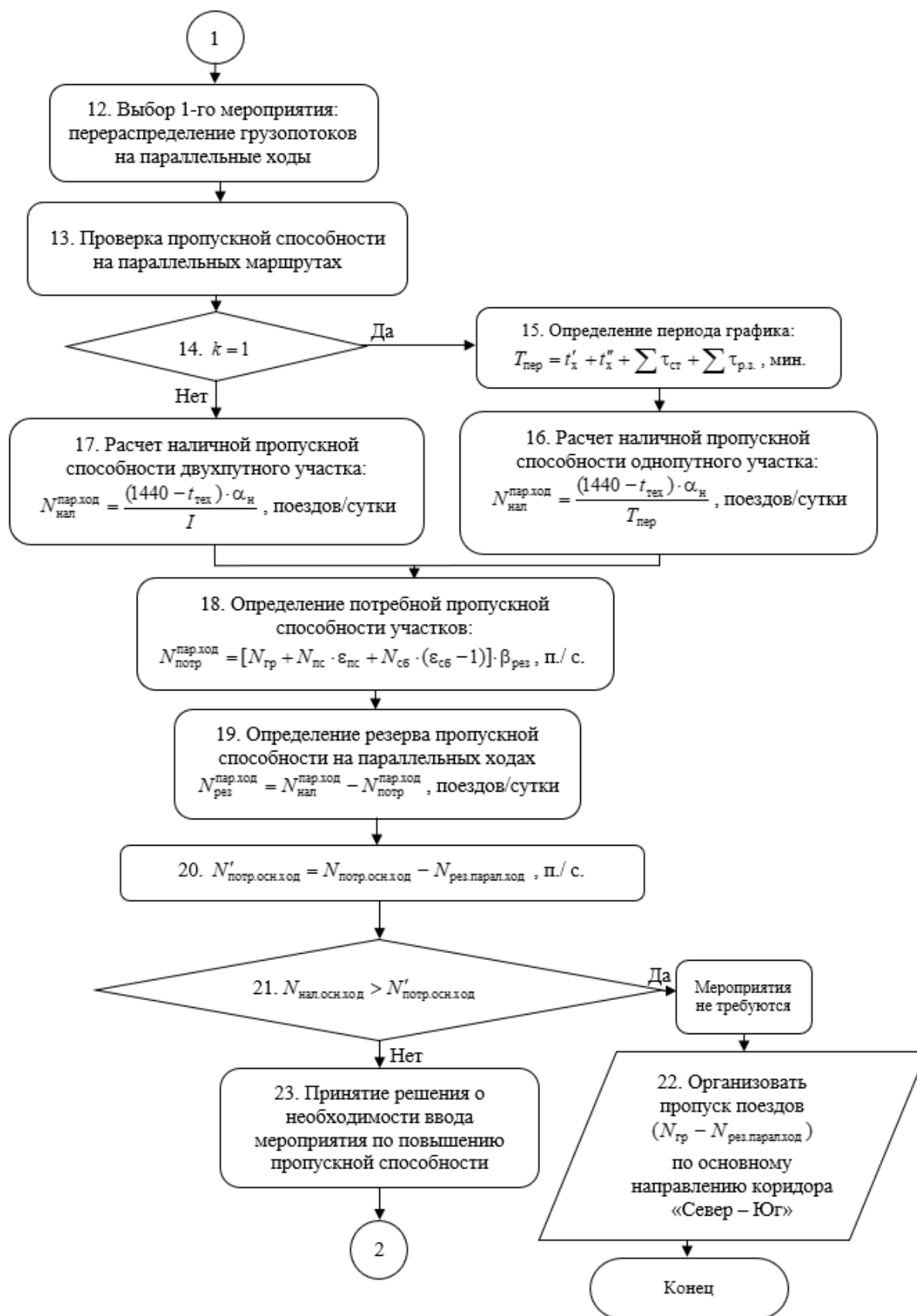
Как уже было сказано ранее, проблемой при реализации предлагаемого алгоритма является возможность отказа клиентов перевозить груз по параллельным ходам в связи с увеличением железнодорожного тарифа из-за удлинения маршрута. Однако необходимо учитывать, что перевозка груза по транспортным коридорам предполагает взаимодействие с другими видами транспорта и, следовательно, возникновение дополнительных затрат при переходе с одного вида транспорта на другой. Несмотря на то, что в рамках коридора «Север – Юг» самым коротким является основной маршрут – транскаспийский, здесь присутствует двойная перевалка, в связи с чем суммарные транспортные расходы могут стать аргументом того, что более длинный маршрут будет более привлекательным. Маршруты с повторной перевалкой могут быть конкурентоспособными при перевозке высокотарифных грузов, к которым относятся минеральные удобрения. Именно для этого груза с целью оценки суммарных транспортных расходов и обоснования привлекательности параллельных маршрутов были выполнены расчеты.

Расчет платы за перевозку грузов в хопперах был выполнен по следующим тарифным схемам Прейскуранта 10-01 (раздел 2): И₃, И₂, В₈, В₅.

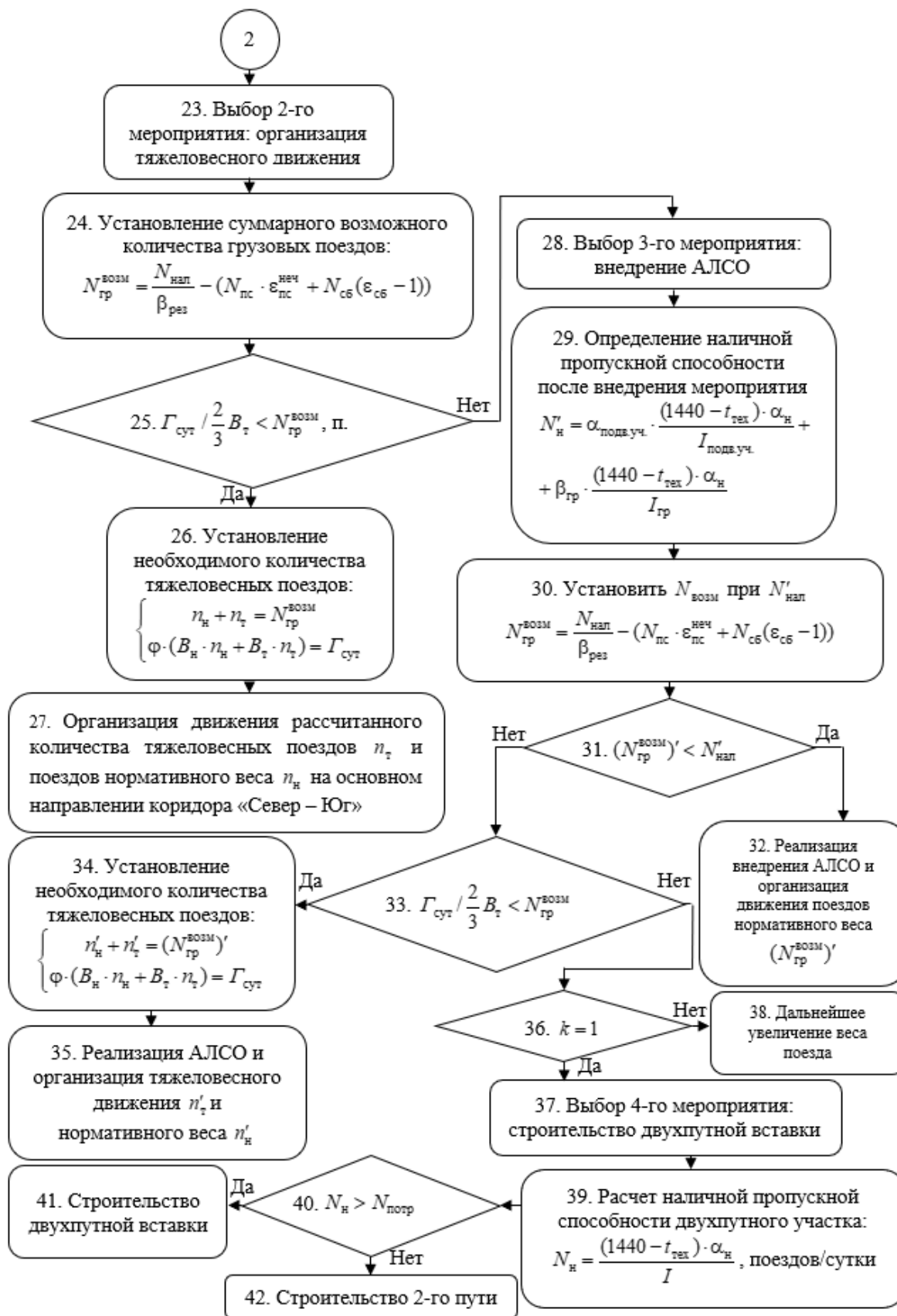
Результаты расчета железнодорожного и морского тарифа представлены в табл. 2, 3.



Блок-схема распределения грузопотока и принятия решений о его освоении (начало)



Блок-схема распределения грузопотока и принятия решений о его освоении
(продолжение)



Блок-схема распределения грузопотока и принятия решений о его освоении (окончание)

Таблица 2

**Результаты расчета железнодорожных провозных платежей
за перевозку минерального удобрения хоппером
на участке Санкт-Петербург-Сорт. Московский – Астара (эксп.)**

Маршруты транспортного коридора «Север – Юг»	Транскаспийский маршрут	Западный маршрут	Альтернативный маршрут через СКЖД	Параллельный маршрут с привлечением внутренних водных путей
Основные узлы маршрута	Санкт-Петербург – Волгоград-Астрахань – порт Оля	Санкт-Петербург – Волгоград – Астрахань – Олейниково – Самур – Астара	Санкт-Петербург – Котельниково – Тихорецкая – Самур – Астара	Санкт-Петербург – порт Усть-Донецкий
Станция отправления	Санкт-Петербург-Сорт. (030006)	Санкт-Петербург-Сорт. (030006)	Санкт-Петербург-Сорт. (030006)	Санкт-Петербург-Сорт. (030006)
Станция назначения	Порт Оля (614403)	Астара (эксп.) (554503)	Астара (эксп.) (554503)	Порт Усть-Донецкий (512604)
Тарифное расстояние	2357 км	3340 км	3445 км	1856 км
Срок доставки	9 сут	11 сут	11 сут	8 сут
Тип вагона	Хоппер	Хоппер	Хоппер	Хоппер
Загрузка/норма	70 т	70 т	70 т	70 т
Количество вагонов	1	1	1	1
Количество осей	4	4	4	4
Собственник вагона	Собственный	Собственный	Собственный	Собственный
Тариф за вагон	28812	38493	39579	24059

Таблица 3

Результаты расчетов морского тарифа за перевозку минерального удобрения по маршрутам порт Оля – порт Астара и порт Усть-Донецкий – порт Астара

Направление	Порт Оля – порт Астара	Порт Усть-Донецкий – порт Астара
Ходовое время T_x , сут	1,2	6,6
Стояночное время судна $T_{ст}$, сут	3,49	3,02
Расходы на топливо для работы главного двигателя $R_{гл}$, руб.	364800	2006400
Расходы на топливо для работы вспомогательных механизмов $R_{всп}$, руб.	105056	215488
Расходы на топливо $R_{топл}$, руб.	469856	2221888
Расходы в порту $R_{порт}$, руб.	417088	198912
Расходы судовладельца в рейсе R , руб.	886944	2420800
Ставка фрахта за 1 т груза f , руб.	335	1117

На основе данных табл. 2, 3 рассчитаны суммарные транспортные расходы по каждому параллельному маршруту, который предлагается включить в коридор «Север – Юг» (табл. 4).

Таблица 4

Результаты расчета тарифа по четырем маршрутам за перевозку минерального удобрения

Маршрут	1-й вариант		2-й вариант	3-й вариант	4-й вариант	
	Санкт-Петербург – Волгоград – Астрахань – Порт Оля (железнодорожный транспорт)	Порт Оля – порт Астара (морской транспорт)	Санкт-Петербург – Волгоград – Астрахань – Олейниково – Самур – Астара (железнодорожный транспорт)	Санкт-Петербург – Котельниково – Тихорецкая – Самур – Астара (железнодорожный транспорт)	Санкт-Петербург – Усть-Донецкая (железнодорожный транспорт)	Порт Усть-Донецкий – порт Астара (морской транспорт)
Повагонная отправка						
Расстояние, км	2357	253	3340	3445	1856	1373
Срок доставки, сут	9	5	11	11	8	10
Тариф за 1 вагон, руб.	42984	23450	56865	58423	35258	78190
Тариф за перевалку, ваг.	135240		–	–	135240	
Всего, за 1 вагон	201674 руб.		56865 руб.	58423 руб.	248688 руб.	

Анализ полученных результатов указывает на преимущества западного маршрута коридора «Север – Юг» по критериям «транспортные расходы» и «сроки доставки».

Выводы

Был разработан алгоритм распределения грузопотока, принятия решений о развитии инфраструктуры и освоении грузопотока для эффективного управления транспортными потоками на направлении коридора «Север – Юг».

Благодаря созданию информационно-управляющих систем решится вопрос об оптимальном распределении грузопотока. Управление железнодорожным движением требует своевременного и точного пересмотра маршрутов с учетом пропускных способностей инфраструктуры.

Масштаб задачи – охват транспортной инфраструктуры России со значительной прогнозируемой загрузкой в границах зарождения и погашения грузопотока. Задачи являются комплексными, так как включают в себя все составляющие элементы транспортного коридора, в том числе информационно-управляющие системы планирования, системы организации перевозок, транспортные узлы и регионы.

Список литературы

- 1 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.
- 2 Mathematical modelling of the railway station's technological parameters in transport corridor system of export traffic increasing volumes / E. V. Ryzanova, E. A. Chebotareva, S. M. Nauruzbaev, I. V. Merkulov // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 431. – P. 13. – DOI 10.1051/e3sconf/202343108014.

References

- 1 Nauruzbaev, S. M. Mathematical modeling of the production processes of the station in the conditions of the predicted growth of freight 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.
- 2 Mathematical modelling of the railway station's technological parameters in transport corridor system of export traffic increasing volumes / E. V. Ryzanova, E. A. Chebotareva, S. M. Nauruzbaev, I. V. Merkulov // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 431. – P. 13. – DOI 10.1051/e3sconf/202343108014.

3 Алгоритмы подбора альтернативных маршрутов // РЖД-Партнер : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page27915416.html?ysclid=lt9ol5bx1145313814> (дата обращения: 31.07.2024).

4 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.

5 Апатцев, В. И. Международный опыт организации работы логистических центров / В. И. Апатцев, А. С. Мельников // Современные методы и принципы управления перевозочным процессом на транспорте. – 2023. – С. 19–26. – ISBN 978-5-7473-1178-7.

6 Марченко, М. А. Разработка автоматизированного алгоритма для расчета пропускной способности железнодорожной линии / М. А. Марченко, О. Д. Покровская, В. В. Щербаков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19. – № 4. – С. 876–888. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-876-888.

7 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.

8 Перспективы исследований транспортно-технологических параметров узловых пунктов концентрации и распределения припортовых вагонопотоков / В. М. Задорожний, О. Н. Числов, М. В. Колесников [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1. – С. 72–81. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_72.

9 Числов, О. Н. Вариант оценки этапности развития припортовых станций на направлениях южнороссийских транспортных коридоров / О. Н. Числов, Д. С. Безусов, С. Г. Заяц // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2. – С. 153–163. – ISSN 1818-5509.

10 Числов, О. Н. Методы выбора и оценки технико-технологических параметров припортовых грузовых станций / О. Н. Числов, Д. С. Безусов // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Транспорт-2019». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – Т. 1 : Технические науки. – С. 76–80.

11 Верескун, В. Д. Оценка перспектив роста грузооборота международного транспортного

3 Algorithms for selecting alternative routes // Russian Railways-Partner : official website. – 2023. – URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page27915416.html?ysclid=lt9ol5bx1145313814> (date of access: 07/31/2024).

4 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.

5 Apatsev, V. I. International experience in organizing the work of logistics centers / V. I. Apatsev, A. S. Melnikov // Modern methods and principles of transportation process management in transport. – 2023. – P. 19–26. – ISBN 978-5-7473-1178-7.

6 Marchenko, M. A. Development of an automated algorithm for calculating the capacity of a railway line / M. A. Marchenko, O. D. Pokrovskaya, V. V. Shcherbakov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2022. – Vol. 19. – No. 4. – P. 876–888. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-876-888.

7 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.

8 Prospects for research of transport and technological parameters of nodal points of concentration and distribution of port car flows / V. M. Zadorozhniy, O. N. Chislov, M. V. Kolesnikov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1. – P. 72–81. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_72.

9 Chislov, O. N. Option for assessing the stages of development of port stations on the directions of southern Russian transport corridors / O. N. Chislov, D. S. Bezusov, S. G. Zayats // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2014. – No. 2. – P. 153–163. – ISSN 1818-5509.

10 Chislov, O. N. Methods for selecting and evaluating technical and technological parameters of port freight stations / O. N. Chislov, D. S. Bezusov // Transport : science, education, production: collection of scientific papers of the international scientific and practical conference "Transport-2019". – Rostov-on-Don : RGUPS, 2019. – Vol. 1. : Technical sciences. – P. 76–80.

11 Vereskun, V. D. Assessment of the prospects for growth of freight turnover of the international

коридора «Север – Юг» в современных условиях / В. Д. Верескун, Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 45–56. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_45.

12 **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. – С. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

13 **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.

transport corridor "North – South" in modern conditions / V. D. Vereskun, E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 45–56. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_45.

12 **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 Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4. – P. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

13 **Mamaev, E. A.** On assessing the development potential of the international transport corridor "North – South" / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // Izvestia Transsiba (Journal of Transsib railway studies). – 2020. – No. 3 (43). – P. 86 – 96. – ISSN 2220-4245.

S. M. Nauruzbaev

TO THE QUESTION OF OPTIMIZING DECISION-MAKING ON ORGANIZING THE PROMOTION OF TRANSPORT FLOWS IN THE DIRECTIONS OF THE “NORTH – SOUTH” CORRIDOR

Abstract. The article provides an assessment of the optimal use of the capacity of alternative routes within the “North-South” transport corridor. It presents a flow chart of freight flow distribution, decision-making on infrastructure development and freight flow development for efficient management of transport flows in the “North-South” corridor direction. The main criterion for decision-making is the capacity calculated using the methodology used by “Russian Railways” (JSC RZD), which takes into account additional reserves of capacity. In order to relieve the main direction of the North-South corridor and form a network of alternative routes within the transport corridor to ensure guaranteed transportation in case of force majeure, the possibility of distributing freight traffic along parallel routes, organizing heavy-haul traffic, introducing automatic locomotive signaling (ALSO) with movable block sections, building a double-track insert and a second track is considered. Decisions are made on the need to introduce measures to increase throughput and to organize the passage of all trains along the main direction of the North-South corridor. This methodology assumes the input of initial data. The difficulty lies in the need to consider the throughput of not one route, but a set of several parallel routes when solving this problem.

Keywords: criteria, analysis, assessment, capacity, transport corridor, flow chart, distribution of freight flow, transport costs.

For citation: Nauruzbaev, S. M. To the question of optimizing decision-making on organizing the promotion of transport flows in the directions of the “North – South” corridor / S. M. Nauruzbaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 173–183. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_173.

Сведения об авторах

Наурузбаев Сабир Мансурович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
аспирант,
e-mail: sabir.nauruzbayev@mail.ru

Information about the authors

Nauruzbaev Sabir Mansurovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of Operational Work»,
Postgraduate Student,
e-mail: sabir.nauruzbayev@mail.ru

Е. А. Середов

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕВОЗОК ПАССАЖИРОВ С ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ ДЛЯ ЛИЧНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Аннотация. Рассмотрено исследование перевозок пассажиров с транспортными средствами для личного пользования железнодорожным транспортом. Отличительная черта таких перевозок заключается в том, что транспортные средства для личного пользования не могут быть загружены в вагоны с платформ, предназначенных для посадки и высадки пассажиров. Погрузка таких транспортных средств в железнодорожный подвижной состав должна осуществляться на станциях, оборудованных специальными погрузочными устройствами и расположенных в близости от автомобильных дорог и вокзального комплекса. Создание подходящих условий для совершенствования перевозок пассажиров с транспортными средствами для личного пользования железнодорожным транспортом повлечет за собой привлечение дополнительного пассажиропотока на железнодорожный транспорт. Такие перевозки особенно будут удобны для тех пассажиров, кто предпочитает исследовать новые места и не зависеть от общественного транспорта на удаленном расстоянии от мест постоянного пребывания. В работе представлены схемы погрузки и разгрузки вагонов через боковую, а также торцовую ramпы на попутных станциях при движении транспортных средств для личного пользования передним ходом.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, транспортные средства, способы погрузки транспортных средств, схема станции, схемы погрузки и разгрузки вагонов.

Для цитирования: Середов, Е. А. Особенности перевозок пассажиров с транспортными средствами для личного пользования железнодорожным транспортом / Е. А. Середов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 184–191. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_184.

Введение

Железнодорожный транспорт играет ключевую роль в перевозке пассажиров и грузов, обеспечивая главным образом связь между регионами страны. С развитием новых технологий [1] и ростом спроса на мобильность железнодорожный транспорт сталкивается с необходимостью адаптироваться к меняющимся потребностям населения. Наблюдаемая растущая популярность автотуризма (рис. 1) оказала влияние на создание услуг по перевозке железнодорожным транспортом пассажиров с транспортными средствами личного пользования в специальных вагонах, которые входят в составы пассажирских поездов. В 2023 году количество перевезенных транспортных средств в вагонах, входящих в составы пассажирских поездов, составило 4,4 тысячи единиц [2].

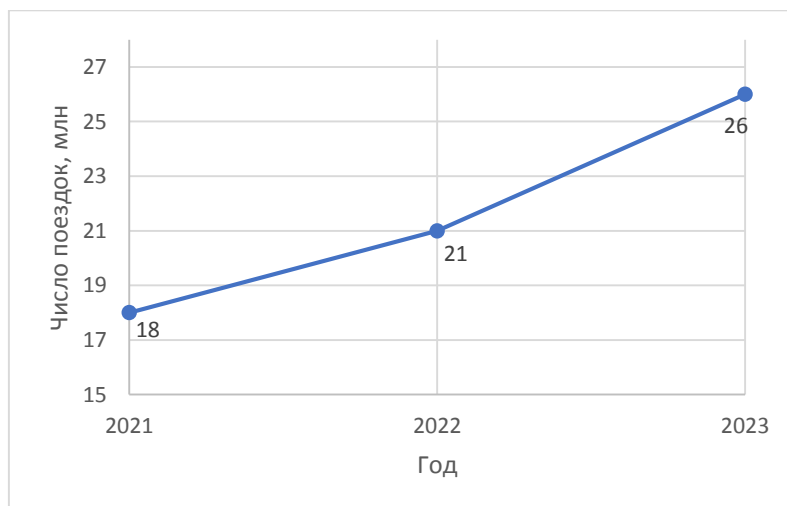


Рис. 1. Динамика туристических поездок на автомобилях [3]

Особенности перевозок пассажиров с транспортными средствами для личного пользования в вагонах, входящих в составы пассажирских поездов

Перевозки пассажиров с транспортными средствами для личного пользования (далее – транспортное средство) в пассажирских поездах – это уникальная услуга, оказание которой требует особого подхода к организации транспортно-логистического процесса. Для удобства пассажиров оформление необходимых перевозочных документов и прием транспортных средств для перевозок должны осуществляться заблаговременно до отправления поезда. Погрузка транспортных средств в железнодорожный подвижной состав должна осуществляться на станциях [4], оборудованных специальными погрузочными устройствами и расположенных в близости от автомобильных дорог и вокзального комплекса. Примером такой станции является Санкт-Петербург-Главный. Прием транспортных средств и оформление перевозочных документов на этой станции выполняется непосредственно вблизи места погрузки транспортных средств, которое находится в шаговой доступности от Московского железнодорожного вокзала.

На рис. 2 представлена схема путевого развития станции сквозного типа для выполнения операций по погрузке и разгрузке вагонов, используемых для перевозки транспортных средств. Маневровая работа, связанная с расстановкой, сборкой и перестановкой вагонов, может выполняться как поездным, так и маневровым локомотивом. На 4-й путь поезда принимаются для отцепки и прицепки вагонов с транспортными средствами, посадки и высадки пассажиров. Путь 6 специализирован для выполнения операций по погрузке и разгрузке вагонов транспортными средствами через боковую рампу, а путь 7 – через боковую и торцевую рампы. Площадка стоянки транспортных средств должна быть оборудована необходимой инфраструктурой и обеспечивать необходимое количество мест для возможности отстоя и хранения транспортных средств, удовлетворяя спрос всех потенциальных пользователей.

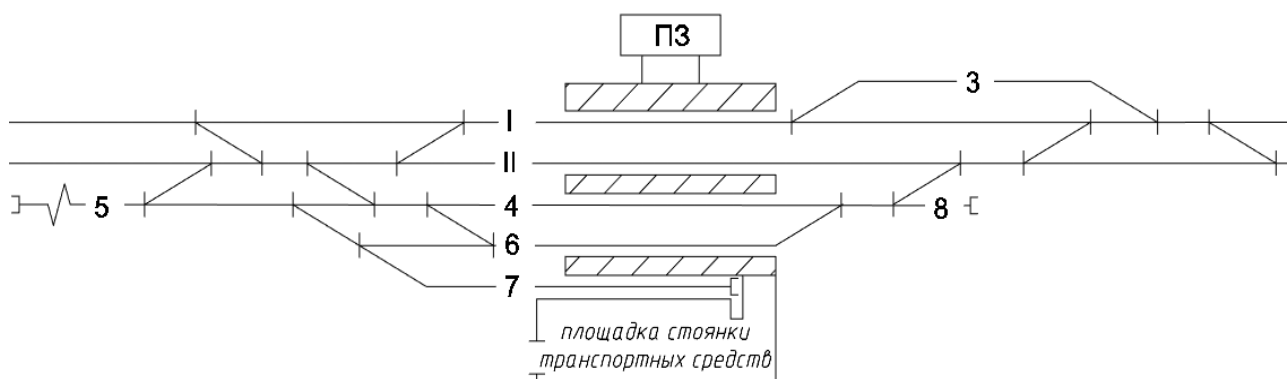


Рис. 2. Схема путевого развития станции сквозного типа для выполнения операций по погрузке и разгрузке вагонов, используемых для перевозки транспортных средств

В один вагон предусматривается погрузка транспортных средств, следующих на общую станцию назначения, при этом в поезд могут быть включены вагоны не более чем с трех-четырех станций погрузки транспортных средств во избежание длительных стоянок поезда для прицепки и отцепки вагонов [5] на попутных станциях. При погрузке транспортных средств в подвижной состав необходимо учитывать их габаритные размеры и особенности конструкции для обеспечения безопасности и эффективности перевозки. Также важно обеспечить надежное закрепление транспортных средств в подвижном составе, чтобы избежать их смещения или повреждения во время транспортировки. В один вагон могут быть погружены автомобили (до пяти единиц при одноярусной погрузке и до десяти единиц – при двухъярусной) и мотоциклы (по две единицы на каждое машиноместо). При двухъярусной загрузке транспортные средства сперва размещают и закрепляют на верхнем ярусе, а затем на нижнем. Масса каждого транспортного средства при загрузке второго яруса не должна превышать 1650 килограмм, а ширина колеи должна быть не более 1200 миллиметров [6]. При этом расстояние между соседними транспортными средствами в вагоне должно быть не менее 50 миллиметров [6]. Погрузка транспортных средств в вагоны может выполняться с боковой или торцевой рампы.

Продолжительность погрузки и выгрузки транспортных средств должна соответствовать технологическим нормам (не более 0,25 часа на один вагон [7]).

Технологический график обработки пассажирских поездов без смены локомотива, с отцепкой вагонов с транспортными средствами на попутной станции и перестановкой их на соседний путь представлен в табл. 1. Общая продолжительность операций в этом случае составляет 39 минут.

Технологический график обработки пассажирских поездов без смены локомотива, с отцепкой вагонов с транспортными средствами на попутной станции и перестановкой их на соседний путь при использовании маневрового локомотива представлен в табл. 2. Общая продолжительность операций в этом случае составляет 24 минуты.

Таблица 1

**Технологический график обработки пассажирских поездов без смены локомотива
с отцепкой вагонов с транспортными средствами на попутной станции
и перестановкой их на соседний путь**

№ п/п	Операция	Время в минутах				Исполнитель	
		на операцию	10	20	30		40
1	Прибытие	1					ДСП, локомотивная бригада
2	Оповещение пассажиров по громкоговорящей связи	1					Диктор по вокзалу
3	Вручение машинисту поездного локомотива переносной радиостанции	1					Составитель поездов
4	Закрепление вагонов с пассажирами и доклад ДСП	3					Составитель поездов
5	Отсоединение высоковольтных цепей электропитания между вагонами с пассажирами и вагонами с автомобилями	2					Поездной электромеханик
6	Разъединение тормозных рукавов между вагонами с пассажирами и вагонами с автомобилями	1					Составитель поездов
7	Передача натурного листа	3					ДСПП, локомотивная бригада
8	Корректировка натурного листа	8					ДСПП
9	Уведомление ДСП о готовности к маневрам	1					Составитель поездов
10	Отцепка и вытягивание в горловину станции	3					ДСП, составитель поездов, локомотивная бригада
11	Осаживание управлением назад на соседний путь	2					ДСП, составитель поездов, локомотивная бригада
12	Передача составителю поездов переносной радиостанции	1					Локомотивная бригада
13	Отцепка вагонов	3					Составитель поездов
14	Высадка и посадка пассажиров	37					Проводники вагонов
15	Заезд и прицепка поездного локомотива	3					ДСП, составитель поездов, локомотивная бригада
16	Ограждение	1					ДСП, работники ПТО ВЧДЭ
17	Техническое обслуживание	10					Работники ПТО ВЧДЭ
18	Соединение тормозных рукавов	2					Работники ПТО ВЧДЭ
19	Сокращенное опробование тормозов	10					Локомотивная бригада, поездной электромеханик, работники ПТО ВЧДЭ
20	Оформление справки формы ВУ-45	1					Работники ПТО ВЧДЭ, локомотивная бригада
21	Включение цепей электропитания	2					Поездной электромеханик
22	Снятие средств закрепления	3					ДСПП
23	Снятие ограждения	1					ДСП, работники ПТО ВЧДЭ
24	Регламент Минута готовности	1					Локомотивная бригада
25	Отправление	1					ДСП, локомотивная бригада
	Итого	39					

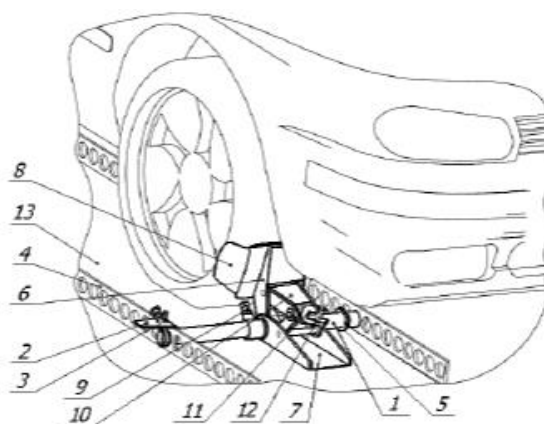
Таблица 2

Технологический график обработки пассажирских поездов без смены локомотива с отцепкой вагонов с транспортными средствами на попутной станции и перестановкой их на соседний путь при использовании маневрового локомотива

№ п/п	Операция	Время в минутах				Исполнитель	
		на операцию	10	20	30		40
1	Привытие	1					ДСП, локомотивная бригада
2	Оповещение пассажиров по громкоговорящей связи	1					Диктор по вокзалу
3	Заезд и прицепка маневрового локомотива с хвоста	2					ДСП, составитель поездов, машинист маневрового состава
4	Отсоединение высоковольтных цепей электропитания между вагонами с пассажирами и вагонами с автомобилями	2					Поездной электромеханик
5	Разъединение тормозных рукавов между вагонами с пассажирами и вагонами с автомобилями	1					Составитель поездов
6	Передача натурального листа	3					ДСПП, локомотивная бригада
7	Корректировка натурального листа	8					ДСПП
8	Высадка и посадка пассажиров	22					Проводники вагонов
9	Уведомление ДСП о готовности к маневрам	1					Составитель поездов
10	Отцепка и вытягивание в горловину станции	3					ДСП, составитель поездов, локомотивная бригада
11	Осаживание управлением назад на соседний путь	2					ДСП, составитель поездов, локомотивная бригада
12	Отцепка вагонов	3					Составитель поездов
13	Ограждение	1					ДСП, работники ПТО ВЧДЭ
14	Техническое обслуживание	10					Работники ПТО ВЧДЭ
15	Сокращенное опробование тормозов	10					Локомотивная бригада, поездной электромеханик, работники ПТО ВЧДЭ
16	Оформление справки формы ВЧ-45	1					Работники ПТО ВЧДЭ, локомотивная бригада
17	Снятие ограждения	1					ДСП, работники ПТО ВЧДЭ
18	Регламент Минута готовности	1					Локомотивная бригада
19	Отправление	1					ДСП, локомотивная бригада
	Итого	24					

Из технологических графиков следует, что при использовании маневрового локомотива для отцепки вагонов с транспортными средствами на попутной станции продолжительность обработки пассажирских поездов без смены локомотива сокращается на 15 минут.

Для погрузки транспортных средств с боковой рампы требуется специальный вагон (вагон с рампой). Дополнительно требуется вагон с наклонным въездом для возможности и при необходимости погрузки с его помощью вторых ярусов вагонов. В качестве средства закрепления транспортных средств в вагоне может быть использован колесный упор колодочного типа [6] (рис. 3).



Условные обозначения:

- 1 – труба; 2 – ручка; 3 – стопор; 4 – направляющая настила;
 5 – шайба; 6, 10 – рычаг; 7 – корпус; 8 – упор; 9 – винтовой стопор;
 11 – цапфа с гайкой; 12 – винт; 13 – настил.

Рис. 3. Колесный упор колодочного типа [6]

На рис. 4 представлена схема погрузки вагонов через боковую, а также торцевую рампы при движении транспортных средств передним ходом, используя вагоны с наклонным въездом.

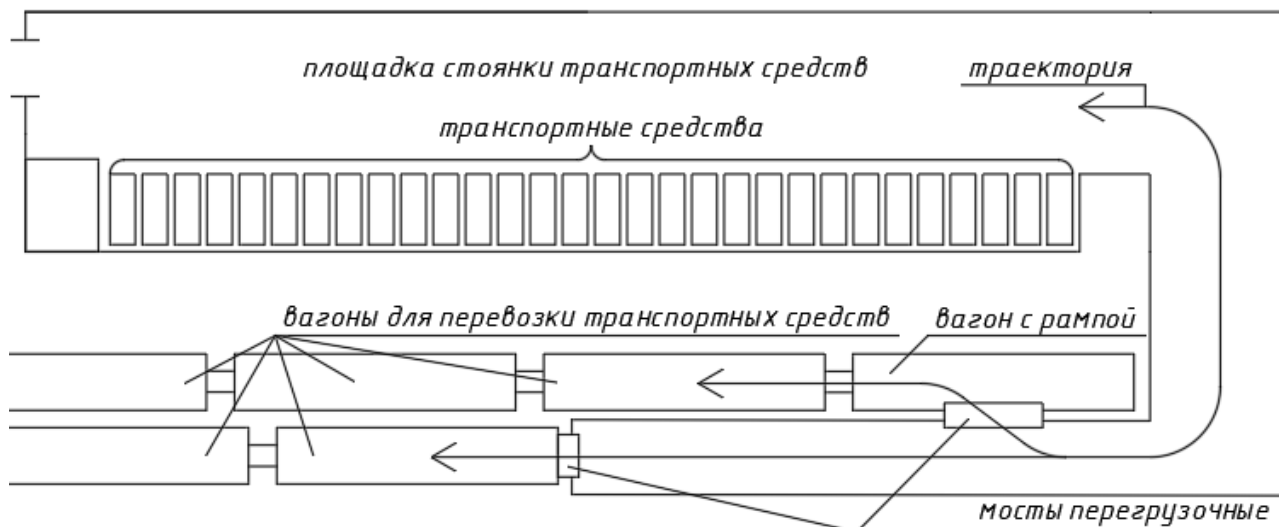


Рис. 4. Схема погрузки вагонов через боковую, а также торцевую рампы при движении транспортных средств передним ходом

Вагоны для перевозки транспортных средств и с наклонным въездом при разгрузке должны располагаться к платформе так, чтобы транспортные средства можно было бы разгружать прямым ходом (рис. 5).

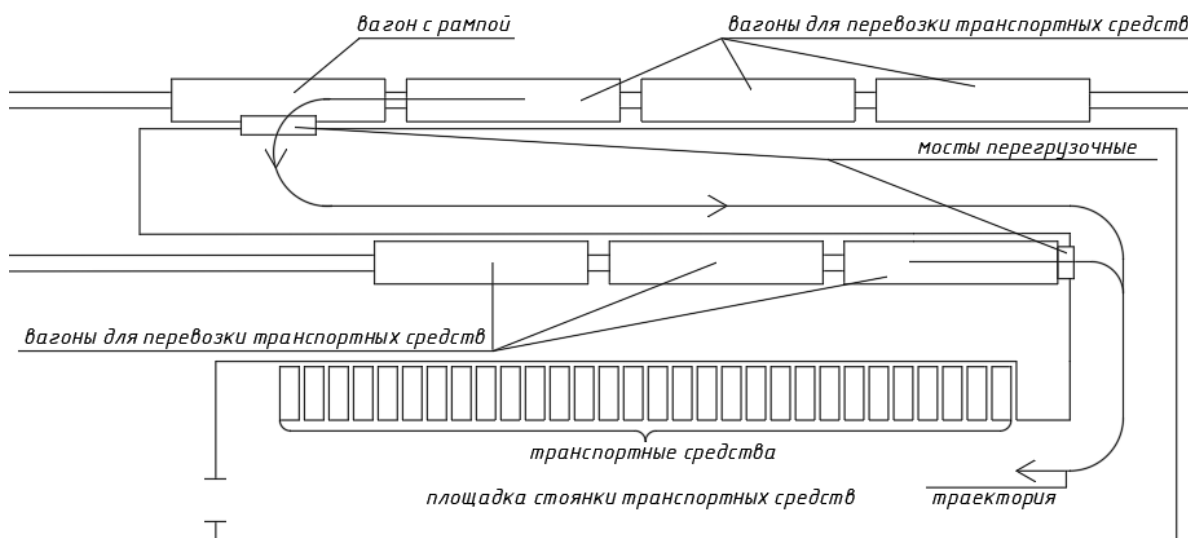


Рис. 5. Схема разгрузки вагонов через боковую, а также торцевую рампы при движении транспортных средств передним ходом

Создание подходящих условий для совершенствования перевозок пассажиров с транспортными средствами железнодорожным транспортом повлечет за собой привлечение дополнительного пассажиропотока на железнодорожный транспорт [8]. Это особенно будет удобно для тех пассажиров, кто предпочитает исследовать новые места и не зависеть от общественного транспорта на удаленном расстоянии от мест постоянного пребывания. В качестве основных преимуществ перевозки пассажиров с транспортными средствами железнодорожным транспортом можно выделить следующие:

1 Безопасность перевозки. Транспортные средства надежно закрепляются в специальном подвижном составе, что исключает их возможность повреждения. Кроме того, железнодорожные пере-

возки регламентируются строгими правилами и нормативами, что гарантирует сохранность транспортного средства при перевозке.

2 Обширная маршрутная сеть. Перевозку пассажиров с транспортными средствами возможно организовать по различным направлениям, включая отдаленные и труднодоступные регионы. За счет разветвленной сети железных дорог, перевозка пассажиров с транспортными средствами будет являться удобной и эффективной [9].

3 Удобство для пассажиров. Во время перевозки железнодорожным транспортом пассажиры могут комфортно отдохнуть и воспользоваться различными услугами, предлагаемыми в поезде.

4 Точность логистики. Движение поездов выполняется строго по графику. Серьезные отклонения от расписания случаются редко. Устойчивые транспортные взаимосвязи и регулярность перевозок обеспечивают минимизацию рисков несвоевременного прибытия поездов в пункты назначения.

5 Экологическая безопасность [10]. Перевозка пассажиров с транспортными средствами железнодорожным транспортом способствует снижению выбросов вредных веществ в атмосферу и уменьшению негативного влияния на окружающую среду.

Таким образом, перевозка пассажиров с транспортными средствами в вагонах, входящих в составы пассажирских поездов имеет множество преимуществ, которые делают этот вид путешествий удобным, безопасным и надежным для пассажиров.

Выводы

Расширение географии перевозок пассажиров с транспортными средствами в вагонах, входящих в составы пассажирских поездов и возможность осуществления операций по погрузке и разгрузке транспортных средств не только на начальных и конечных станциях маршрута движения поездов, но и на попутных станциях, оборудованных специальными погрузочными устройствами, может привести к увеличению пассажиропотока и стимулированию развития железнодорожной отрасли.

Список литературы

1 Современные транспортные технологии : Как технологический прогресс меняет мир транспорта. – URL: <https://vc.ru/transport/708906-sovremennye-transportnye-tehnologii-kak-tehnologicheskii-progress-menyaet-mir-transporta> (дата обращения: 01.07.2024).

2 Годовой отчет АО «ФПК». – URL: <https://fpc.ru/api/media/resources/2327606?action=download> (дата обращения: 23.07.2024).

3 О развитии автомобильного туризма в России. – URL: <https://www.pr-post.ru/common/post-o-razvitii-avtomobilnogo-turizma-v-rossii-edi.html> (дата обращения: 23.09.2024).

4 Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) : учебник / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич [и др.] ; под ред. Н. В. Правдина и С. П. Вакуленко. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 1086 с. – ISBN 978-5-89035-619-2.

5 Станции для погрузки автомашин. – URL: <https://lokomo.ru/zheleznodorozhnyy-put/stancii-dlya-pogruzki-avtomashin.html> (дата обращения: 01.07.2024).

References

1 Modern transport technologies : How technological progress is changing the world of transport. – URL: <https://vc.ru/transport/708906-sovremennye-transportnye-tehnologii-kak-tehnologicheskii-progress-menyaet-mir-transporta> (date of access: 07/01/2024).

2 Annual report of JSC "FPC". – URL: <https://fpc.ru/api/media/resources/2327606?action=download> (date of access: 07/23/2024).

3 About the development of automobile tourism in Russia – URL: <https://www.pr-post.ru/common/post-o-razvitii-avtomobilnogo-turizma-v-rossii-edi.html> (date of access: 09/23/2024).

4 Designing the infrastructure of railway transport (stations, railway and transport hubs) : textbook / N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko, A. K. Golovnich, [et al.] ; edited by N. V. Pravdin and S. P. Vakulenko. – Moscow : FGBOU "Educational and Methodological Center for Education in railway transport", 2012. – 1086 p. – ISBN 978-5-89035-619-2.

5 Stations for loading vehicles. – URL: <https://lokomo.ru/zheleznodorozhnyy-put/stancii-dlya-pogruzki-avtomashin.html> (date of access: 07/01/2024).

6 Размещение и крепление техники на колесном ходу. – URL: <https://base.garant.ru/55171503/ae5f9867312347a00f66bc08a4b4fa06/> (дата обращения: 23.09.2024).

7 Методика по разработке и определению технологических норм погрузки грузов в вагоны и выгрузки грузов из вагонов. – URL: https://www.samgups.ru/about/struktura_universiteta/filialy/vpo/nnov/tsentr-dopolnitelnogo-professionalnogo-obrazovaniya/povyshenie-kvalifikatsii-rukovoditeley-i-sluzhashchikh/нормы_пог_выг.pdf (дата обращения 23.09.2024).

8 Середов, Е. А. Формирование маршрутов пассажирских поездов на сети железных дорог с учетом предпочтений пассажиров : диссертация кандидата технических наук : 2.9.4 / Середов Евгений Александрович. – Москва, 2022. – 192 с.

9 Преимущества и рекомендации по организации безопасной и комфортной железнодорожной перевозки личного автомобиля – URL: <https://logists.by/blog/preimuschestva-i-rekomendatsii-po-organizatsii-bezopasnoy-i-komfortnoy-zheleznodorozhnoy-perevozki-lichnogo-avtomobilya> (дата обращения 01.07.2024).

10 Коновал, И. А. Совершенствование систем жизнеобеспечения пассажирских вагонов для создания комфортных и безопасных условий проезда : диссертация кандидата технических наук : 2.9.10 / Коновал Инна Алексеевна. – Москва, 2023. – 228 с.

6 Placement and fastening of equipment on wheels. – URL: <https://base.garant.ru/55171503/ae5f9867312347a00f66bc08a4b4fa06/> (date of access: 09/23/2024).

7 Methodology for the development and definition of technological standards for loading goods into wagons and unloading goods from wagons. – URL: https://www.samgups.ru/about/struktura_universiteta/filialy/vpo/nnov/tsentr-dopolnitelnogo-professionalnogo-obrazovaniya/povyshenie-kvalifikatsii-rukovoditeley-i-sluzhashchikh/нормы_пог_yg.pdf (date of access: 09/23/2024).

8 Seredov, E. A. Formation of passenger train routes on the railway network, taking into account the preferences of passengers : dissertation of the candidate of technical sciences : 2.9.4 / Seredov Evgeny Alexandrovich. – Moscow, 2022. – 192 p.

9 Advantages and recommendations for the organization of safe and comfortable railway transportation of a personal car – URL: <https://logists.by/blog/preimuschestva-i-rekomendatsii-po-organizatsii-bezopasnoy-i-komfortnoy-zheleznodorozhnoy-perevozki-lichnogo-avtomobilya> (date of access: 07/01/2024).

10 Konoval, I. A. Improvement of life support systems for passenger cars to create comfortable and safe travel conditions : dissertation of the candidate of technical sciences : 2.9.10 / Konoval Inna Alekseevna. – Moscow, 2023. – 228 p.

E. A. Seredov

FEATURES OF PASSENGER TRANSPORTATION WITH VEHICLES FOR PERSONAL USE BY RAIL

Abstract. The article examines the study of passenger transportation with vehicles for personal use by rail. A distinctive feature of such transportation is that vehicles for personal use cannot be loaded into wagons from platforms designed for boarding and disembarking passengers. Loading of such vehicles into railway rolling stock should be carried out at stations equipped with special loading devices and located in the vicinity of highways and the station complex. The creation of suitable conditions for improving the transportation of passengers with vehicles for personal use by rail will entail attracting additional passenger traffic to rail transport. Such transportation will be especially convenient for those passengers who prefer to explore new places and not depend on public transport at a remote distance from their places of permanent residence. The paper presents schemes for loading and unloading wagons through the side and end ramps at passing stations when vehicles for personal use are moving in front.

Keywords: railway transport, vehicles, methods of loading vehicles, station layout, schemes for loading and unloading wagons.

For citation: Seredov, E. A. Features of passenger transportation with vehicles for personal use by rail / E. A. Seredov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 184–191. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_184.

Сведения об авторах

Середов Евгений Александрович
Российский университет транспорта
(МИИТ),
кафедра «Железнодорожные станции и
транспортные узлы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: evgeniy.seredov@mail.ru

Information about the authors

Seredov Evgeniy Alexandrovich
Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Railway Stations and Transport Hubs»,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: evgeniy.seredov@mail.ru

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК. 629.463.62

DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_192

*Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева, Т. М. Чернова***О НЕДОИСПОЛЬЗОВАНИИ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ
УНИВЕРСАЛЬНЫХ ВАГОНОВ-ПЛАТФОРМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
СЪЕМНЫХ МНОГООБОРОТНЫХ СРЕДСТВ КРЕПЛЕНИЯ ГРУЗОВ**

Аннотация. Рассмотрен вопрос повышения эффективности использования универсальных вагонов-платформ при перевозке грузов с применением съемных многооборотных средств крепления грузов (МС). Приведен обзор серийных универсальных вагонов-платформ и анализ использования их грузоподъемности при применении МС. Отмечено значительное занижение допускаемой эксплуатационной нагрузки на стоечную скобу универсального вагона-платформы по сравнению с расчетными значениями, что приводит к недоиспользованию грузоподъемности вагонов-платформ при перевозке грузов с применением МС для размещения и крепления грузов. Отдельные результаты исследований использованы при разработке схем размещения и крепления грузов для местных технических условий размещения и крепления лесоматериалов.

Ключевые слова: съемное оборудование, многооборотное оборудование, крепление груза, вагоны-платформы, технические условия погрузки, стоечные скобы, местные технические условия.

Для цитирования: О недоиспользовании грузоподъемности универсальных вагонов-платформ при использовании съемных многооборотных средств крепления грузов / Д. Г. Бейн, Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева, Т. М. Чернова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 192–201. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_192.

Введение

Перевозка грузов на универсальных вагонах-платформах осуществляется в ряде случаев с использованием съемных многооборотных средств крепления грузов (далее – МС), использование которых позволяет существенно расширить номенклатуру перевозимых грузов.

Конструктивные и эксплуатационные требования к МС, в том числе в части крепления МС к вагонам-платформам, установлены «Техническими условиями размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах» [1] (при перевозках по территории Российской Федерации) и Приложением 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) [2] (при перевозках в международном сообщении).

Известно эксплуатационное ограничение по загрузенности скоб вагонов: в соответствии с [1] и [2] нагрузка на одну стоечную скобу (боковую или торцевую) не должна превышать 5 тс (для приварных скоб).

При этом при проектировании вагонов расчетная нагрузка на скобу составляет 150 кН согласно «Нормам для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» [3] и ГОСТ 33211-2014 [4].

При разработке схем погрузок с использованием МС в соответствии с [1] и [2] одной из ключевых задач является реализация максимально возможной массы перевозимого груза с учетом массы МС без превышения допускаемой эксплуатационной нагрузки на скобы вагона.

Целью проведенных исследований было определение максимально возможной грузоподъемности вагона-платформы при использовании МС с креплением к скобам вагона.

Расчет максимально возможной суммарной массы груза и МС при болтовом креплении МС к скобам вагона-платформы

Проведенный обзор универсальных вагонов-платформ (табл. 1) за 60 лет (с 1964 г. выпуска по настоящее время) показал тенденцию к увеличению их грузоподъемности (рис. 1), типичную для всего отечественного вагоностроения.

Таблица 1

**Параметры некоторых моделей четырехосных универсальных вагонов-платформ
с длиной по осям сцепления автосцепок 14620 мм за период постановки производства
1964–2024 гг.**

Номер модели	Код предприятия-изготовителя [5]	Грузоподъемность, т	Тара минимальная, т	Осевая нагрузка, тс	Год постановки на производство	Номер модели	Код предприятия-изготовителя [5]	Грузоподъемность, т	Тара минимальная, т	Осевая нагрузка, тс	Год постановки на производство
13-401	27	63,00	20,30	21,13	1964	13-9808	1169	72,0 0	21,0 0	23,50	2008
13-401	133	63,00	20,30	21,13	1964	13-9775	1315	72,0 0	20,8 0	23,50	2009
13-401-50	133	63,00	20,30	21,33	1964	13-9744-03	1247	70,0 0	23,0 0	23,50	2012
13-4019	133	70,00	21,20	22,98	1969	13-9924	84	72,0 0	21,0 0	23,50	2012
13-401	62	66,00	20,30	21,88	1971	13-9744-08	1247	71,0 0	22,0 0	23,50	2013
13-401-45	62	66,00	20,30	21,88	1971	13-9840	1389	72,0 0	21,3 0	23,50	2013
13-401-50	62	66,00	20,30	22,08	1971	13-9990-01	1322	72,0 0	21,0 0	23,50	2015
13-401-45	133	66,00	20,30	21,88	1977	13-6851	1378	77,5 0	21,5 0	25,00	2015
13-401	133	66,00	20,30	21,88	1978	13-192-01	5	72,0 0	21,0 0	23,50	2016
13-401-50	133	66,00	20,30	22,08	1978	13-6851-04	1568	77,5 0	21,5 0	25,00	2016
13-401	133	70,00	20,30	22,73	1980	13-9808	1327	72,0 0	21,0 0	23,50	2017
13-401-45	133	70,00	20,30	22,73	1980	13-9569	1790	71,5 0	21,3 0	23,50	2018
13-401-50	133	70,00	20,30	23,08	1980	13-6851-06	5	77,5 0	21,5 0	25,00	2018
13-4012-50	133	71,00	20,70	23,45	1983	13-2114	1899	72,0 0	21,3 0	23,50	2019
13-4012	133	72,00	21,00	23,50	1985	13-2114-08	1899	72,0 0	20,1 0	23,32	2019
13-4012	133	71,00	20,70	23,10	1985	13-4085	133	72,0 0	21,3 0	23,50	2019
13-4012	62	66,00	21,00	22,00	1985	13-192-02	5	77,0 0	22,0 0	25,00	2019
13-4012-01	133	71,00	20,80	23,10	1985	13-4012	133	72,0 0	21,0 0	23,50	2019
13-4012-43	133	72,00	21,00	23,50	1985	13-9572	1790	72,0 0	21,0 0	23,50	2019
13-4012-50	62	66,00	21,00	22,20	1985	13-6719	1247	72,0 0	21,5 0	23,50	2022
13-2114	22	72,00	21,30	23,50	2001	13-192-01	5	72,0 0	21,0 0	23,50	2022
13-2114-09	22	72,00	21,30	23,50	2001	13-192-01	2752	72,0 0	21,0 0	23,50	2023
13-2114-08	22	72,00	20,10	23,50	2005						

Однако при проектировании МС определять максимальную суммарную массу перевозимого груза и МС исходя из грузоподъемности вагона не допускается. Согласно [1] и [2] при определении способа размещения и крепления груза необходимо наряду с его массой учитывать инерционные силы (продольные, поперечные и вертикальные), ветровую нагрузку и силу трения.

Оптимальным способом крепления МС к универсальным вагонам-платформам является крепление МС к стоечным скобам боковых и концевых балок рам. В зависимости от конструкции МС и схемы погрузки груза могут быть задействованы как все стоечные скобы (на боковых и торцевых балках), так и их часть.

Расчет инерционных сил (вертикальных, продольных и поперечных), сил трения и ветровой нагрузки, действующих на МС с грузом, с одновременным учетом количества задействованных стоечных скоб и ранее обозначенным ограничением допускаемой нагрузки на одну скобу, позволяет определить максимальный вес перевозимого груза.

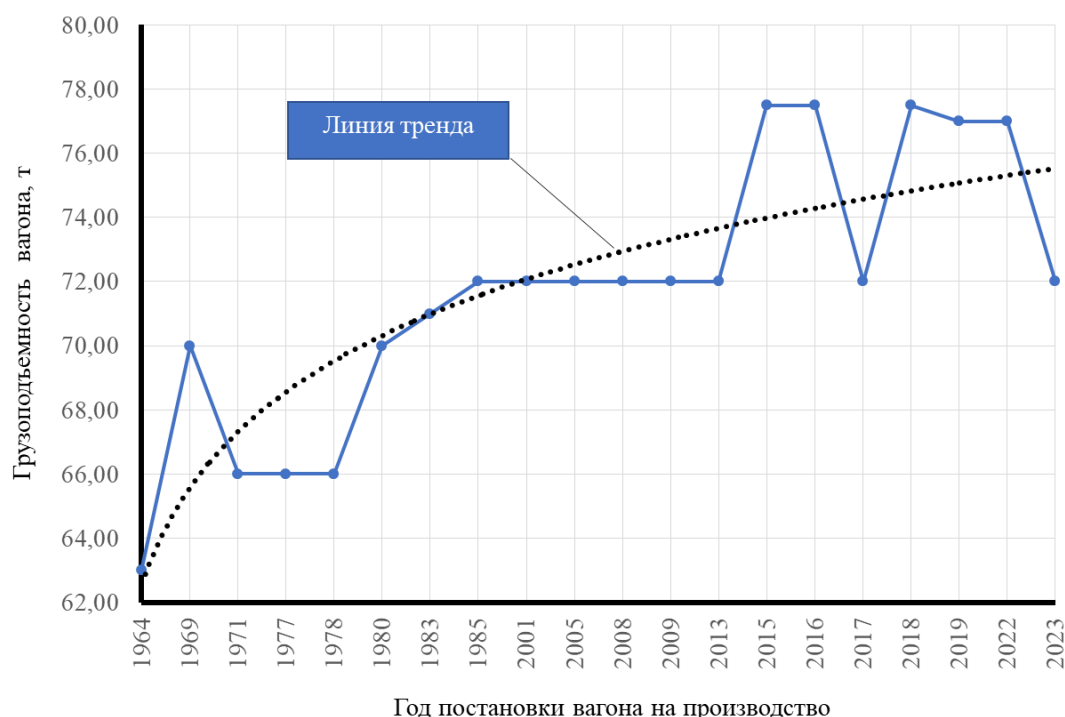


Рис. 1. Значения грузоподъемности четырехосных универсальных вагонов-платформ с длиной по осям сцепления автосцепок 14620 мм по годам постановки на производство

Результаты такого расчета фактической грузоподъемности вагона при перевозке МС с грузом предлагается рассмотреть на примере «Местных технических условий размещения и крепления непакетированных круглых лесоматериалов в вагонах-платформах моделей 13-6887, 13-6887-01, 13-6887-02, 13-6887-03 с многооборотными средствами крепления по проекту ВАЦТ.092.00.00.000 в зональном габарите погрузки» [6] (далее – МТУ), разработанных АО «НВЦ «Вагоны»».

МС для перевозки лесоматериалов по МТУ [6] состоят из следующих основных частей (рис. 2):

- двух стен торцевых, каждая из которых крепится к двум стоечным скобам на торцевой балке и двум стоечным скобам в консольной части боковых балок;
- шести рам, каждая из которых закрепляется при помощи болтового соединения на двух стоечных скобах боковых балок;
- непосредственно узлов крепления, а именно торцевых упоров [7] и креплений к стоечным скобам боковых балок.

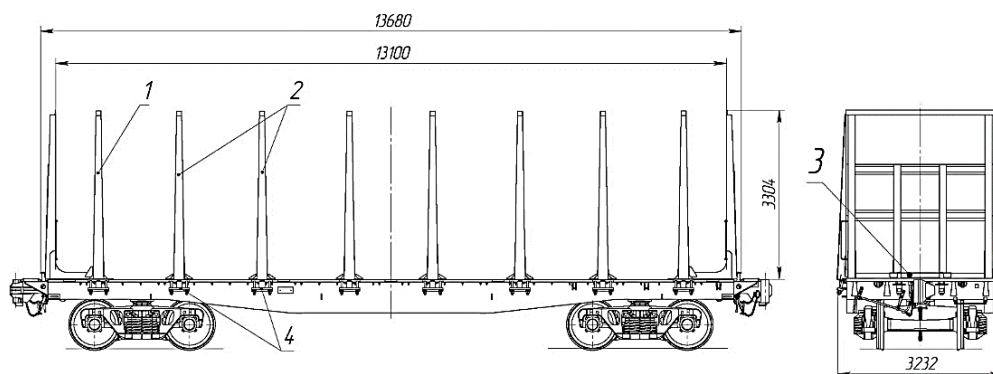


Рис. 2. Общий вид МС для перевозки лесоматериалов на вагонах-платформах моделей 13-6887 (-01, 02, -03) по МТУ [6]:

1 – стена торцевая; 2 – рама съемная; 3 – упор торцевой; 4 – крепление к стоечной скобе

Масса тары комплекта МС составляет 4 т, при этом данный проект предполагает перевозку на МС штабелей лесоматериалов различной длины (рис. 3).

В зависимости от длины штабеля при передаче вышеуказанных расчетных сил от МС с грузом на раму вагона-платформы задействуется различное число стоечных скоб на боковых и торцевых балках.

В частности, при действии продольной нагрузки $\Delta F_{пр}$ задействуются торцевые стоечные скобы (к которым крепится торцевой упор 3 стены 1, показанный на рис. 2) только с одной стороны вагона-платформы.

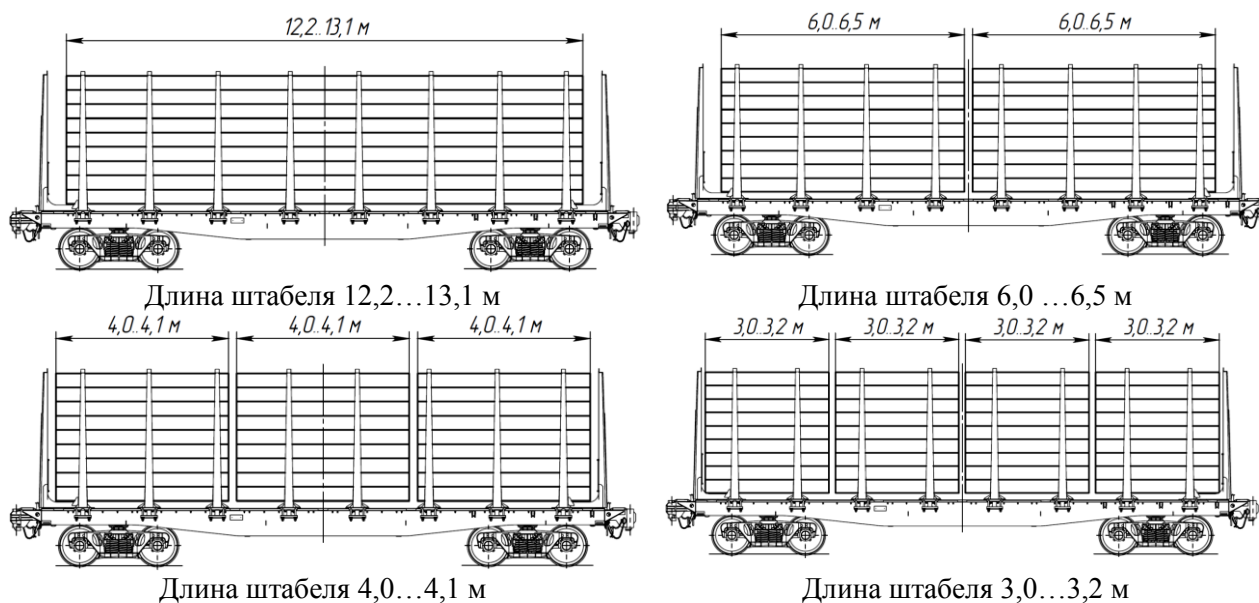


Рис. 3. Схемы погрузки круглых лесоматериалов на вагоны-платформы моделей 13-6887 (-01, 02, -03) с использованием МС [6]

Величина продольной нагрузки $\Delta F_{пр}$ определяется согласно [1] и [2] по формуле

$$\Delta F_{пр} = F_{пр} - F_{тр}^{пр}, \quad (1)$$

где $F_{пр}$ – продольная инерционная сила, действующая на один штабель груза и связанные с ним части МС; $F_{тр}^{пр}$ – сила трения в продольном направлении, действующая на один штабель груза и связанные с ним части МС.

В рассматриваемом примере расчеты удельной продольной силы инерции $F_{пр}$ по [1] проводились для «жесткого» типа крепления (крепление МС к скобе болтами).

В табл. 2 приведены результаты расчета допускаемой массы груза при перевозке на универсальных вагонах-платформах моделей 13-6887 (-01, 02, -03) с применением МС [6] в зависимости от длины штабеля лесоматериалов.

Таблица 2

Расчет допускаемой к перевозке массы лесоматериалов в зависимости от схемы погрузки при применении МС [6] на универсальных вагонах-платформах моделей 13-6887 (-01, 02, -03)

Схема погрузки лесоматериалов в соответствии с рис. 3	Количество (шт.) стоечных скоб, на которые распределяется продольная сила $\Delta F_{пр}$ от одного штабеля груза и связанных с ним частей МС	Нагрузка $\Delta F_{пр}$ на одну стоечную скобу, тс	Масса одного штабеля груза без учета МС, т	Масса одного штабеля груза с учетом массы МС, т	Масса МС и груза общая на 1 вагон ($P_{мс}$), т
1 штабель длиной 12,2...13,1 м с распределением силы $\Delta F_{пр}$ на торцевой упор	18	4,96	60	64,0	64,0
2 штабеля длиной 6,0...6,5 м: – для штабеля с распределением силы $\Delta F_{пр}$ на торцевой упор	10	3,98	26	28,0	56,0
– для штабеля без распределения силы $\Delta F_{пр}$ на торцевой упор	8	4,96	26	28,0	
3 штабеля длиной 4,0...4,1 м: – для торцевого штабеля с распределением силы $\Delta F_{пр}$ на торцевой упор	8	2,69	13	14,72	43,0
– для штабеля в средней части вагона	4	4,96	13	13,56	
– для штабеля в концевой части вагона без распределения силы $\Delta F_{пр}$ на торцевой упор	6	3,6	13	14,72	
4 штабеля длиной 3,0...3,2 м: – для торцевого штабеля с распределением силы $\Delta F_{пр}$ на торцевой упор	6	3,3	12,5	13,94	54,0
– для среднего штабеля	4	4,66	12,5	13,06	
– для среднего штабеля	4	4,66	12,5	13,0,6	
– для штабеля в концевой части вагона без распределения силы $\Delta F_{пр}$ на торцевой упор	4	4,97	12,5	13,94	

На рис. 4 показана диаграмма сравнения $P_{мс}$ (максимальной массы груза и МС на 1 вагон) в зависимости от количества штабелей груза (при болтовом креплении МС к стоечным скобам вагона) согласно расчету, проведенному в табл. 2.

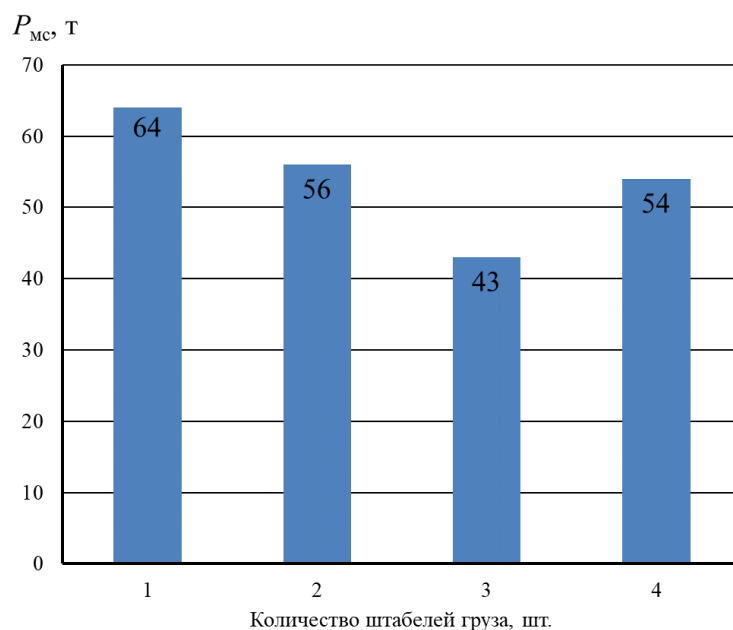


Рис. 4. Диаграмма сравнения максимальной массы груза и МС на 1 вагон в зависимости от количества штабелей груза (при болтовом креплении МС к стоечным скобам вагона)

Как видно из приведенного примера, при изменении числа мест крепления одного штабеля груза к раме вагона-платформы в определенных случаях снижается и общая масса МС и груза из-за эксплуатационных ограничений нагрузки $[\Delta F] = 5$ тс на стоечные скобы.

В рассмотренных выше схемах погрузки масса одного штабеля ограничена расчетным значением $\Delta F_{пр}$, при этом для отдельных скоб значение силы $\Delta F_{пр}$ составляет 99,4 % от допускаемого значения $[\Delta F]$:

$$\Delta F_{пр} = 4,97 \text{ тс} < [\Delta F] = 5 \text{ тс}.$$

В этой связи важной задачей становится разработка МС и его крепления таким образом, чтобы независимо от схемы погрузки общая масса МС с грузом равномерно распределялась на все имеющиеся на универсальном вагоне-платформе стоечные скобы.

Анализ фактического использования грузоподъемности универсальных вагонов-платформ при перевозке грузов с использованием МС

Определяющее значение при расчете максимально возможной массы груза и МС имеет допускаемая нагрузка на стоечную скобу. Как видно из табл. 2, максимальная грузоподъемность вагонов-платформ при перевозке грузов с применением МС (с болтовым креплением к стоечным скобам) составит 64 т при условии, что для крепления будут одновременно задействованы все имеющиеся стоечные скобы (боковые и торцевые).

Таким образом, можно рассчитать массу неиспользованной грузоподъемности $P_{нед}$ серийных универсальных вагонов-платформ (с учетом ранее проведенного обзора) и вычислить коэффициент использования стоечных скоб по следующей формуле:

$$K_{ис} = \frac{P_{мс}}{P_{пл}}, \quad (2)$$

где $P_{мс}$ – допускаемая масса МС с грузом с учетом крепления к 18 стоечным скобам, т; $P_{пл}$ – грузоподъемность универсального вагона-платформы, т.

Результаты расчета неиспользованной грузоподъемности $P_{нед}$ и коэффициента использования стоечных скоб $K_{ис}$ приведены на рис. 5 и 6.

Как видно из приведенных графиков, у современных универсальных вагонов-платформ наблюдается значительное снижение фактической грузоподъемности при перевозке МС с грузом по сравнению с максимально допускаемой грузоподъемностью. Особенно сильно это отличие видно у вагонов, эксплуатируемых на ходовых частях с осевой нагрузкой 25 тс.

Как было отмечено выше, по действующей нормативной документации значения допускаемой нагрузки на стоечные скобы отличаются: не более 5 т согласно [1] и [2] и 150 кН согласно [3] и [4].

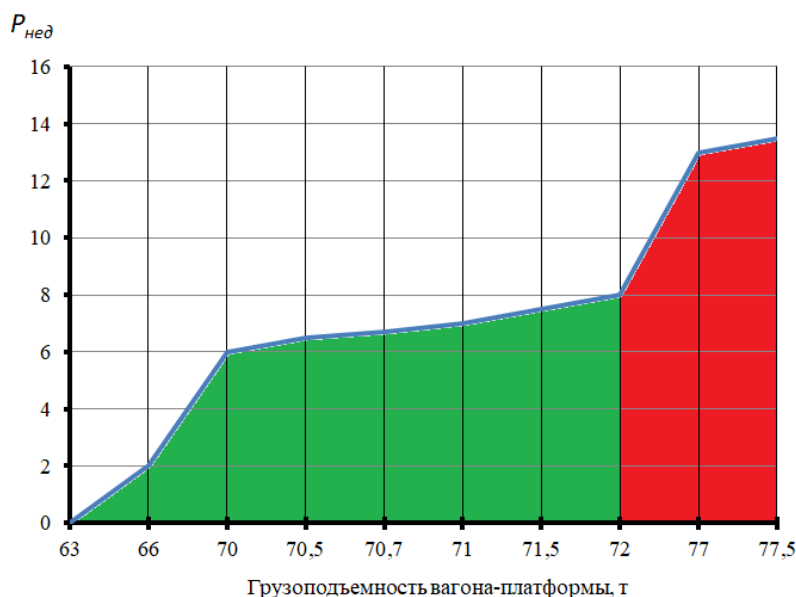


Рис. 6. Недоиспользованная грузоподъемность $P_{нед}$ универсальных вагонов-платформ при перевозке грузов с применением МС, прикрепленного ко всем стоечным скобам рамы болтами

(зеленым цветом выделены вагоны с осевой нагрузкой 23,5 тс, красным – с осевой нагрузкой 25 тс)

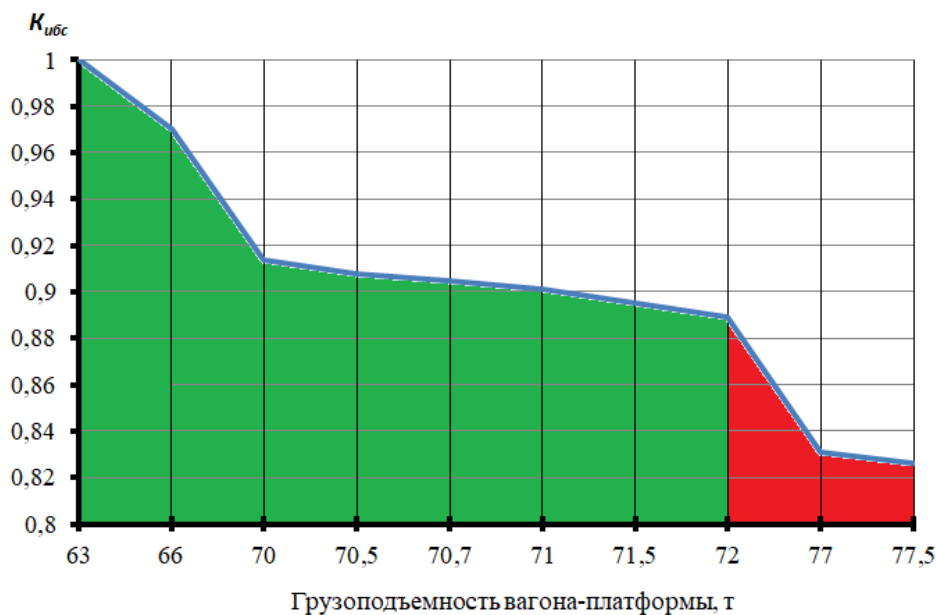


Рис. 7. Коэффициент использования стоечных скоб $K_{исс}$ серийных вагонов-платформ при перевозке грузов с применением МС, прикрепленного ко всем стоечным скобам рамы болтами

(зеленым цветом выделены вагоны с осевой нагрузкой 23,5 тс, красным – с осевой нагрузкой 25 тс)

Заключение

Отдельные результаты приведенных исследований использованы при разработке схем размещения и крепления грузов для МТУ [6] и при разработке технических решений [7], [8].

Практика разработки МС (в том числе из высокопрочных сталей [9]) и МТУ показала завышенные эксплуатационные требования к допускаемым нагрузкам на приварные стоечные скобы согласно [1] и [2] в сравнении с расчетными нагрузками по [3] и [4].

Повышение допускаемой нагрузки на стоечную скобу с учетом величин расчетных и испытательных нагрузок позволит снизить недоиспользование грузоподъемности универсальных вагонов-платформ и повысит эффективность применения МС.

С целью повышения фактической грузоподъемности универсальных вагонов-платформ при использовании МС с болтовым креплением к стоечным скобам рекомендуется рассмотреть вопрос о повышении допускаемой эксплуатационной нагрузки на приварную стоечную скобу универсального вагона-платформы при участии причастных представителей железнодорожных администраций колеи 1520, а также грузоперевозчиков и владельцев универсальных вагонов-платформ.

Список литературы

1 Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах : утверждены МПС России 27 мая 2003 г. № ЦМ-943. – Москва : Юртранс, 2003. – 576 с.

2 Технические условия размещения и крепления грузов. Приложение 3 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). Том 1 : утверждены Комитетом Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД) 1 июля 2022 г. – Москва, 2022. – 490 с.

3 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) : утверждены МПС России от 22 января 1996 г. – Москва : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

4 **ГОСТ 33211–2014.** Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с Поправкой, с Изменением № 1) : утвержден приказом Росстандарта № 565-ст от 05.06.2015. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 54 с.

5 Модели грузовых вагонов (СЖА 2004 11) : справочник : утвержден Комиссией Совета по железнодорожному транспорту полномочных специалистов вагонного хозяйства железнодорожных администраций. Протокол заседания от 10–11 июля 2002 г. – URL: <https://esnsi.test.gosuslugi.ru/classifiers> (дата обращения: 15.11.2024).

6 Местные технические условия размещения и крепления непакетированных круглых лесоматериалов в вагонах-платформах моделей 13-6887, 13-6887-01, 13-6887-02, 13-6887-03 с многооборотными средствами крепления по проекту ВАЦТ.092.00.00.000 в зональном габарите погрузки : утверждены распоряжением Центра фирменного транспортного обслуживания № ЦФТО-50/р от 24.03.2021. // РЖД-Партнер Документы. – 2021. – № 881.

7 **Патент на полезную модель № 199040. U1 Российская Федерация, МПК В61D 17/06.** Съёмный торцевой упор съёмного многооборотного оборудования вагона-платформы / Д. Г. Бейн, Е. А. Исполова, Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева. – № 2019126713 : заявл.

References

1 Technical conditions for the placement and securing of goods in wagons and containers : approved by the Ministry of Railways of Russia on May 27, 2003. No. CM-943. – Moscow : Yurtrans, 2003. – 576 p.

2 Technical conditions for the placement and securing of goods. Annex 3 to the Agreement on International Rail Freight Transport (SMGS). Volume 1 : approved by the Committee of the Organization for Cooperation between Railways (OSZhD) on July 1, 2022. – Moscow, 2022. – 490 p.

3 Standards for the calculation and design of wagons for 1520 mm gauge railways of the Ministry of Railways (non-self-propelled) : approved by the Ministry of Railways of Russia on January 22, 1996 – Moscow : GosNIIV-VNIIZhT, 1996. – 319 p.

4 **GOST 33211-2014.** Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities (with Amendment, with Change No. 1) : approved by Order of Rosstandart No. 565-st dated 05.06.2015. – Moscow : Standartinform, 2020. – 54 p.

5 Models of Freight Cars (SZhA 2004 11) : reference book : approved by the Commission of the Council for Railway Transport of authorized specialists of the wagon industry of railway administrations. Minutes of the meeting of July 10–11, 2002. – URL: <https://esnsi.test.gosuslugi.ru/classifiers> (date of access: 11/15/2024).

6 Local technical conditions for the placement and securing of unpackaged round timber in flatcars of models 13-6887, 13-6887-01, 13-6887-02, 13-6887-03 with multi-turn securing means according to the VACT.092.00.00.000 project in the zonal dimension of loading : approved by order of the Center for Corporate Transport Services No. CFTO-50/r dated 24.03.2021. // RZD-Partner Documents. – 2021. – No. 881.

7 **Utility Model Patent No. 199040. U1 Russian Federation, IPC B61D 17/06.** Removable end stop of removable multi-turn equipment of a flat car / D. G. Bein, E. A. Ispolova, L. V. Tsyganskaya, N. A. Tanicheva. – No. 2019126713 : declared 23.08.2019 : published 11.08.2020 / ap-

23.08.2019 : опубл. 11.08.2020 ; заявитель Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»).

8 Патент на полезную модель № 197032 U1 Российская Федерация, МПК В60Р 7/00, В61D 45/00. Съёмное многооборотное устройство для перевозки крупнотоннажных контейнеров на универсальных вагонах-платформах / А. Н. Кемеж, А. Н. Гришаев, А. А. Шурмаков [и др.]. – № 2019143587 : заявл. 24.12.2019 : опубл. 26.03.2020 ; заявитель Акционерное общество «Первая Грузовая Компания» (АО «ПГК»).

8 Морозова, И. О. Опыт эксплуатации оборудования для перевозки лесоматериалов из высокопрочных сталей / И. О. Морозова, Д. Г. Бейн, Н. А. Таничева // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : материалы XV Международной научной технической конференции. – Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО РГУПС, 2021. – С. 87–88.

plicant Joint-Stock Company «Scientific and Implementation Center "Vagony"» (JSC «NVC "Vagony"»).

8 Utility Model Patent No. 197032 U1 Russian Federation, IPC B60P 7/00, B61D 45/00. Removable multi-use device for transporting large-capacity containers on universal flat cars / A. N. Kemezh, A. N. Grishaev, A. A. Shurmakov [et al.] ; No. 2019143587 : declared 24.12.2019 : published 26.03.2020 ; applicant Joint-Stock Company «First Freight Company» (JSC «PGK»).

9 Morozova, I. O. Experience in operating equipment for transporting timber made of high-strength steels / I. O. Morozova, D. G. Bein, N. A. Tanicheva // Rolling stock of the 21st century : ideas, requirements, projects : materials of the 15th International Scientific Technical Conference. – Saint Petersburg : FSBEI HE PGUPS, 2021. – P. 87 – 88.

D. G. Bein, L. V. Tsyganskaya, N. A. Tanicheva, T. M. Chernova

ON UNDERUTILIZATION OF THE LOADING CAPACITY OF UNIVERSAL FLAT CARS USING REMOVABLE MULTI-TURN CARGO SECURING MEANS

Abstract. The issue of increasing the efficiency of using universal flatcars for the transportation of goods using removable multi-turn cargo securing means (MS) is considered. An overview of serial universal flat cars and an analysis of the use of their carrying capacity in the application of MS are provided. A significant underestimation of the permissible operational load on the rack bracket of the universal flat car is noted in comparison with the calculated values, which leads to underutilization of the carrying capacity of flat cars when transporting goods using MS for placing and securing goods. Some research results are used in developing schemes for placing and securing goods for local technical conditions for the placement and securing of timber.

Keywords: removable equipment, multi-turn equipment, cargo securing, flat cars, loading specifications, rack brackets, local specifications.

For citation: On underutilization of the loading capacity of universal flat cars using removable multi-turn cargo securing means / D. G. Bein, L. V. Tsyganskaya, N. A. Tanicheva, T. M. Chernova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 192–201. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_192.

Сведения об авторах

Бейн Дмитрий Григорьевич

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”» (АО «НВЦ “Вагоны”»),
Научно-исследовательское бюро (НИБ),
кандидат технических наук, заместитель
главного конструктора НИБ,
действительный член Российской Академии
транспорта,
e-mail: dmitry.bein@nvc-vagon.ru

Information about the authors

Bein Dmitry Grigorievich

Joint-Stock Company "Scientific and Implementation Center "Vagony"»
(JSC «NVC "Vagony"»),
Scientific Research Bureau (NIB),
Candidate of Technical Sciences, Deputy
Chief Designer of NIB,
Full Member of the Russian Academy of Transport,
e-mail: dmitry.bein@nvc-vagon.ru

Цыганская Людмила Валериевна

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр «Вагоны»» (АО «НВЦ «Вагоны»»),
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора – главный конструктор НИБ,
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

Таничева Наталия Андреевна

Акционерное общество «Научно-внедренческий центр «Вагоны»» (АО «НВЦ «Вагоны»»),
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
Научно-исследовательское бюро (НИБ),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
начальник отдела динамики подвижного состава и ходовых частей НИБ,
e-mail: nataliya.tanicheva@nvc-vagon.ru

Чернова Татьяна Михайловна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
ассистент,
e-mail: chernova@pgups.ru

Tsyganskaya Lyudmila Valerievna

Joint-Stock Company "Scientific and Implementation Center "Vagony" (JSC «NVC "Vagony"»),
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Chair «Wagons and Wagon Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Deputy General Director – Chief Designer of NIB,
e-mail: lyudmila.cyganskaya@nvc-vagon.ru

Tanicheva Natalia Andreevna

Joint-Stock Company "Scientific and Implementation Center "Vagony" (JSC «NVC "Vagony"»),
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Scientific Research Bureau (NIB),
Chair «Wagons and Wagon Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of the Department of Dynamics of Rolling Stock and Running Gear, NIB,
e-mail: nataliya.tanicheva@nvc-vagon.ru

Chernova Tatyana Mikhailovna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),
Chair «Wagons and Wagon Facilities»,
Assistant,
e-mail: chernova@pgups.ru

Т. В. Волчек, В. С. Томилов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КОЛЛЕКТОРНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. Рассмотрены перспективы развития Восточного полигона, установлена необходимость повышения ресурса работы оборудования эксплуатируемых электровазозов. Приведена статистика отказов оборудования электровазозов серии «Ермак». Выявлено, что наибольшее количество отказов приходится на тяговый электродвигатель, а именно на его коллекторно-щеточный аппарат из-за возникновения переброса электрической дуги и пробоя изоляции. Рассмотрены причины их появления. Предлагается оснастить тяговый электродвигатель дополнительными датчиками, а именно сигнализатором искрения, что позволит своевременно обнаруживать искрение в коллекторно-щеточном аппарате и предотвращать образование кругового огня, а также температурными датчиками, которые позволят напрямую определять температуру обмоток. Представлены места для установки данных датчиков.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, коммутация, небалансная ЭДС, искрение, температурный контроль, пробой изоляции, круговой огонь.

Для цитирования: Волчек, Т. В. Совершенствование методов контроля состояния коллекторного тягового электродвигателя при его эксплуатации / Т. В. Волчек, В. С. Томилов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 202–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_202.

Введение

Сегодня для ОАО «РЖД» крайне важно устойчивое развитие Восточного полигона. Он имеет ключевое значение для обеспечения грузоперевозок по всей стране, соединяя Европейскую часть России с Дальним Востоком. За 2023 г. провозная способность Восточного полигона составила 173 млн т, к 2030 г. значение этого показателя должно составлять 210 млн т, а уже к 2035 г. – 270 млн т [1]. Для увеличения грузооборота более чем на 30 % требуется усовершенствование и обновление тягового подвижного состава, развитие инфраструктуры, оптимизация технологических процессов, которая подразумевает внедрение новых технологий и методов ремонта подвижного состава, управления локомотивом и т.д. В настоящее время на Восточном полигоне организуется тяжеловесное движение грузовых поездов массой 7100 т на основе эксплуатации электровазоза переменного тока с коллекторным приводом серии ЗЭС5К «Ермак». Также для увеличения грузооборота эксплуатируются сдвоенные тяжеловесные поезда массой 14200 т [2]. При этом в перспективе к 2030 г. на Восточном полигоне планируется организация движения грузовых поездов массой 8000–8800 т. Увеличение массы состава негативно влияет на оборудование электровазозов, которые находятся в эксплуатации. Нагрузки на него возрастают, что может способствовать преждевременному выходу оборудования из строя. При этом возникает необходимость проведения внепланового ремонта, а это, в свою очередь, вызывает излишние простои локомотивов и приводит к значительным финансовым потерям для компании.

Анализ работы тяговых электродвигателей электровазозов серии «Ермак»

Красноярская железная дорога является своеобразными воротами Восточного полигона, ее протяженность составляет 14,1 тыс. км. В настоящее время в приписке к Красноярской дирекции тяги числится 1152 секции электровазозов серии 2(3)ЭС5К.

На рис. 1 представлена диаграмма отказов технических средств в зависимости от оборудования локомотива 2(3)ЭС5К за 2022–2023 гг., из которой видно, что наибольшее количество отказов приходится на категории «Электрическое оборудование» и «Силовое оборудование». К категории «Электрическое оборудование» относятся: аккумуляторная батарея, реле защиты, коммутационные аппараты, контроллер машиниста, пульт управления, монтажное оборудование, межсекционное соединение, панели, щиты, сигнализация и т.п. К категории «Силовое оборудование» относятся: тяговые трансформаторы, выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), выпрямительные установки возбуждения (ВУВ), быстродействующие выключатели, главные выключатели, тяговые электродвигатели, элементы блока силовых аппаратов (БСА), сглаживающие реакторы, индуктивные шунты, кабели шин и т.п.

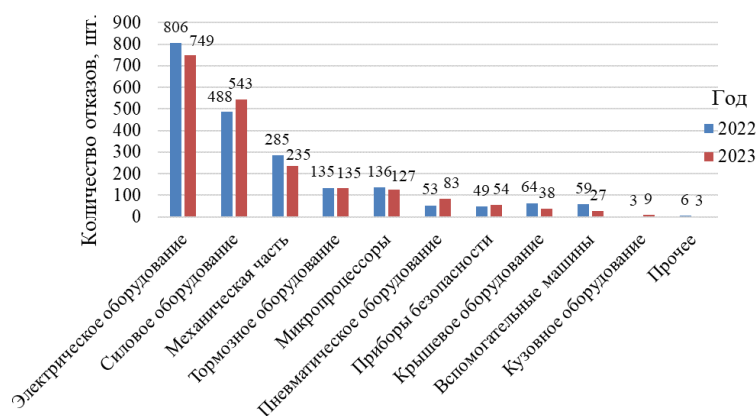


Рис. 1. Диаграмма распределения отказов технических средств по видам оборудования локомотива 2(3)ЭС5К Красноярской дирекции тяги

На рис. 2 представлена диаграмма распределения отказов технических средств по элементам категории «Силовое оборудование» электровоза 2(3)ЭС5К. Наибольшее количество отказов силового оборудования таких электровозов приходится на тяговые электрические двигатели (ТЭД) и составляет около 50 %.

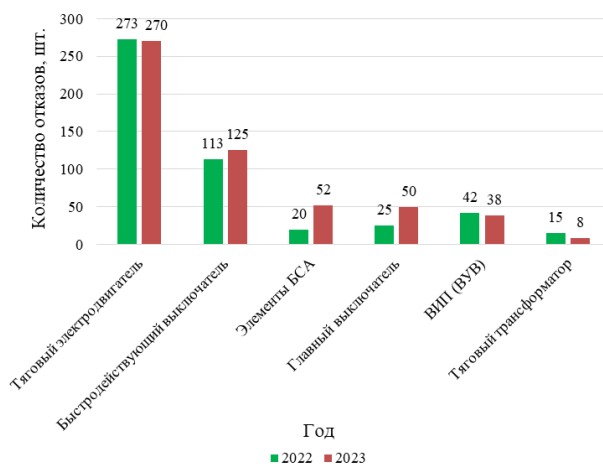


Рис. 2. Диаграмма распределения отказов технических средств по элементам силового оборудования локомотива 2(3)ЭС5К

Наибольшее количество отказов элементов ТЭД наблюдается на коллекторе (36 %), якоре (28 %) и щеточном аппарате (17 %), рис. 3. Установлено, что причинами отказов элементов ТЭД являются: переброс электрической дуги по коллектору (круговой огонь) – 44 %; пробой изоляции – 36 %; механические повреждения – 11 %; прочее – 9 %.

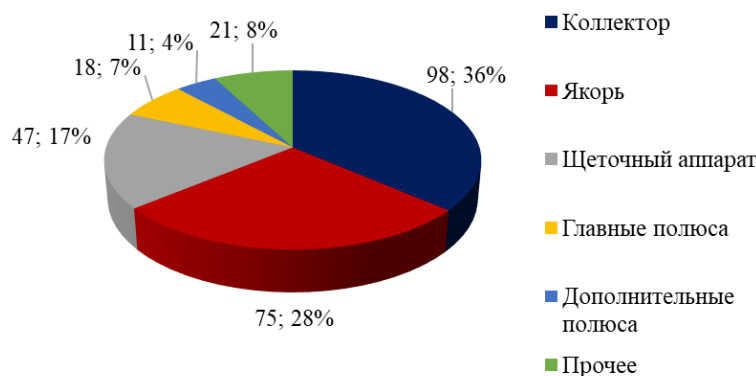


Рис. 3. Распределение отказов по элементам ТЭД электровозов за 2023 г.

Причинами возникновения кругового огня являются недопустимое искрение щеток (более $1\frac{1}{4}$ – $1\frac{1}{2}$ степени искрения) и превышение допустимого значения максимальных межламельных напряжений (19–21 В). Последствия сильного искрения на коллекторе ТЭД показаны на рис. 4. Как правило, искрение щеток обусловлено неудовлетворительным протеканием процесса коммутации, на который огромное влияние оказывает величина небалансной ЭДС (Δe_p), зависящая от величины реактивной (e_p), коммутирующей (e_k) и трансформаторной ЭДС (e_k) [3].



Рис. 4. Последствия искрения на коллекторе ТЭД

Несмотря на то что при конструкционных испытаниях ТЭД добавочные полюса хорошо рассчитаны и отлажены, небалансная ЭДС в коммутируемых секциях все же возникает. Вызвано это тем, что индуктивность в коммутационной зоне, а следовательно, и коммутирующая ЭДС распределены по плавной кривой, а реактивная ЭДС – по ступенчатой [4–6]. Этот дисбаланс тем больше, чем с большим током работает ТЭД. В связи с этим А.Б. Иоффе предложил критерий в виде фактора искрения ($\Phi_{и}$), который позволяет сделать заключение о допустимой величине Δe_p [6].

Фактор искрения оценивается по формуле

$$\Phi_{и} = \left(\frac{40}{D_k}\right)^{1,5} \times \frac{L_c \times i_k^2 \times v_k}{2 \times t_k \times L_{щ}}, \quad (1)$$

где D_k – диаметр коллектора, мм; L_c – индуктивность секции, Гн; v_k – окружная скорость коллектора в номинальном режиме, м/с; t_k – коллекторное деление, пересчитанное на окружность якоря, мм; i_k – ток в короткозамкнутой секции якоря, который определяется по формуле

$$i_k = \frac{(e_p - e_k) + \kappa_p \times e_p}{R_{щ} + r_c}, \quad (2)$$

где $R_{щ}$ – сопротивление контакта «щетка – коллектор», Ом; r_c – активное сопротивление секции, Ом; κ_p – коэффициент, оценивающий нескомпенсированную часть реактивной ЭДС в долях от полного значения e_p , определяется по формуле

$$\kappa_p = \frac{e_p - e_k}{e_p}. \quad (3)$$

Чем больше величина Δe_p , тем больше ток в короткозамкнутой секции якоря, следовательно, фактор искрения увеличивается квадратично.

Еще одной причиной отказа элементов ТЭД является пробой изоляции, который может быть связан с превышением температуры обмоток двигателя. Предположительно, температура обмоток посредством алгоритмов микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД) определяется расчетным путем по формуле [7, 8]

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 - \exp \left(-\frac{\Delta t}{T} \right) \right) + \tau_0 \exp \left(-\frac{\Delta t}{T} \right), \quad (4)$$

где τ_{∞} – установившееся превышение температуры обмотки ТЭД над температурой окружающей среды при данном режиме работы; τ_0 – начальное превышение температуры обмотки; Δt – время между замерами; T – постоянная времени нагрева, равная отношению теплоемкости ТЭД к его теплоотдаче.

При достижении температуры обмоток ТЭД или сглаживающего реактора (СР) порогового значения, а именно: СР 180 °С, главные и дополнительные полюса 150 °С, якорная обмотка 140 °С, на блок индикации на панели управления выводится предупреждение о перегреве данного узла. На основе этого предупреждения машинист должен снизить ток якоря ТЭД. При достижении предельного значения температуры, а именно: СР 190 °С, главные и дополнительные полюса 155 °С, якорная обмотка 145 °С, и ее сохранении в течение 10 с, МСУД автоматически ограничивает токи ТЭД до значения номинального тока длительного режима, равного 810 А.

В свою очередь, расчетный метод определения температуры не учитывает многие факторы, например изменение мощности и тока ТЭД, вызывающее различную интенсивность нагревания деталей, взаимное влияние нагрева одних элементов ТЭД на другие, условия вентиляции и т. д., в связи с чем фактическая температура может быть совсем иной, что было неоднократно доказано при опытных поездках [7, 9]. Неверное определение температуры нагрева обмоток ТЭД может привести к определенным последствиям:

– если алгоритм определяет температуру больше, чем действительное значение, это приводит к активации защитных алгоритмов, которые заложены в МСУД, а следовательно, к излишним простоям локомотива;

– если алгоритм определяет температуру меньше, чем действительное значение, в результате накопительного эффекта это может привести к пробое изоляции тяговых двигателей.

Совершенствование методов контроля состояния тягового электродвигателя при его эксплуатации

Для совершенствования работы ТЭД и преждевременного выявления его неисправности предлагается оснастить ТЭД дополнительными датчиками, которые способны при эксплуатации электровоза обнаружить возникновение искрения коллекторно-щеточного аппарата (КЩА) и напрямую определить температуру нагрева обмоток ТЭД. На рис. 5 представлены места установки дополнительных датчиков в ТЭД.

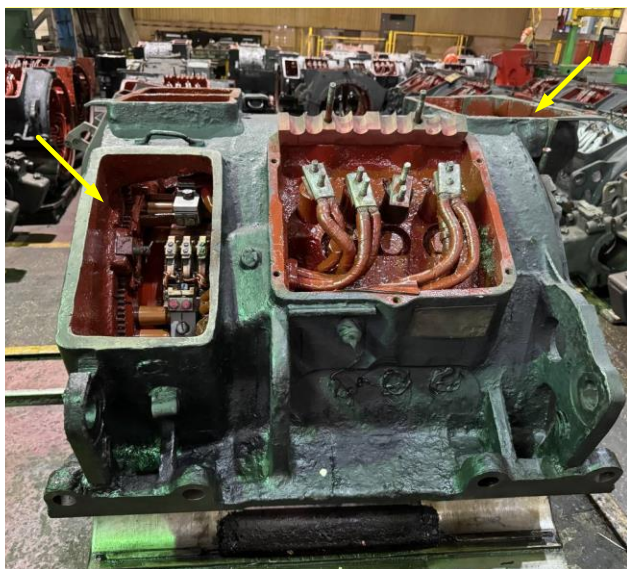


Рис. 5. Места установки дополнительных датчиков для контроля работы ТЭД

Предлагается в отверстие смотрового люка ТЭД установить датчик сигнализатора искрения, который позволит выявить возникновение искрения при эксплуатации электровоза и согласно алгоритму управления передать информацию на МСУД, что даст возможность машинисту скорректировать нагрузку на ТЭД и не допустить круговой огонь.

С целью более точного определения нагрева предлагается использовать температурные датчики для прямого измерения температуры обмоток ТЭД. Это позволит получать актуальные данные о температуре непосредственно в процессе работы агрегата, что особенно важно для предотвращения перегрева и обеспечения безопасности эксплуатации [10].

Применение температурных датчиков позволит более точно контролировать температурный режим работы ТЭД, что будет способствовать увеличению срока службы оборудования и снижению риска выхода его из строя. Это особенно актуально для ТЭД, работающих в условиях повышенных нагрузок и требующих особого внимания к контролю температуры в условиях непрерывно растущих на него нагрузок из-за увеличения массы состава.

Температурные датчики могут быть установлены в различных частях обмоток ТЭД, обеспечивая непрерывный мониторинг температуры. Из расшифровки данных МСУД следует, что наибольший нагрев наблюдается в обмотке дополнительных полюсов и якоре ТЭД, поэтому необходимо установить два датчика. В роли температурного датчика может выступать термопара или ИК-пирометр, технические характеристики и габаритные размеры которого будут определены в процессе проектирования и опытной эксплуатации.

Температурный датчик, измеряющий обмотку ДП, предлагается установить в воздухозаборном отверстии. Возле смотрового окна, рядом с клеммной коробкой предлагается установить датчик для измерения температуры якорной обмотки.

Принцип работы по определению температуры нагрева обмоток ТЭД следующий: с ТЭД на оптический датчик поступает поток излучения, который через оптическую систему и инфракрасный фильтр передается на фотоэлектрический приемник с системой тестирования и преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный температуре. С контроллера (микропроцессорный электронный блок) температура нагрева передается на МСУД. Если температура превышает предельно допустимую температуру, то МСУД отключает ТЭД. Контроллер получает питание от шкафа питания и через оптоволокно питает оптический датчик.

Питание на оптический датчик подаётся от шкафа питания. Данные о температуре ТЭД передаются через оптоволокно, что обеспечивает их надёжную передачу и защиту от электромагнитных помех. Оптоволокно также позволяет разместить датчик на безопасном расстоянии от источника тепла, что повышает точность измерений и продлевает срок службы оборудования.

Использование температурных датчиков является эффективным способом повышения надёжности и безопасности эксплуатации ТЭД, а также способствует оптимизации их работы и снижению затрат на обслуживание и ремонт.

На рис. 6 представлена структурная схема работы теплового датчика (ИК-пирометра).

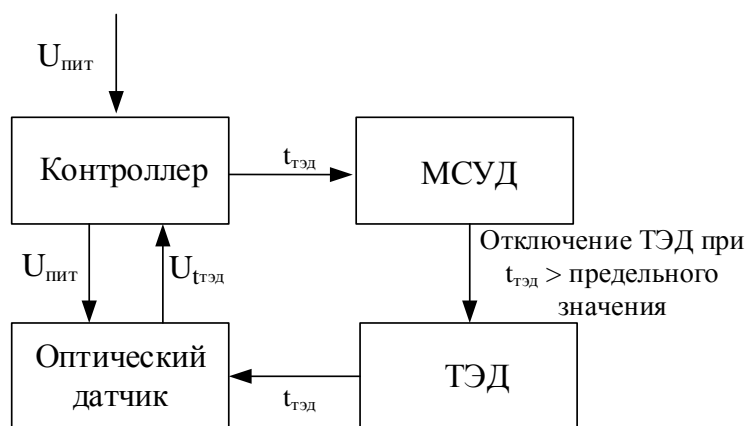


Рис. 6. Структурная схема работы ИК-пирометра

Заключение

Таким образом, проведенный анализ работы ТЭД электровоза серии «Ермак» показывает, что наибольшее количество отказов его элементов приходится на коллекторно-щеточный аппарат по причине возникновения переброса электрической дуги и пробоя изоляции. В связи с увеличением грузопотока на Восточном полигоне нагрузки на ТЭД увеличиваются, поэтому необходимо внедрять технические решения, которые способны увеличить ресурс его работы. Предлагается оснастить ТЭД дополнительными датчиками – сигнализатором искрения и температурными датчиками, что позволит:

- своевременно выявлять возникающее искрение КЩА и не допускать возникновения кругового огня;
- напрямую измерять температуру обмоток ТЭД, что исключит ложное срабатывание МСУД и сократит количество случаев пробоя изоляции.

Список литературы

- 1 Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : утверждена распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 г. № 466р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 27.11.2024).
- 2 Сдвоенные тяжеловесные. По Восточному полигону успешно проследовали десятки поездов массой 14200 тонн // Гудок. – 2022. – № 10.
- 3 Возникновение трансформаторной ЭДС в секциях якоря тягового электродвигателя электровоза переменного тока в режимах полного и ослабленного поля и пути ее снижения / Т. В. Волчек, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков, С. Г. Шрамко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (77). – С. 41–48 – ISSN 0201-727X.
- 4 **Находкин, М. Д.** Проектирование тяговых электрических машин / М. Д. Находкин. – Москва : Транспорт, 1976. – 623 с.
- 5 **Курбасов, А. С.** Повышение работоспособности тяговых электродвигателей / А. С. Курбасов. – Москва : Транспорт, 1977. – 222 с.
- 6 **Захарченко, Д. Д.** Тяговые электрические машины и трансформаторы : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Д. Д. Захарченко. – Москва : Транспорт, 1979. – 303 с.
- 7 Оптимизация алгоритмов системы управления электровозов 3ЭС5К с поосным регулированием силы тяги / М. А. Слепцов, И. П. Васильев, С. А. Старовойтов, И. Ю. Мартынюк // Известия Петербургского университета путей сообщения. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 366–377. – ISSN 1815-588X.
- 8 **Розенфельд, В. Е.** Теория электрической тяги : учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1993. – 328 с.
- 9 **Аганов, Р. А.** Методика теплового расчета обмотки якоря тягового электродвигателя электропоездов и непосредственный контроль температуры

References

- 1 Long-term development program of JSC "Russian Railways" until 2025 : approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated 03/19/2019 No. 466r. – URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf> (date of access: 11/27/2024).
- 2 Double heavyweight. Dozens of trains weighing 14,200 tons successfully passed through the Eastern polygon // Gudok. – 2022. – No. 10.
- 3 The emergence of transformer EMF in the armature sections of the traction electric motor of an alternating current electric locomotive in full and attenuated field modes and ways to reduce it / T. V. Volchek, O. V. Melnichenko, A. O. Linkov, S. G. Shramko // Bulletin of the Rostov State University of Railways. – 2020. – No. 1 (77). – P. 41–48 – ISSN 0201-727X.
- 4 **Nakhodkin, M. D.** Designing traction electric machines / M. D. Nakhodkin. – Moscow : Transport, 1976. – 623 p.
- 5 **Kurbasov, A. S.** Improving the efficiency of traction electric motors / A. S. Kurbasov. – Moscow : Transport, 1977. – 222 p.
- 6 **Zakharchenko, D. D.** Traction electric machines and transformers : a textbook for higher education institutions of railway transport / D. D. Zakharchenko. – Moscow : Transport, 1979. – 303 p.
- 7 Optimization of algorithms for the control system of 3ES5K electric locomotives with axial traction control / M. A. Sleptsov, I. P. Vasiliev, S. A. Starovoytov, I. Y. Martynyuk // Proceedings of Petersburg Transport University. – Saint Petersburg : PGUPS, 2020. – Vol. 17. – Issue 3. – P. 366–377. – ISSN 1815-588X.
- 8 **Rosenfeld, V. E.** Theory of electric traction : a textbook for higher education institutions of railway transport / V. E. Rosenfeld, I. P. Isaev, N. N. Sidorov // 2nd ed., revised and enlarged. Moscow : Transport, 1993. – 328 p.
- 9 **Aganov, R. A.** Methodology of thermal calculation of the armature winding of a traction electric

якоря с помощью контактного датчика / Р. А. Аганов, В. В. Михайлов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 2. – С. 48–52. – ISSN 0201-727X.

10 **Волчек, Т. В.** Методы определения температуры нагрева обмоток тяговых электродвигателей электровозов / Т. В. Волчек, Р. В. Волчек // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Чита : Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО ИрГУПС, 2022. – Т. 1. – С. 15–19.

motor of electric trains and direct control of the armature temperature using a contact sensor / R. A. Aganov, V. V. Mikhailov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2012. – No. 2. – P. 48–52. – ISSN 0201-727X.

10 **Volchek, T. V.** Methods for determining the heating temperature of windings of traction electric motors of electric locomotives / T. V. Volchek, R. V. Volchek // Education – Science – Production : Materials of the VI All-Russian scientific and practical conference (with international participation). – Chita : Zabaikalsky Institute of Railway Transport – branch of FSBEI HE IrSTU, 2022. – Vol. 1. – P. 15–19.

T. V. Volchek, V. S. Tomilov

IMPROVEMENT OF METHODS FOR MONITORING THE CONDITION OF A COLLECTOR TRACTION ELECTRIC MOTOR DURING ITS OPERATION

Abstract. The article considers the development prospects of the Eastern polygon, indicates the need to increase the service life of the equipment of the operated electric locomotives. The statistics of equipment failures of the Ermak series electric locomotives is presented. It is revealed that the greatest number of failures occurs in the traction electric motor, namely, in its collector-brush device due to the occurrence of an electric arc transfer and insulation breakdown. The reasons for their occurrence are considered. It is proposed to equip traction electric motors with additional sensors, namely: a spark alarm, which will allow timely detection of sparking in the collector-brush device and prevent the formation of a circular fire, and temperature sensors, which will allow direct determination of the winding temperature. The article presents the installation locations of these sensors.

Keywords: traction electric motor, switching, unbalanced EMF, sparking, temperature control, insulation breakdown, circular fire.

For citation: Volchek, T. V. Improvement of methods for monitoring the condition of a collector traction electric motor during its operation / T. V. Volchek, V. S. Tomilov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 202–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_202.

Сведения об авторах

Волчек Татьяна Витальевна

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), кафедра «Эксплуатация железных дорог», кандидат технических наук,
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

Томилов Вячеслав Станиславович

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), кафедра «Эксплуатация железных дорог», кандидат технических наук,
e-mail: tomilov_vs@krsk.irgups.ru

Information about the authors

Volchek Tatyana Vitalievna

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of the Irkutsk State Transport University (KrIRT IrSTU), Chair «Railway Operation», Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

Tomilov Vyacheslav Stanislavovich

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of the Irkutsk State Transport University, Chair «Railway Operation», Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: tomilov_vs@krsk.irgups.ru

Ю. И. Матяш, П. Б. Сергеев, А. Д. Родченко

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИННОВАЦИОННЫМ ГРУЗОВЫМ ВАГОНАМ

Аннотация. Для серийных грузовых вагонов в отечественной практике используется традиционная тормозная рычажная передача (ТРП) с односторонним нажатием композиционных тормозных колодок на колеса. Она обладает определенными недостатками. В статье отмечается, что в последнее время на сети железных дорог проводятся работы по совершенствованию перевозочного процесса путем использования инновационных грузовых вагонов (с осевой нагрузкой 25 тс и более и скорости до 120 км/ч), а также внедрением так называемых длинноставных поездов. В целях обеспечения безопасности движения и нормативных длин тормозных путей грузовых поездов с инновационными полувагонами предложена новая компоновка тормозной рычажной передачи грузового вагона с двусторонним нажатием тормозных колодок и одним тормозным цилиндром, действующим на одну тележку, а также подобраны величины плеч рычагов, удовлетворяющие условию обеспеченности поезда тормозными средствами. По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований видно, что фактический тормозной коэффициент грузового поезда с инновационными вагонами получился больше требуемого, следовательно, поезд обеспечен тормозными средствами.

Ключевые слова: тормоза, грузовой вагон, тормозной коэффициент, тормозная рычажная передача.

Для цитирования: Матяш, Ю. И. Совершенствование механической части тормозной системы применительно к инновационным грузовым вагонам / Ю. И. Матяш, П. Б. Сергеев, А. Д. Родченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 209–217. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_209.

Введение

Для серийных грузовых вагонов в отечественной практике используется традиционная тормозная рычажная передача с односторонним нажатием композиционных тормозных колодок на колеса [1, 2].

К основным недостаткам тормозной рычажной передачи с односторонним нажатием композиционных тормозных колодок на колеса относятся [3, 4]:

- вследствие наличия вертикальных, продольных и горизонтальных рычагов происходят изломы элементов рычажной передачи (триангелей, подвесок втулок и валиков);
- значительные размеры рычагов вызывают большое смещение колодки за грань колеса (> 10 мм), что затрудняет обеспечение требуемых усилий на тормозные колодки, и при этом не обеспечивается равномерность усилий нажатия колодок по тележкам, что приводит к снижению эффективности работы колодки. Для обеспечения большей надежности механической передачи вагона, начиная с 2005 года, по заданию Департамента вагонного хозяйства ОАО «РЖД» сотрудники ОАО «ВНИИЖТ» разработали систему с потележечным торможением [5]. Впоследствии на ряде предприятий («Уралвагонзавод», «Тихвинский вагоностроительный завод» и др.) применяют раздельное (потележечное) торможение, схема действия показана на рис. 1.

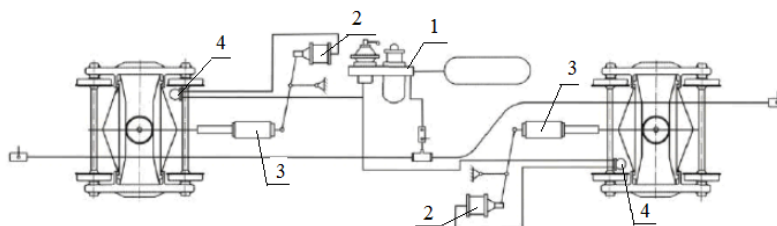


Рис. 1. Схема системы тормозов вагона с раздельным торможением и новым тормозным оборудованием:

1 – воздухораспределитель (ВР); 2 – тормозной цилиндр (ТЦ); 3 – регулятор ТРП; 4 – авторежим

Для надежной работы все элементы потележечной системы торможения располагают на раме грузового вагона.

Системы с потележечным торможением по сравнению с традиционной тормозной рычажной передачей имеют ряд преимуществ:

- высокий коэффициент силовых потерь на трение рычажной передачи за счет снижения числа шарниров в соединениях элементов;
- повышенная жесткость деталей и элементов передачи за счет уменьшения длины;
- более равномерное нажатие колодок на разных тележках;
- упрощённая регулировка рычажной передачи;
- улучшенная надежность работы из-за автономного воздействия тормозных цилиндров на тележках.

Наряду с этим следует отметить, что в последнее время на железных дорогах РФ выполняются работы по совершенствованию перевозочного процесса путем использования инновационных грузовых вагонов (с нагрузкой на одну ось 25 тс и более, для скорости до 120 км/ч), а также увеличения длины грузовых составов.

Однако очевидно, что при реализации указанных технических процессов проблемы, которые связаны с безопасностью движения длинносоставных грузовых поездов, серьезно усложняются, так как разрабатываемые тормозные системы вагонов должны обеспечить плавное снижение скорости этих составов и нормативную длину тормозного пути.

Для справки, в табл. 1. приведены примеры нормируемых значений тормозного пути для различных типов поездов в зависимости от скорости их движения и профиля пути [6–7].

Таблица 1

**Нормируемые значения тормозного пути для различных типов поездов
в зависимости от скорости движения поезда**

Тип поезда	Скорость в момент начала торможения V , км/ч	Нормируемый тормозной путь, м	
		$i_c \leq 6 \text{ ‰}$	$6 \text{ ‰} < i_c < 10 \text{ ‰}$
Грузовой	Менее 80	1000	1200
	80 – 90	1300	1500
	90 – 100	1600	2000
Пассажирский	Менее 100	1000	1200
	100 – 140	1200	1300
	140 – 160	1600	1700

Постановка задачи

Для обеспечения безопасности движения длинносоставных поездов, использующих инновационные вагоны, целесообразно сравнить нормативные значения тормозных путей для стандартного грузового состава и длинносоставного поезда (включающего 90 единиц инновационных вагонов, с осевой нагрузкой 25 тонн). С этой целью можно использовать выражения для оценки кинетической энергии ($E_{\text{тор}}$), возникающей при торможении сравниваемых типов грузовых составов.

$$E_{\text{тор}} = \frac{mV^2}{2} n,$$

где m – масса груженого вагона;
 V – скорость движения грузового вагона;
 n – количество вагонов в составе.

После подстановки численных значений видно, что значение кинетической энергии ($E_{\text{тор}}$) для длинносоставного поезда более чем в три раза превышает аналогичное значение для стандартного грузового подвижного состава.

Как видно, существующая система тормозной рычажной передачи с односторонним нажатием колодок грузового вагона не обеспечивает потребного тормозного коэффициента поезда.

Известно, что двухстороннее нажатие эффективно используется как на локомотивах, так и на пассажирских вагонах.

На рис. 2 представлено возможное технологическое решение по созданию тележки с двусторонним нажатием колодок на колесо. Оно состоит из системы тяг и рычагов, триангелей, траверс, башмаков с колодками, а также двух тормозных цилиндров, расположенных на наддрессорной балке.

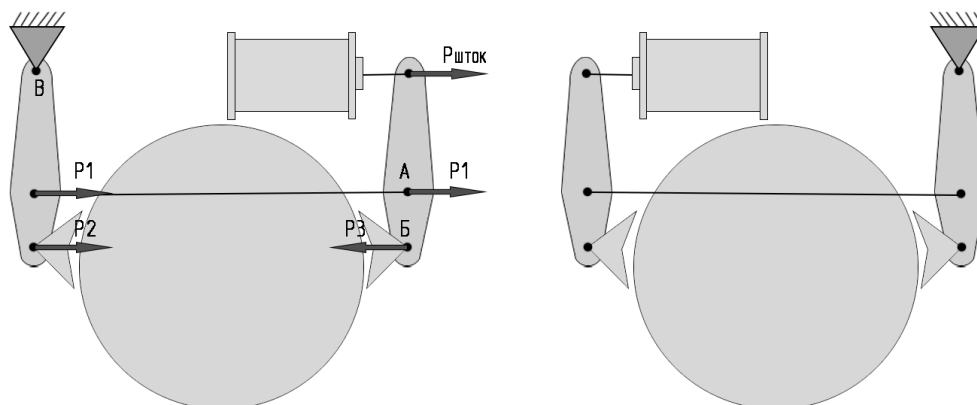


Рис. 2. Возможное технологическое решение по созданию тележки с двусторонним нажатием колодок на колесо

Действие тормозов тележки с двусторонним нажатием колодок на колесо происходит по известному принципу. При подаче воздуха под давлением в ТЦ, сначала под действием $P_{шток}$ прижимается первая колодка с силой P_3 , а затем в затяжке рычагов возникает сила P_1 , которая, передаваясь на второй рычаг, вызывает прижатие второй колодки с силой P_2 .

Предлагаемая система тормозной рычажной передачи

Принцип действия предлагаемой компоновки механического оборудования одной тележки с двусторонним нажатием и одним тормозным цилиндром заключается в следующем (рис. 3): тормозной цилиндр со встроенным авторегулятором наполняется воздухом, рычаг ab поворачивается относительно точки A , прижимая первую колодку. Точка B останавливается, и рычаг ab под действием силы $P_{шт}$, вращаясь относительно нее, при помощи продольной тяги тянет рычаг bc с силой P_2 , поворачивая его вокруг точки C и прижимая вторую колодку. Точка D останавливается, и по нижней продольной тяге появляется сила P_4 , которая передается на правую колесную пару, где вертикальный рычаг eg , вращаясь вокруг точки E , прижимает третью колодку. Точка F останавливается, и продольная тяга движется вправо под действием, появившейся силы P_6 . Эта сила поворачивает соответствующий рычаг ab относительно точки G и прижимает четвертую колодку.

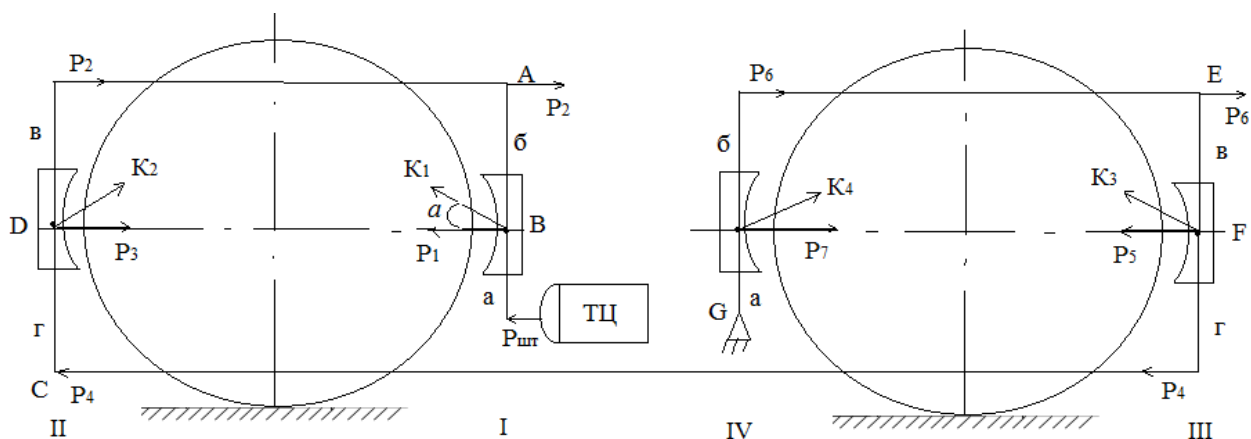


Рис. 3. Предлагаемая компоновка ТРП грузового вагона с нажатием колодок на колесо с двух сторон и одним тормозным цилиндром

Расчет предлагаемой компоновки тормозной рычажной передачи

Для того чтобы рассчитать данную компоновку тормозной рычажной передачи одной тележки грузового вагона с одним ТЦ и двусторонним нажатием колодок, для начала определим усилие $P_{шт}$,

которое появляется на штоке поршня при наполнении ТЦ сжатым воздухом [8].

Сила, реализуемая штоком ТЦ с площадью поршня F , (см^2) при диаметре $d_{т.ц}$:

$$P_{шт} = F \cdot P_{т.ц} \cdot \eta_{т.ц} - P_p - P_{пр} = 995 \cdot 2,77 \cdot 0,98 - 224,4 - 159 = 2249,37 \text{ кгс},$$

$$F = \frac{\pi d_{т.ц}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 35,6^2}{4} = 995 \text{ см}^2,$$

здесь $\eta_{т.ц}$ – коэффициент полезного действия тормозного цилиндра, $\eta_{т.ц} = 0,98$; $P_{т.ц} = 2,5 - 2,8$ – давление сжатого воздуха в ТЦ, $\text{кгс}/\text{см}^2$; $P_{пр}$ – усилие отпускной пружины тормозного цилиндра, кгс ;

P_p – усилие пружины ТРП, кгс ,

$$P_{пр} = P_0 + \mathcal{J}l = 159 + 6,54 \cdot 10 = 224,4 \text{ кгс},$$

здесь $P_0 = 80 \text{ кгс}$ – предварительное натяжение пружины в ТЦ; $\mathcal{J} = 6,54 \text{ кгс}/\text{см}$ – жесткость отпускной пружины; l – ход поршня ТЦ, см ,

$$P_p = k(N_p + \mathcal{J}_p l_p) \frac{\bar{b}}{a} = 0,32(180 + 15 \cdot 1,5) \frac{355}{145} = 159 \text{ кгс},$$

здесь $k = 0,32$ – коэффициент (учитывает тип привода ТРП); $N_p = 180 \text{ кгс}$ – реактивное усилие пружины; a, \bar{b} – длина плеч ведущего рычага, мм ; $\mathcal{J}_p = 15 \text{ кгс}/\text{см}$ – жесткость пружины регулятора; $l_p = 1,5 \text{ см}$ – величина сжатия пружины автоматического регулятора.

Общее передаточное число ТРП всего вагона определится как:

$$n_{общ} = (n_1 + n_2 + \dots + n_i) \cos \alpha = 4 \cdot \frac{a}{\bar{b}} \cdot \frac{\bar{b} + z}{z} = 4 \cdot \frac{145}{355} \cdot \frac{400 + 160}{160} \cos 10^\circ = 5,63,$$

где n_1, n_2, \dots, n_i – передаточные числа к i -й колодке;

α – угол подвески колодки к колесу для отхода колодки от него под собственным весом при отпуске тормоза, который для вагонов составляет 10° .

Рассмотрев равновесие рычагов, входящих в механическую систему тормозной рычажной передачи и передающих усилие от ТЦ на колодки, приравняем к нулю суммы моментов сил относительно точек поворота этих рычагов, найдем усилия, действующие в системе предлагаемой компоновки тормозной рычажной передачи вагона с одним тормозным цилиндром.

Примем: $a = 145 \text{ мм}$; $\bar{b} = 355 \text{ мм}$; $\bar{b} = 400 \text{ мм}$; $z = 160 \text{ мм}$; $P_{шт} = 2249,37 \text{ кгс}$.

Последовательно рассмотрим равновесное положение рычагов относительно ключевых точек:

Суммарный момент относительно точки A :

$$\sum M(A) = 0 \Rightarrow P_{шт}(a + \bar{b}) = P_1 \bar{b} \Rightarrow P_1 = 3168 \text{ кгс}. \quad (1)$$

Суммарный момент сил относительно точки B :

$$\sum M(B) = 0 \Rightarrow P_{шт} a = P_2 \bar{b} \Rightarrow P_2 = 919 \text{ кгс}. \quad (2)$$

Суммарный момент относительно точки C :

$$\sum M(C) = 0 \Rightarrow P_2(\bar{b} + z) = P_3 z \Rightarrow P_3 = 3216,5 \text{ кгс}, \quad (3)$$

Суммарный момент сил относительно точки D :

$$\sum M(D) = 0 \Rightarrow P_2 \bar{b} = P_4 z \Rightarrow P_4 = 2297,5 \text{ кгс},$$

Суммарный момент относительно точки E :

$$\sum M(E) = 0 \Rightarrow P_4(\epsilon + z) = P_5\epsilon \Rightarrow P_5 = 3216,5 \text{ кгс},$$

Суммарный момент сил относительно точки F :

$$\sum M(F) = 0 \Rightarrow P_4z = P_6\epsilon \Rightarrow P_6 = 919 \text{ кгс},$$

Суммарный момент относительно точки G :

$$\sum M(G) = 0 \Rightarrow P_6(a + \delta) = P_7a \Rightarrow P_7 = 3169 \text{ кгс},$$

$$\begin{cases} K_1 = P_1 \cdot \cos 10^\circ = 3120 \text{ кгс}; \\ K_2 = P_3 \cdot \cos 10^\circ = 3168 \text{ кгс}; \\ K_3 = P_5 \cdot \cos 10^\circ = 3168 \text{ кгс}; \\ K_4 = P_7 \cdot \cos 10^\circ = 3121 \text{ кгс}. \end{cases}$$

Суммарное нажатие от одного тормозного цилиндра на тележке равно:

$$\sum K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 = 12577 \text{ кгс}.$$

Суммарное нажатие тормозных колодок всего четырехосного вагона равно:

$$\sum K_B = 12577 \cdot 2 = 25154 \text{ кгс}.$$

Тогда фактический тормозной коэффициент поезда условного восьмидесятиванного состава из груженых вагонов с расчетной массой 25 тонн на ось будет равен:

$$v_p^{(\Phi)} = \frac{\sum K_B}{Q_p} = \frac{25154 \cdot 80}{80 \cdot 100 \cdot 1000} = 0,25,$$

где $v_p^{(m)}$ – требуемый тормозной коэффициент поезда, $v_p^{(m)} = 0,28 - 0,33$.

Как видно, фактический тормозной коэффициент поезда получился меньше требуемого. Поезд считается обеспеченным тормозными средствами, когда выполняется условие:

$$v_p^{(\Phi)} \geq v_p^{(m)}.$$

Далее найдем длины плеч рычагов ТРП a и z (рис. 3) при сохранении длин плеч рычагов b и v , при которых тормозная эффективность состава будет обеспечена. Для этого вычислим необходимое суммарное нажатие колодок в условном составе, состоящем из восьмидесяти вагонов с нагрузкой 25 тонн на ось, движущегося на уклонах до 20 ‰:

$$v_p^{(\Phi)} = \frac{\sum K_c}{Q_p}.$$

Q'_p – вес всех вагонов в составе, $Q'_p = 8000$ тс.

$$v_p^{(\Phi)} = \frac{\sum K_B}{Q_p} = \frac{x \cdot 80}{80 \cdot 100 \cdot 1000} = 0,33 \Rightarrow x = 33000 \text{ кгс},$$

тогда, поделив полученное значение на восемь, получим требуемое усилие на одну пару колодок 4125 кгс.

Исходя из формулы (1) получим:

$$\frac{2249,37(a+b)}{b} = 4125 \text{ кгс} \Rightarrow a = 297 \text{ мм},$$

исходя из формулы (2) получим:

$$P_{ум} a = P_2 b \Rightarrow P_2 = 1881,9 \text{ кгс},$$

исходя из формулы (3) получим:

$$\frac{1881,9(\vartheta + \varepsilon)}{\varepsilon} = 4125 \text{ кгс} \Rightarrow \varepsilon = 336 \text{ мм},$$

тогда:

$$\sum M(C) = 0 \Rightarrow P_2(\vartheta + \varepsilon) = P_3 \varepsilon \Rightarrow P_3 = 4122 \text{ кгс},$$

$$\sum M(D) = 0 \Rightarrow P_2 \vartheta = P_4 \varepsilon \Rightarrow P_4 = 4131 \text{ кгс},$$

$$\sum M(E) = 0 \Rightarrow P_4(\vartheta + \varepsilon) = P_5 \varepsilon \Rightarrow P_5 = 4122 \text{ кгс},$$

$$\sum M(F) = 0 \Rightarrow P_4 \varepsilon = P_6 \vartheta \Rightarrow P_6 = 1881,9 \text{ кгс},$$

$$\sum M(G) = 0 \Rightarrow P_6(a+b) = P_7 a \Rightarrow P_7 = 3169 \text{ кгс},$$

$$\begin{cases} K_1 = P_1 \cdot \cos 10^\circ = 4068,2 \text{ кгс}; \\ K_2 = P_3 \cdot \cos 10^\circ = 4059,4 \text{ кгс}; \\ K_3 = P_5 \cdot \cos 10^\circ = 4059,4 \text{ кгс}; \\ K_4 = P_7 \cdot \cos 10^\circ = 4068,2 \text{ кгс}. \end{cases}$$

И тогда:

$$v_p^{(\Phi)} = \frac{\sum K_c}{Q_p} = \frac{32510,4 \cdot 80}{80 \cdot 100 \cdot 1000} = 0,325.$$

Как видно, фактический тормозной коэффициент грузового поезда с инновационными вагонами получился больше требуемого, следовательно, поезд обеспечен тормозными средствами.

В табл. 2 приводится техническая характеристика предлагаемой системы ТРП [9].

Таблица 2

Техническая характеристика тормозной системы

Передаточное число тормозной рычажной передачи	7,2
Давление воздуха в ТЦ, кгс/см ²	2,7
Нажатие тормозных колодок на ось колесной пары, тс	
действительное	6,8
расчетное	6,3
Расчетный тормозной коэффициент	0,325
Установочный выход штока, мм	65
Допустимый выход штока, мм	90
Масса, кг	260

Тормозная рычажная передача грузового вагона выполнена потележечно, с двухсторонним нажатием колодок от одного малогабаритного тормозного цилиндра с встроенным автоматическим регулятором выхода штока. Тормозной цилиндр установлен на кронштейне хребтовой балки вагона.

Шарнирные соединения рычажной передачи выполнены в виде валиков с закаленной поверхностью и запрессованных в отверстия сопрягаемых деталей втулок из высокомарганцовистой стали.

Выполнялись исследования по определению величин нажатия тормозных колодок на колесо при предлагаемой компоновке ТРП вагона, которые оказывают влияние на тормозную эффективность.

Измерялись фактические нажатия тормозных колодок на колесо при различных значениях давления в ТЦ, расстояние от колодки до колеса. Силы нажатия тормозных колодок, величины выхода штока тормозного цилиндра и давление воздуха в ТЦ измерялись при помощи датчиков передвижной установки СИТОВ. Результаты испытаний по определению нажатия тормозных колодок на колесо в зависимости от величины давления в тормозном цилиндре приведены на рис. 4.

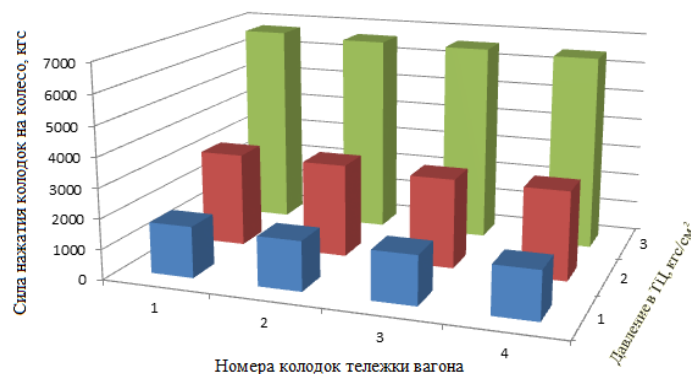


Рис. 4. Диаграмма зависимости силы нажатия тормозных колодок на колесо от величины давления в тормозном цилиндре (установочный выход штока ТЦ 65 мм)

Измерения сил нажатия тормозных колодок показали, что при выходе штока в пределах нормы и нормальном зазоре между колодкой и колесом (5–8 мм) разность в нажатии тормозных колодок в одной рычажной передаче, действующей на тележку от одного тормозного цилиндра, составляет не более 5 %.

При проведении испытаний не произошло ни одного случая заклинивания в шарнирных соединениях ТРП. Примененный малогабаритный тормозной цилиндр со встроенным автоматическим регулятором выхода штока позволил автоматически устанавливать величину выхода штока поршня в пределах, обеспечивающих нормальность и постоянство зазоров между тормозными колодками и поверхностью катания колесных пар по мере их износа. Предложенная компоновка ТРП подтвердила свою эффективность и высокий (0,95) коэффициент полезного действия.

Выводы

Таким образом, предложена схема работы тормозной рычажной передачи четырехосного вагона с двусторонним нажатием тормозных колодок и одним тормозным цилиндром на каждой тележке, и подобраны величины плеч рычагов, удовлетворяющие условию обеспеченности грузового поезда тормозными средствами.

Список литературы

- 1 **Афонин, Г. С.** Устройство и эксплуатация тормозного оборудования подвижного состава / Г. С. Афонин, В. Н. Барщенков, Н. В. Кондратьев. – Москва : Академия, 2006. – 304 с. – ISBN 978-5-0054-1163-1.
- 2 **Венцевич, Л. Е.** Тормоза подвижного состава железных дорог / Л. Е. Венцевич. – Москва : ГОУ «УМЦ ЖДТ», 2010. – 559 с. – ISBN 978-5-89035-701-4.

References

- 1 **Afonin, G. S.** Installation and operation of rolling stock braking equipment / G. S. Afonin, V. N. Barschenkov, N. V. Kondratyev. – Moscow : Akademiya, 2006. – 304 p. – ISBN 978-5-0054-1163-1.
- 2 **Ventsevich, L. E.** Brakes of railway rolling stock / L. E. Ventsevich. – Moscow : State Educational Institution «UMTs ZhDT», 2010. – 559 p. – ISBN 978-5-89035-701-4.

3 **Крылов, В. И.** Тормозное оборудование железнодорожного подвижного состава / В. И. Крылов. – Москва : Транспорт, 1989. – 487 с.

4 **Гундорова, Е. П.** Технические средства железных дорог : учебник для техникумов и колледжей ж.д. транспорта / Е. П. Гундорова. – Москва : Маршрут, 2003. – 496 с. – ISBN 5-89035-078-1.

5 **Асадченко, В. Р.** Автоматические тормоза подвижного состава / В. Р. Асадченко. – Москва : Маршрут, 2006. – 392 с. – ISBN 5-89035-275-X.

6 Вагоны : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Л. А. Шадур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский [и др.]. – Москва : Транспорт, 1980. – 439 с.

7 **Крылов, В. И.** Справочник по тормозам / В. И. Крылов, П. Н. Астахов, П. Т. Гребенюк. – Москва : Транспорт, 1975. – 185 с.

8 **Иноземцев, В. Г.** Правила тяговых расчетов для поездной работы / В. Г. Иноземцев. – Москва : Транспорт, 1985. – 122 с.

9 **Балон, Л. В.** Эффективность тормозной рычажной передачи грузопассажирского электровоза ДС3 / Л. В. Балон, И. А. Яицков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2003. – № 1. – С. 26–31. – ISSN 0201-727X.

3 **Krylov, V. I.** Braking equipment of railway rolling stock / V. I. Krylov. – Moscow : Transport, 1989. – 487 p.

4 **Gundorova, E. P.** Technical means of railways : a textbook for technical schools and colleges of railway transport / E. P. Gundorova. – Moscow : Marshrut, 2003. – 496 p. – ISBN 5-89035-078-1.

5 **Asadchenko, V. R.** Automatic brakes of rolling stock / V. R. Asadchenko. – Moscow : Marshrut, 2006. – 392 p. – ISBN 5-89035-275-X.

6 Wagons : A textbook for high schools of railway transport / L. A. Shadur, I. I. Chelnokov, L. N. Nikolsky [at al.]. – Moscow : Transport, 1980. – 439 p.

7 **Krylov, V. I.** Handbook of brakes / V. I. Krylov, P. N. Astakhov, P. T. Grebenyuk. – Moscow : Transport, 1975. – 185 p.

8 **Inozemtsev, V. G.** Rules of traction calculations for train operation / V. G. Inozemtsev. – Moscow : Transport, 1985. – 122 p.

9 **Balon, L. V.** Efficiency of the brake lever transmission of the DS3 freight and passenger electric locomotive / L. V. Balon, I. A. Yaitskov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2003. – No. 1. – P. 26–31. – ISSN 0201-727X.

Yu. I. Matyash, P. B. Sergeev, A. D. Rodchenko

IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL PART OF THE BRAKING SYSTEM AS APPLIED TO INNOVATIVE FREIGHT CARS

Abstract. In domestic practice, a traditional brake lever transmission (BLT) with one-sided pressing of composite brake shoes on the wheels is used for serial freight cars. It has certain disadvantages. The article notes that recently, work has been carried out on the railway network to improve the transportation process by using innovative freight cars (with an axle load of 25 tf or more and a speed of up to 120 km/h), as well as by introducing so-called long-component trains. In order to ensure traffic safety and standard lengths of braking paths of freight trains with innovative gondola cars, a new layout of the brake lever transmission of a freight car with two-sided pressing of brake shoes and one brake cylinder acting on one bogie is proposed, and the values of the lever arms are selected that satisfy the condition of providing the train with braking means. Based on the results of the theoretical and experimental studies, it is clear that the actual braking coefficient of a freight train with innovative cars turned out to be greater than required, therefore, the train is provided with braking means.

Keywords: brakes, freight car, braking coefficient, brake lever transmission.

For citation: *Matyash, Yu. I.* Improvement of the mechanical part of the braking system as applied to innovative freight cars / Yu. I. Matyash, P. B. Sergeev, A. D. Rodchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 209–217. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_209.

Сведения об авторах**Матяш Юрий Иванович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: matiash41@mail.ru

Родченко Александр Дмитриевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Rodchenko_57@mail.ru

Сергеев Павел Борисович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: sergeevpb78@mail.ru

Information about the authors**Matyash Yuriy Ivanovich**

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Carriages and Carriage Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: matiash41@mail.ru

Rodchenko Aleksandr Dmitrievich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Carriages and Carriage Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Rodchenko_57@mail.ru

Sergeev Pavel Borisovich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Carriages and Carriage Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: sergeevpb78@mail.ru

П. А. Поляков, И. А. Яицков, О. А. Ворон, И. П. Талипова, А. А. Кузькин, Н. Р. Габдрахманов

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛЯ ДИСКА НА ФОРМИРОВАНИЕ КОНТАКТИРУЮЩИХ СИЛ НА РАБОЧИХ ПЛОЩАДКАХ ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА

Аннотация. Представлена оценка влияния параметров, характеризующих макронеровность на поверхности тормозного диска на распределение контактирующих сил в системе «полиприжимающий механизм – тормозная колодка – тормозной диск» и развиваемый тормозной диск. В качестве основных параметров, характеризующих макронеровность на рабочих поверхностях тормозного диска, были выбраны углы наклона реального профиля поверхности в тангенциальном и радиальном направлениях. Были получены зависимости для расчета положения центра давления в тангенциальном и радиальном направлениях в системе «полиприжимающий механизм – тормозная колодка – тормозной диск» с учетом углов наклона профиля в двух направлениях. Для оценки влияния углов наклона на распределение сил по площади контактирующих поверхностей тормоза были построены твердотельные модели тормозных устройств с моделируемыми реальными профилями рабочих поверхностей диска. В качестве объектов моделирования использовались поверхности диска с циклическими макронеровностями и с одной областью. При взаимодействии рабочих пар тормозного устройства с одной макронеровностью на поверхности происходила инверсия распределенных контактирующих сил, в сравнении с диском, на поверхности которого были циклические макронеровности.

Ключевые слова: тормозное устройство, центр давления, угол наклона реального профиля, макронеровность, полиприжимающий механизм.

Для цитирования: Влияние геометрии профиля диска на формирование контактирующих сил на рабочих площадках тормозного устройства / П. А. Поляков, И. А. Яицков, О. А. Ворон [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 218–228. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_218.

Введение

В исследовании [1] проводилась оценка параметров влияния для разработки прогнозной модели ресурса тормозного диска при термомеханическом износе. Оценка критериев эффективности взаимодействия пар фрикционного узла происходила с помощью влияния удельных нагрузок, скорости начала торможения и достигаемой температуры. В работе [2] приводится исследование, в котором, увеличивая количество колодок в два раза в барабанно-колодочном тормозе, снижают усилие прижатия колодок у поверхности барабана при сохранении тормозного момента как в серийном тормозе. В работе [3] представлена оценка напряженно-деформированного состояния тормозных дисков с перфорациями и отверстиями. В статье [4] приводится определение коэффициента трения на парах трения тормоза, при котором не происходит скатывание автомобиля со склона при испытаниях стояночного тормоза. В исследовании [5] приводятся рекомендации по конструктивному и технологическому обеспечению тормозного устройства для совершенствования эффективности торможения. В работе [6] исследуется вопрос степени деформирования относительно соотношения исходных микронеровностей к номинальной поверхности тормозного диска. В статье [7] приводится оценка теплонпряженного состояния дисков, изготавливаемых из различных материалов, основное внимание уделялось тормозным дискам, выполненным из композитов AL-ММС.

Проведенный анализ литературных источников показал, что основное внимание уделяется применению различных материалов при изготовлении тормозных дисков. Напряженно-деформированное состояние оценивается в статическом состоянии, что не учитывает скорость скольжения контактирующих площадок относительно друг друга. Из этих сделанных выводов необходимо сформулировать цель исследования, заключающуюся в оценке влияния появляющихся макронеровностей на развиваемый тормозной момент.

Основная часть

Согласно теоретическим догматам качество геометрии поверхности оценивается по параметрам макронеровности, волнистости, шероховатости и субмикронеровности. Согласно проведенному анализу литературных источников первые два показателя влияют на комфорт управления и на виброустойчивость всего устройства в целом. Однако необходимо отметить, что волнистость поверхности оказывает влияние на процесс торможения, постоянно генерируя поперечные и продольные вынужденные линейные и угловые колебания колодки. Волнистость рабочей поверхности тормозного диска может быть свидетельством неправильной технологии изготовления или следствием длительной эксплуатации тормозного устройства транспортного средства. Для оценки влияния волнистости поверхности диска на процесс торможения необходимо определить критерии, которыми возможно численно это оценить.

При проектировании тормозного диска началом отсчета считается номинальный профиль рабочей поверхности, к которому будет прижиматься колодка, что позволит создать тормозной момент. Но в процессе изготовления и последующей эксплуатации тормозного диска реальный профиль поверхности диска отличается от номинального. Кривую, образующую поверхность очень сложно описать математически, поэтому прибегают к использованию аппроксимирующей кривой. Если использовать аппроксимирующую кривую для описания реального профиля поверхности тормозного диска в двух плоскостях тангенциальной (XOZ) и радиальной (YOZ), то образующими этих плоскостей являются две прямые реального профиля поверхности, задаваемые уравнениями:

$$m_{xz} = \hat{\alpha}_{xz} + \hat{\beta}_{xz} (x_i - \bar{x}), \quad (1)$$

$$m_{yz} = \hat{\alpha}_{yz} + \hat{\beta}_{yz} (y_i - \bar{y}), \quad (2)$$

где $\hat{\alpha}_{xz}$, $\hat{\alpha}_{yz}$ – ординаты средних точек этих линий в тангенциальной и радиальной плоскостях диска;

$\hat{\beta}_{xz}$, $\hat{\beta}_{yz}$ – угловые коэффициенты;

$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ – координаты средних точек в тангенциальной и радиальной плоскостях

диска.

Однако при оценке линейных зависимостей задача состоит в максимальном приближении аппроксимирующих кривых к реальному профилю поверхности диска. Для достижения этого условия необходимо приравнять частные производные по параметрам $\hat{\alpha}_{xz}$, $\hat{\alpha}_{yz}$, $\hat{\beta}_{xz}$, $\hat{\beta}_{yz}$ суммы квадратов отклонений $\sum_{i=1}^n (z_i - \hat{\alpha}_{xz} - \hat{\beta}_{xz} x_i)^2$, $\sum_{i=1}^n (z_i - \hat{\alpha}_{yz} - \hat{\beta}_{yz} y_i)^2$. В результате

$$\hat{\alpha}_{xz} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{ix}}{n}; \quad \hat{\beta}_{xz} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{ix} x_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n z_{ix} \right)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (3)$$

$$\hat{\alpha}_{yz} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{iy}}{n}; \quad \hat{\beta}_{yz} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{iy} y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n z_{iy} \right)}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}, \quad (4)$$

где z_{ix} , z_{iy} – ординаты i -й точки в тангенциальной и радиальной плоскостях.

Обозначим аппроксимирующую прямую поверхности реального профиля тормозного диска буквами O_1X' для на плоскости XOZ и O_2Y' для плоскости YOZ . Перпендикуляры к этим направляющим

будут обозначены O_1Z' и O_2Z'' для указанных плоскостей. Координаты в новой системе координат обозначены x'_i, y'_i, z'_i, z''_i . Аппроксимирующие прямые поверхности реального профиля наклонены относительно прямых проекций номинального профиля на углы φ_{xz} и φ_{yz} при выполнении следующих условий:

$$\sum_{i=1}^n (z'_i)^2 = f(\varphi_{xz}) \rightarrow \min, \quad \sum_{i=1}^n (z''_i)^2 = f(\varphi_{yz}) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Для определения значений углов наклона аппроксимирующих прямых поверхности реального профиля необходимо переписать условие (5) в другой форме:

$$\sum_{i=1}^n z'_i \frac{dz'_i}{d\varphi_{xz}} = 0, \quad \sum_{i=1}^n z''_i \frac{dz''_i}{d\varphi_{yz}} = 0. \quad (6)$$

Для упрощения теоретического обоснования сместим центры систем координат XOZ в точку O_1 с координатами \bar{x} и \bar{z}_x , аналогично сделаем смещение координат в плоскости YOZ в точку O_2 по координатам \bar{y} и \bar{z}_y (рис. 1).

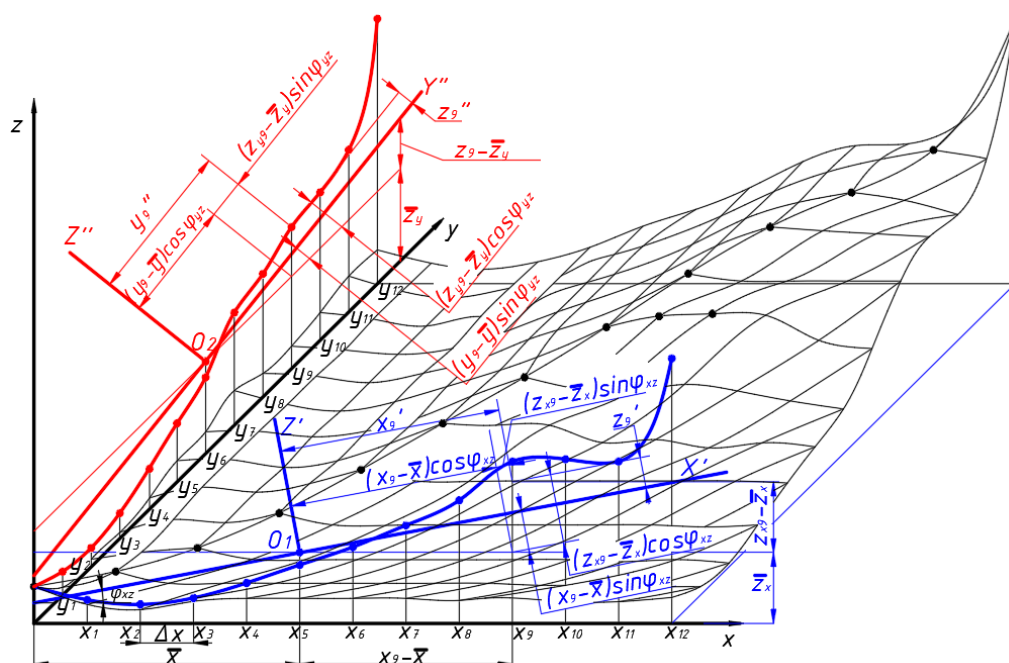


Рис. 1. Параметры проекций аппроксимирующих прямых поверхности реального профиля тормозного диска по плоскостям XOZ и YOZ

С учетом смещения центров системы координат в точки O_1 и O_2 связь между координатами аппроксимирующих прямых и декартовой системой XYZ определяется следующими выражениями:

$$x'_i = (x_i - \bar{x}) \cos \varphi_{xz} + (z_{xi} - \bar{z}_x) \sin \varphi_{xz}, \quad z'_i = -(x_i - \bar{x}) \sin \varphi_{xz} + (z_{xi} - \bar{z}_x) \cos \varphi_{xz}, \quad (7)$$

$$y'_i = (y_i - \bar{y}) \cos \varphi_{yz} + (z_{yi} - \bar{z}_y) \sin \varphi_{yz}, \quad z''_i = -(y_i - \bar{y}) \sin \varphi_{yz} + (z_{yi} - \bar{z}_y) \cos \varphi_{yz}. \quad (8)$$

Дифференцируя координаты высот реального профиля в двух плоскостях XOZ и YOZ по углам наклона аппроксимирующих прямых, получим:

$$\frac{dz'_i}{d\varphi_{xz}} = -(x_i - \bar{x}) \cos \varphi_{xz} - (z_{xi} - \bar{z}_x) \sin \varphi_{xz} = -x'_i, \quad (9)$$

$$\frac{dz_i''}{d\varphi_{yz}} = -(y_i - \bar{y}) \cos \varphi_{yz} - (z_{yi} - \bar{z}_y) \sin \varphi_{yz} = -y_i' \quad (10)$$

Подставим значения координат (7), (8), (9) и (10) в условие (6) и преобразуем:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n [-(x_i - \bar{x}) \sin \varphi_{xz} + (z_{xi} - \bar{z}_x) \cos \varphi_{xz}] \times [-(x_i - \bar{x}) \cos \varphi_{xz} - (z_{xi} - \bar{z}_x) \sin \varphi_{xz}] = \\ & = (\cos^2 \varphi_{xz} - \sin^2 \varphi_{xz}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(z_{xi} - \bar{z}_x) - \sin \varphi_{xz} \cos \varphi_{xz} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})^2 - (z_{xi} - \bar{z}_x)^2] = 0, \\ & \sum_{i=1}^n [-(y_i - \bar{y}) \sin \varphi_{yz} + (z_{yi} - \bar{z}_y) \cos \varphi_{yz}] \times [-(y_i - \bar{y}) \cos \varphi_{yz} - (z_{yi} - \bar{z}_y) \sin \varphi_{yz}] = \\ & = (\cos^2 \varphi_{yz} - \sin^2 \varphi_{yz}) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_{yi} - \bar{z}_y) - \sin \varphi_{yz} \cos \varphi_{yz} \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})^2 - (z_{yi} - \bar{z}_y)^2] = 0. \end{aligned}$$

После преобразования получим:

$$\operatorname{tg} 2\varphi_{xz} = 2 \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(z_{xi} - \bar{z}_x)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - \sum_{i=1}^n (z_{xi} - \bar{z}_x)^2} = 2 \frac{\sum_{i=1}^n x_i z_{xi} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n z_{xi} \right)}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] - \left[\sum_{i=1}^n z_{xi}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n z_{xi} \right)^2 \right]}, \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi_{yz} = 2 \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_{yi} - \bar{z}_y)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (z_{yi} - \bar{z}_y)^2} = 2 \frac{\sum_{i=1}^n y_i z_{yi} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n z_{yi} \right)}{\left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right] - \left[\sum_{i=1}^n z_{yi}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n z_{yi} \right)^2 \right]}. \quad (12)$$

Углы реального профиля тормозного диска необходимы для определения положения центра давления, который в свою очередь влияет на изменение тормозного момента в процессе торможения. Расчетные схемы для определения положения центра давления номинального [8] и реального профиля рабочих поверхностей тормозного диска представлены на рис. 2 а, б, в, г.

Используя расчетные схемы, составим уравнения сил и моментов, действующих в плоскости YOZ, для реального профиля тормозного диска:

$$\left\{ \begin{aligned} & -\sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_{yz} - P_{\text{труз}} \sin \varphi_{yz} + R_{yz} \cos \varphi_{yz} + P_\theta \sin \varphi_{yz} + P_{\text{тр(с)}} \cos \varphi_{yz} = m_\kappa \ddot{z} \\ & \sum_{i=1}^n P_i \sin \varphi_{yz} - P_{\text{труз}} \cos \varphi_{yz} - R_{yz} \sin \varphi_{yz} + P_\theta \cos \varphi_{yz} - P_{\text{тр(с)}} \sin \varphi_{yz} = m_\kappa \ddot{y} \\ & -\sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_{yz} L_i + \sum_{i=1}^n P_i \sin \varphi_{yz} (t_\kappa \cos \varphi_{yz} + L_i \operatorname{tg} \varphi_{yz} - t_3) + R_{yz} \cos \varphi_{yz} L_A - \\ & -R_{yz} \sin \varphi_{yz} [t_3 - (L - L_A) \operatorname{tg} \varphi_{yz}] - P_{\text{труз}} \sin \varphi_{yz} L_A - \\ & -P_{\text{труз}} \cos \varphi_{yz} [t_3 - (L - L_A) \operatorname{tg} \varphi_{yz}] = J_\kappa \ddot{\varphi}_{yz} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

В плоскости XOZ для реального профиля тормозного диска:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & -\sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_{xz} + P_{\text{тпхз}} \sin \varphi_{xz} + R_{xz} \cos \varphi_{xz} + P_{\partial} \sin \varphi_{xz} + P_{\text{тп(c)}} \cos \varphi_{xz} = m_{\kappa} \ddot{z} \\
 & \sum_{i=1}^n P_i \sin \varphi_{xz} + P_{\text{тпхз}} \cos \varphi_{xz} - R_{xz} \sin \varphi_{xz} - P_{\partial} \cos \varphi_{xz} - P_{\text{тп(c)}} \sin \varphi_{xz} = m_{\kappa} \ddot{y} \\
 & \mp \sum_{i=1}^n P_i \cos \varphi_{xz} (\mp r_i \cos \Theta_i \pm r_{\text{п}} \cos [\Theta/2]) + \\
 & + \sum_{i=1}^n P_i \sin \varphi_{xz} [t_{\kappa} \cos \varphi_{xz} + (r_{\text{внеш}} \cos [\Theta/2] - r_i \cos \Theta_i) \text{tg} \varphi_{xz} - t_3] + \\
 & + R_{xz} \cos \varphi_{xz} (r_{\text{п}} \cos [\Theta/2] - r_c) - R_{xz} \sin \varphi_{xz} [t_3 - (r_{\text{внеш}} \cos [\Theta/2] - r_c) \text{tg} \varphi_{yz}] + \\
 & + P_{\text{тпхз}} \sin \varphi_{xz} (r_{\text{п}} \cos [\Theta/2] - r_c) + P_{\text{тпхз}} \cos \varphi_{xz} [t_3 - (r_{\text{внеш}} \cos [\Theta/2] - r_c) \text{tg} \varphi_{yz}] = J_{\kappa} \ddot{\varphi}_{xz}
 \end{aligned} \right. \quad (14)$$

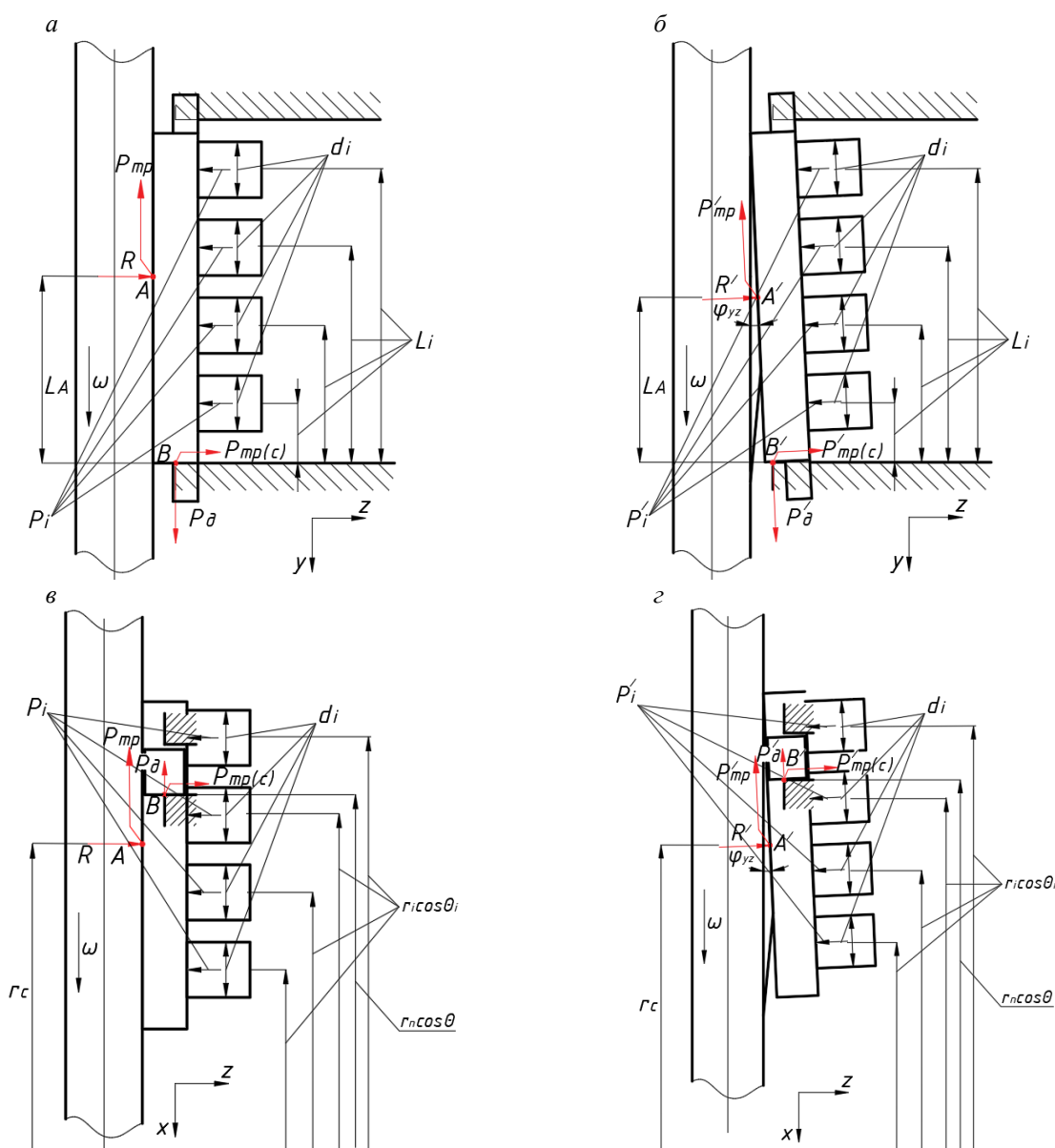


Рис. 2. Расчетные схемы для определения положения центра давления в тангенциальной (а, б) и радиальной (в, з) плоскостях для номинального (а, в) и реального (б, з) профиля поверхности тормозного диска

Проекция результирующей силы в системе «полиприжимающий механизм – тормозная колодка – тормозной диск» с учетом реального профиля тормозного диска на плоскость YOZ :

$$R_{yz} = \frac{-\sum_{i=1}^n P_i \left(\frac{\cos \varphi_{yz} - f_c \sin \varphi_{yz}}{\sin \varphi_{yz} + f_c \cos \varphi_{yz}} + \sin \varphi_{yz} \right) + m_k \ddot{x} - m_k \ddot{z} \left(\frac{\cos \varphi_{yz} - f_c \sin \varphi_{yz}}{\sin \varphi_{yz} + f_c \cos \varphi_{yz}} \right)}{\frac{(f \sin \varphi_{yz} - \cos \varphi_{yz})(\cos \varphi_{yz} - f_c \sin \varphi_{yz})}{\sin \varphi_{yz} + f_c \cos \varphi_{yz}} - (f \cos \varphi_{yz} + \sin \varphi_{yz})}. \quad (15)$$

Расстояние от края суппорта до положения центра давления в системе «полиприжимающий механизм – тормозная колодка – тормозной диск» с учетом реального профиля тормозного диска в плоскости YOZ :

$$L_A = \frac{\left[\sum_{i=1}^n P_i (L_i \cos \varphi_{yz} + \sin \varphi_{yz} \cos \varphi_{yz} t_k + L_i \sin \varphi_{yz} \operatorname{tg} \varphi_{yz} - t_3 \sin \varphi_{yz}) + R_{yz} (t_3 [\sin \varphi_{yz} + f \cos \varphi_{yz}] - L \operatorname{tg} \varphi_{yz} [\sin \varphi_{yz} - f \cos \varphi_{yz}]) \right] - J_k \ddot{\varphi}_{yz}}{R_{yz} (\sin \varphi_{yz} \operatorname{tg} \varphi_{yz} + f \sin \varphi_{yz} + f \cos \varphi_{yz} \operatorname{tg} \varphi_{yz} - \cos \varphi_{yz})}. \quad (16)$$

Соответственно проекция результирующей силы на плоскость XOZ :

$$R_{xz} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \left(\frac{\cos \varphi_{xz} (f_c \sin \varphi_{xz} + \cos \varphi_{xz})}{\sin \varphi_{xz} + f_c \cos \varphi_{xz}} - \sin \varphi_{xz} \right) + m_k \ddot{x} + m_k \ddot{z} \left(\frac{f_c \sin \varphi_{yz} + \cos \varphi_{yz}}{\sin \varphi_{yz} + f_c \cos \varphi_{yz}} \right)}{f \cos \varphi_{yz} + \frac{(f \sin \varphi_{yz} + \cos \varphi_{yz})(\cos \varphi_{yz} + f \sin \varphi_{yz})}{\sin \varphi_{yz} + f \cos \varphi_{yz}} - \sin \varphi_{yz}}. \quad (17)$$

Расстояние от края суппорта до положения центра давления в системе «полиприжимающий механизм – тормозная колодка – тормозной диск» с учетом реального профиля тормозного диска в плоскости XOZ :

$$r_c = \frac{\left[\sum_{i=1}^n P_i \left(\sin \varphi_{xz} \left[t_k \cos \varphi_{xz} + (r_{\text{внеш}} \cos [\Theta/2] - r_i \cos \Theta_i) \operatorname{tg} \varphi_{xz} - t_3 \right] \mp \right. \right.}{R_{xz} (\cos \varphi_{xz} + \sin \varphi_{xz} \operatorname{tg} \varphi_{xz} + f \sin \varphi_{xz} + f \cos \varphi_{xz} \operatorname{tg} \varphi_{xz})}. \quad (18)$$

Рассмотрим влияние угла в тангенциальном направлении реального профиля тормозного диска на распределения контактирующих сил по площади колодки. Для моделирования процесса взаимодействия рабочих поверхностей тормоза была разработана трехмерная модель шестипоршневого тормозного устройства с имитированными циклическими макронеровностями и одной макронеровностью на поверхности тормозного диска в программном продукте «Универсальный механизм 9.0» (рис. 3 а, б).

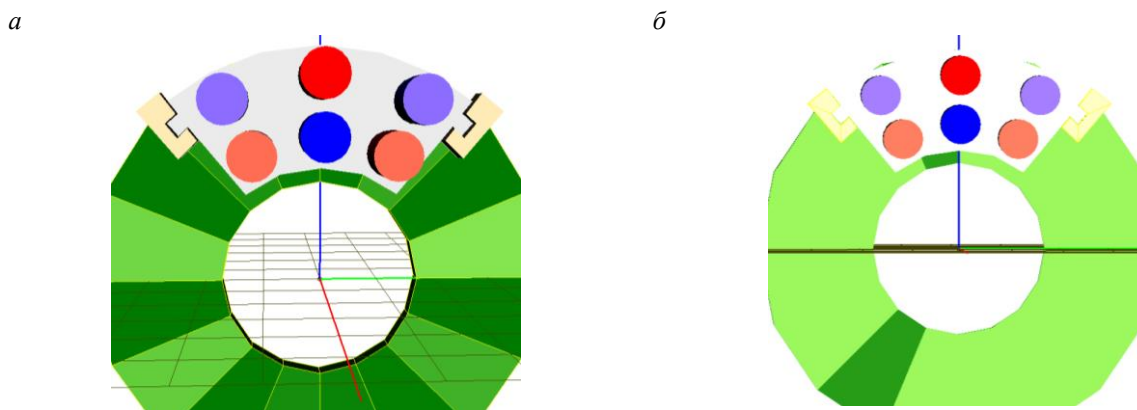


Рис. 3. Трехмерные модели шестицилиндровых тормозных устройств с имитированными циклическими макронеровностями (а) и одной макронеровностью (б) на поверхности тормозного диска

Циклические макронеровности размещались через каждые 45° по всему обороту рабочей тормозного диска, тогда как макронеровность располагалась в секторе между 320° и 337.5° рабочей поверхности тормозного диска. Величины амплитуд макронеровностей составляли 4 мм. Тормозная колодка прижималась шестью прижимающими элементами с прижимающими силами на каждом цилиндре равными 100 Н. Крутящий момент тормозного диска задавался уровнем 275 Н·м. Максимальный угол наклона поверхности реального профиля в тангенциальном направлении составил $6,8^\circ$, а минимальный – $2,9^\circ$. Результаты изменения контактирующих сил, образующихся при взаимодействии рабочих пар, представлены на рис. 4 а, б, в, г. Для измерения были заданы точки, расположенные на едином луче с разным удалением от центра вращения тормозного диска.

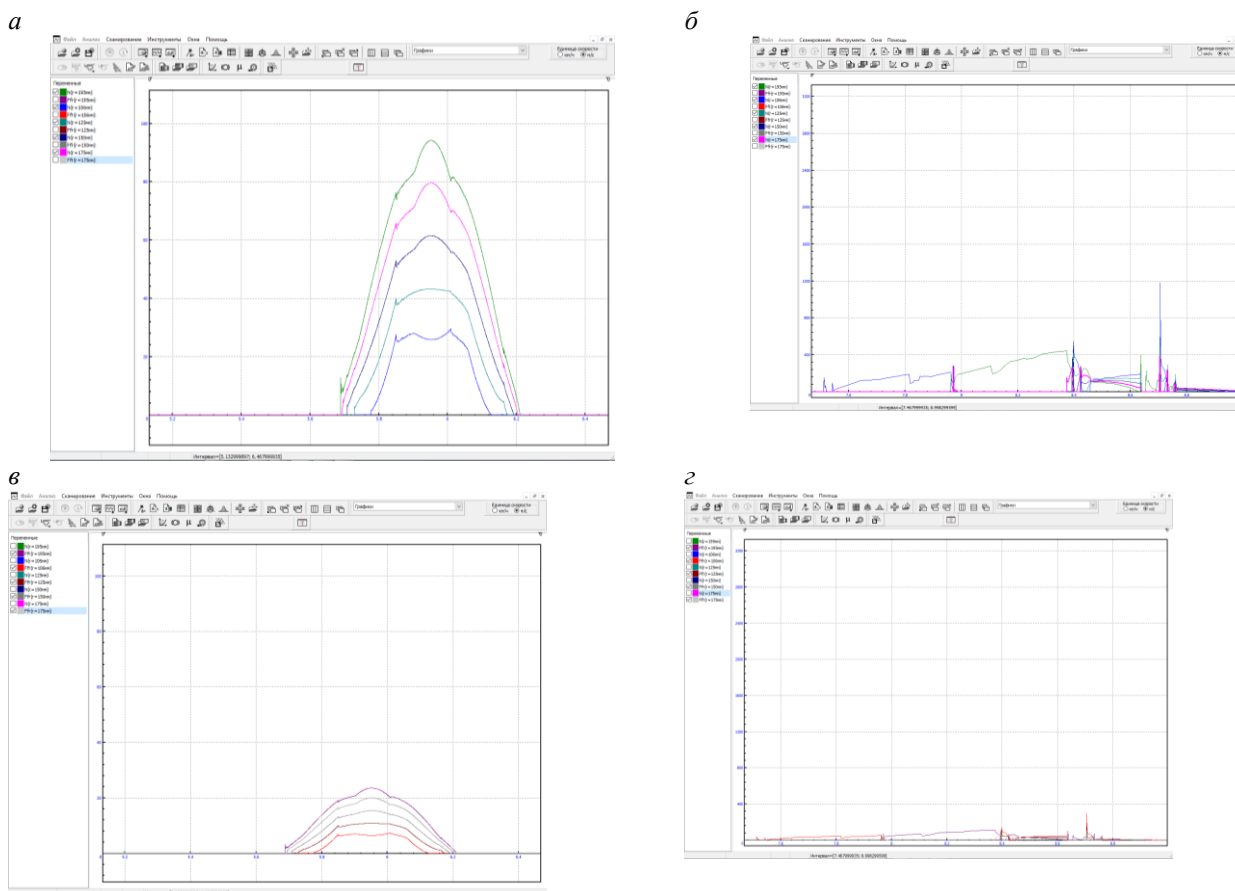


Рис. 4. Изменения нормальных (а, б) и тангенциальных (в, г) составляющих контактирующих сил шестицилиндровых тормозных устройств с имитированными циклическими макронеровностями (а, в) и одной макронеровностью (б, г) на поверхности тормозного диска

Согласно моделированию, нормальные и тангенциальные составляющие контактирующих сил тормозного устройства с циклическими макронеровностями на поверхности диска увеличиваются с ростом радиуса приложения. А при наличии одной макронеровности на поверхности диска в величинах нормальных и тангенциальных составляющих такой корреляции нет. Величины нормальных и тангенциальных составляющих контактирующих сил в нижней части колодок больше, чем в верхней части (рис. 5 а, б, в).

Рассматривая полученные результаты моделирования тормозных устройств, можно утверждать, что положение центра давления в процессе взаимодействия будет меняться, что отразится не только на износных свойствах контактирующих площадок, но и создает неравномерность тормозного момента. В случае с циклическими макронеровностями эта угроза не так значительна, потому что в контакте находилось не менее двух ограниченных площадок колодки и диска, при наличии одной макронеровности площадки на поверхности диска площадка контактирования рабочих смещалась в зону с максимальным радиусом тормозного диска (рис. 5. в), что ведет к трудно прогнозируемой величине тормозного момента во времени.

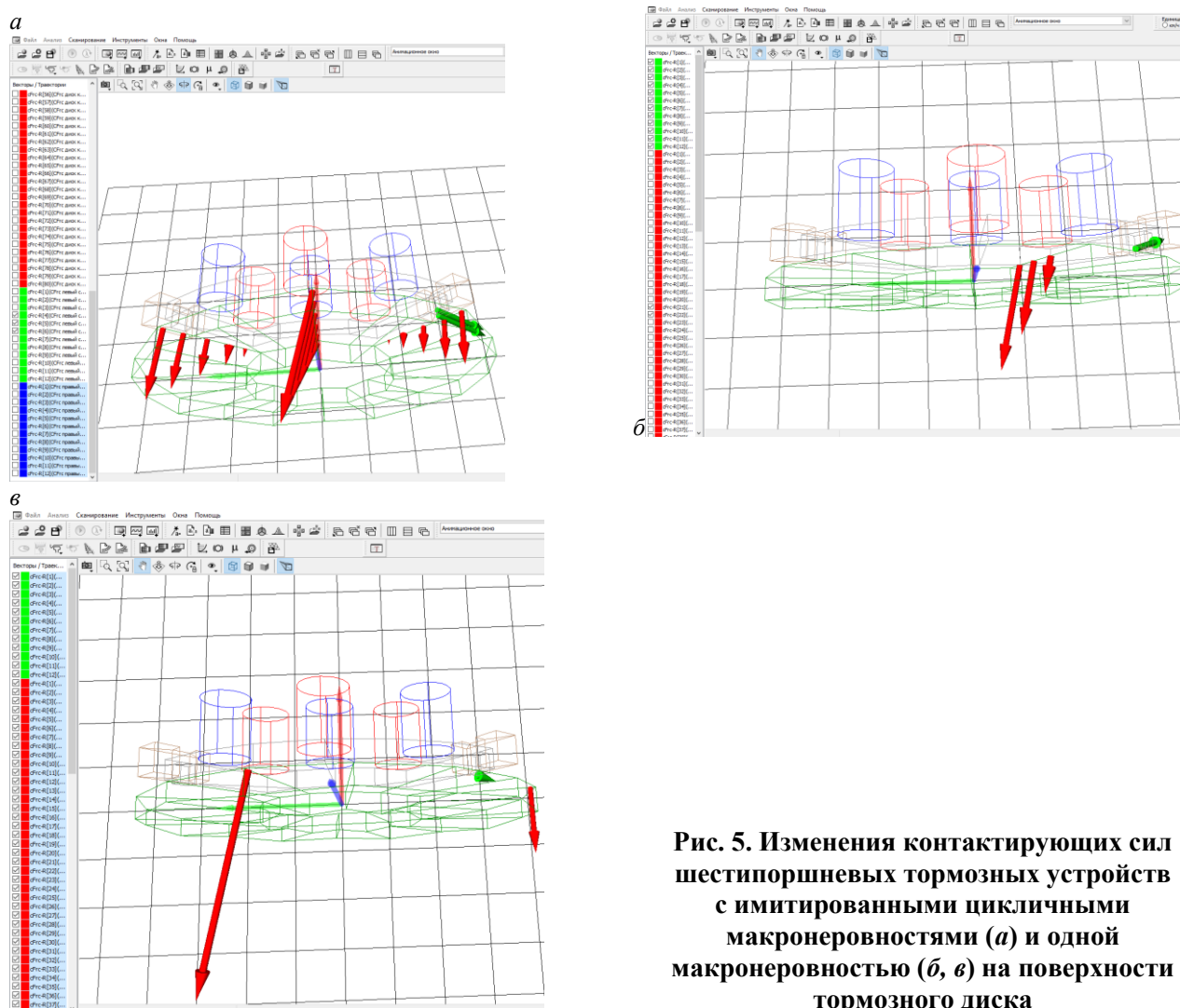


Рис. 5. Изменения контактирующих сил шестипоршневых тормозных устройств с имитированными циклическими макронеровностями (а) и одной макронеровностью (б, в) на поверхности тормозного диска

Заключение

В статье представлена оценка влияния параметров, характеризующих макронеровность на поверхности тормозного диска на распределение контактирующих сил в системе «полиприжимающий механизм – тормозная колодка – тормозной диск» и развиваемый тормозной диск. В качестве основных параметров, характеризующих макронеровность на рабочих поверхностях тормозного диска, были выбраны углы наклона реального профиля поверхности в тангенциальном и радиальном направлениях. Были получены зависимости для расчета положения центра давления в тангенциальном и радиальном направлениях в системе «полиприжимающий механизм – тормозная колодка – тормозной диск» с учетом углов наклона профиля в двух направлениях. Для оценки влияния углов наклона на распределение

сил по площади контактирующих поверхностей тормоза были построены твердотельные модели тормозных устройств с моделируемыми реальными профилями рабочих поверхностей диска. В качестве объектов моделирования использовались поверхности диска с циклическими макронеровностями и с одной областью. При взаимодействии рабочих пар тормозного устройства с одной макронеровностью на поверхности происходила инверсия распределенных контактирующих сил, в сравнении с диском, на поверхности которого были циклические макронеровности.

Список литературы

- 1 **Sathish, K. T.** Study of friction, wear and plastic deformation of automotive brake disc subjected to thermo-mechanical fatigue / K. T. Sathish, J. Maniraj, V. S. Thangarasu // *Matéria*. – 2023. – Vol. 28 (1). – 13 p. – DOI 10.1590/1517-7076-rmat-2022-0329.
- 2 Braking force & braking time reduction by using four shoe brake system / C. B. Manikandan, P. Balamurugan, S. L. Beneston [et al.] // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. – 2019. – Vol. 8. – P. 1376–1380.
- 3 Study of the Mechanical Behavior of an Automobile Brake Disc / K. Siham, B. Mokhtar, T Tawfik, [et al.] // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 65 (3). – P. 197–204. – DOI 10.3311/PPme.15589.
- 4 Brake torque analysis of fully mechanical parking brake system : Theoretical and experimental approach / I. Mohd-Razmi, A. B. Abd-Rahim, B. Ali [et al.] // *Ingeniería, investigación y tecnología*. – 2018. – Vol. 19. – P. 37–49. – DOI 10.22201/fi.25940732e.2018.19n1.004.
- 5 **Chaphale, S. B.** A review on thermal and contact stress analysis of disc braking system / P. P. Chaphale, S. B. Jaju // *International Journal of Engineering Research and General Science*. – 2014. – Vol. 2 – P. 78–84.
- 6 **Кривошея, Ю. В.** Изменение геометрических параметров микронеровностей тормозного диска под влиянием напряжений сжатия в диапазоне упругих деформаций / Ю. В. Кривошея // *Сборник научных трудов ДОНИЖТ*. – 2024. – № 3 (74). – С. 45–54.
- 7 Numerical analysis of a rotor disc for optimization of the disc materials / S. P. Baskara, A. Muthuvel, N. Prakash, W. L. Stanly // *Journal of Mechanical Engineering and Automation*. – 2015. – Vol. 5 (3B). – P. 5–14. – DOI 10.5923/c.jmea.201502.02.
- 8 **Поляков, П. А.** Определение положения центра давления в системе "прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск" / П. А. Поляков // *Транспортное, горное и строительное машиностроение : наука и производство*. – 2022. – № 16. – С. 62–69. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-62-69.

References

- 1 **Sathish, K. T.** Study of friction, wear and plastic deformation of automotive brake disc subjected to thermo-mechanical fatigue / K. T. Sathish, J. Maniraj, V. S. Thangarasu // *Matéria*. – 2023. – Vol. 28 (1). – 13 p. – DOI 10.1590/1517-7076-rmat-2022-0329.
- 2 Braking force & braking time reduction by using four shoe brake system / C. B. Manikandan, P. Balamurugan, S. L. Beneston [et al.] // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. – 2019. – Vol. 8. – P. 1376–1380.
- 3 Study of the Mechanical Behavior of an Automobile Brake Disc / K. Siham, B. Mokhtar, T Tawfik, [et al.] // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 65 (3). – P. 197–204. – DOI 10.3311/PPme.15589.
- 4 Brake torque analysis of fully mechanical parking brake system : Theoretical and experimental approach / I. Mohd-Razmi, A. B. Abd-Rahim, B. Ali [et al.] // *Ingeniería, investigación y tecnología*. – 2018. – Vol. 19. – P. 37–49. – DOI 10.22201/fi.25940732e.2018.19n1.004.
- 5 **Chaphale, S. B.** A review on thermal and contact stress analysis of disc braking system / P. P. Chaphale, S. B. Jaju // *International Journal of Engineering Research and General Science*. – 2014. – Vol. 2 – P. 78–84.
- 6 **Krivosheya, Yu. V.** Change in geometric parameters of the microroughnesses of the brake disc under the influence of compressive stresses in the range of elastic deformations / Yu. V. Krivosheya // *Collection of scientific papers of DONIZHT*. – 2024. – No. 3 (74). – P. 45–54.
- 7 Numerical analysis of a rotor disc for optimization of the disc materials / S. P. Baskara, A. Muthuvel, N. Prakash, W. L. Stanly // *Journal of Mechanical Engineering and Automation*. – 2015. – Vol. 5 (3B). – P. 5–14. – DOI 10.5923/c.jmea.201502.02.
- 8 **Polyakov, P. A.** Determination of the position of the pressure center in the system "clamping element – brake pad – brake disc" / P. A. Polyakov // *Transport, mining and construction engineering : science and production*. – 2022. – No. 16. – P. 62–69. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-62-69.

P. A. Polyakov, I. A. Yaitskov, O. A. Voron, I. P. Talipova, A. A. Kuzkin, N.R. Gabdrakhmanov

THE INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE DISK PROFILE ON FORMATION OF CONTACTING FORCES ON THE WORKING PLATFORMS OF THE BRAKING DEVICE

Abstract. The article presents an assessment of the influence of parameters characterizing the macro-roughness on the surface of the brake disc on the distribution of contacting forces in the system "poly-clamping mechanism – brake pad – brake disc" and the developing brake disc. The angles of inclination of the real surface profile in the tangential and radial directions were chosen as the main parameters characterizing the macro-roughness on the working surfaces of the brake disc. Dependences were obtained for calculating the position of the center of pressure in the tangential and radial directions in the "poly-clamping mechanism – brake pad – brake disc" system, taking into account the angles of the profile inclination in two directions. To assess the effect of the inclination angles on the distribution of forces over the area of the contact surfaces of the brake, solid models of braking devices with simulated real profiles of the working surfaces of the disc were built. Disk surfaces with cyclic macro-roughness and with one area were used as modeling objects. When the working pairs of the braking device interacted with one macro-roughness on the surface, an inversion of the distributed contacting forces occurred, in comparison with the disk on the surface of which there were cyclic macroroughnesses.

Keywords: braking device, center of pressure, inclination angle of the real profile, macro-roughness, poly-clamping mechanism.

For citation: The influence of the geometry of the disk profile on formation of contacting forces on the working platforms of the braking device / P. A. Polyakov, I. A. Yaitskov, O. A. Voron [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 218–228. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_218.

Сведения об авторах

Поляков Павел Александрович

Набережночелнинский институт Казанского федерального университета (НЧИ КФУ), кафедра «Механика и конструирование», доктор технических наук, доцент, профессор, 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

Ворон Олег Андреевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство», доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, e-mail: rgups_voron@mail.ru

Талипова Ирина Петровна

Набережночелнинский институт Казанского федерального университета (НЧИ КФУ), кафедра «Механика и конструирование», кандидат технических наук, доцент, e-mail: okm206@mail.ru

Information about the authors

Polyakov Pavel Alexandrovich

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University (NCI KFU), Chair «Mechanics and Design Engineering», Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor, 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

Voron Oleg Andreyevich

Rostov State Transport University (RGUPS), Chair «Wagons and Car Facilities», Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Chair, e-mail: rgups_voron@mail.ru

Talipova Irina Petrovna

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal University (NCI KFU), Chair «Mechanics and Design Engineering», Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: okm206@mail.ru

Кузькин Антон Алексеевич

Набережночелнинский институт Казанского
федерального университета (НЧИ КФУ),
кафедра «Автомобили, автомобильные
двигатели и дизайн»
аспирант,
e-mail: okm206@mail.ru

Габдрахманов Нияз Рамилевич

Набережночелнинский институт Казанского
федерального университета (НЧИ КФУ),
кафедра «Механика и конструирование»,
студент,
e-mail: okm206@mail.ru

Kuzkin Anton Alekseevich

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal
University (NCI KFU),
Chair «Automobiles, Automotive Engines and
Design»,
Postgraduate Student,
e-mail: okm206@mail.ru

Gabdrakhmanov Niyaz Ramilevich

Naberezhnye Chelny Institute of Kazan Federal
University (NCI KFU),
Chair «Mechanics and Design Engineering»,
Student,
e-mail: okm206@mail.ru

А. С. Шинкарук, А. А. Кульков, Р. Х. Рафиков

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Проводится анализ и сопоставление существующей системы планово-предупредительного ремонта пассажирского подвижного состава с перспективной предиктивной моделью контроля состояния ответственных узлов в режиме реального времени для выявления зарождения нестабильной работы его элементов. Экономическая реальность диктует необходимость поиска решений снижения затрат по содержанию подвижного состава вагонов в технически исправном состоянии. Предлагаемый поэтапный переход в системе технического обслуживания пассажирских вагонов по фактическому техническому состоянию, позволяет сократить трудозатраты, затраты на материальное обеспечение на проведение технического обслуживания и ремонта вагонов за счет устранения дефектов каждого контролируемого узла, а также снизить уровень повреждаемости диагностируемых узлов и повысить экономическую составляющую в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: пассажирский вагон, предиктивное состояние, техническое обслуживание и ремонт, старение, выявляемость.

Для цитирования: Шинкарук, А. С. Повышение эффективности технического обслуживания пассажирского подвижного состава / А. С. Шинкарук, А. А. Кульков, Р. Х. Рафиков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 229–237. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_229.

Введение

Существующая система ремонта и технического обслуживания пассажирских вагонов регламентирована в части последовательного выполнения следующих этапов: проектирование, изготовление, техническое обслуживание, ремонт и утилизация. Вместе с тем расходы на его содержание в течение всего периода эксплуатации в связи с естественным устареванием постепенно возрастают. Благодаря экономической необходимости предпринимаются попытки найти способы уменьшения расходов на его содержание в технически исправном состоянии на протяжении всего его жизненного цикла [4].

Важно рассмотреть целесообразность поэтапного перехода к системе обслуживания пассажирских вагонов, основанной на фактическом техническом состоянии их элементов и проведении диагностики их работоспособности.

Принятое решение позволяет сократить трудозатраты и время на проведение ремонта и обслуживания вагонов, а также снизить количество материалов, требующих замены, что позволит снизить уровень старения парка вагонов, добиться повышения экономической эффективности используемого подвижного состава в эксплуатации, а также снижения затрат при проведении планово-предупредительного и профилактического видов ремонта путем проведения обслуживания ряда узлов и деталей по их фактическому техническому состоянию.

С середины XX века, после выделения пассажирского сообщения в отдельную отрасль [3], на постоянной основе совершенствуется и система технического обслуживания, изменяются в сторону увеличения межпробегные нормы, совершенствуется сама процедура периодического технического обслуживания и ремонта от каждого факта прибытия пассажирского состава в пункт формирования до достижения пробега между техническим обслуживанием в пункте формирования 10 000 км [2].

Кроме этого, система управления ремонтом пассажирских вагонов, технологическая оснастка участков по ремонту подвижного состава в полной мере должны соответствовать регламентным требованиям [6, 9].

Основная часть

При планировании объема пассажирских перевозок на перспективный период (как правило, на предстоящий календарный год) собственниками подвижного состава формируются программы проведения технического обслуживания, деповских и капитальных ремонтов, а также дополнительных программ по ремонту наиболее ответственных элементов (колесных пар, редукторно-карданного привода

и т. д.). Нормируются и планируются затраты на себестоимость, персонал, запасные части и материалы, рассчитывается загрузка ремонтных участков в соответствии с производственными и технологическими мощностями предприятий.

Наличие необходимого количества технологического оборудования определяется в соответствии с требованиями руководства по ремонту, технологическим процессом, инструкциями. Дополнительная технологическая оснастка приобретается при освоении ремонта новых моделей пассажирских вагонов, которые зачастую разрабатываются с учетом того, что ресурсы агрегатов, узлов и электрических схем соответствуют определенным межремонтным срокам и периодам соответствующего технического обслуживания [7]. Следовательно, организационная планово-предупредительная система ремонта подвижного состава выполняет государственную роль в области изготовления, обслуживания и ремонта пассажирских вагонов локомотивной тяги [8].

По результатам анализа системы технического обслуживания и ремонта установлено, что для различных моделей имеются существенные особенности, которые включают в себя объем работы в зависимости от сложности элементной базы (наличие микропроцессорных элементов, конструкции подвагонных тележек, необходимость обслуживания на специализированных путях и прочее), а также от результатов дефектации определенных узлов и деталей при поступлении вагона на ремонтные позиции.

Комплексная оценка пассажирского вагона осуществляется по анализу журнала заявочного ремонта (ВУ-8), результатов технического диагностирования, а также его комиссионной приемки в ремонт или на техническое обслуживание с использованием измерительного инструмента, тестового оборудования, а для ряда моделей последних лет постройки – и компьютерного диагностирования с применением специализированных программ.

Дефекты и износ элементов подвижного состава устанавливаются в основном при внешнем осмотре (шум, износ, люфт) и по результатам тестирования компьютерным оборудованием (для подвижного состава нового поколения), а также анализа инструментальных измерений. Сравнивая их с соответствующими допусковыми характеристиками (геометрические размеры, силовые характеристики электрических цепей, усилия нажатия), содержащимися в правилах ремонта, инструкциях и технологических картах, можно сделать вывод о соответствии результатов измерений нормам допуска.

Основными критериями, которыми целесообразно оценить объем восстановительных работ на подвижном составе, являются количество и продолжительность выхода из строя элементной базы систем жизнеобеспечения пассажирского вагона (кондиционирование, высоковольтное оборудование, экологически чистые туалетные комплексы и т. д.), количество устраненных неисправностей при проведении технического обслуживания, проведение текущего ремонта вагона с переводом его в нерабочий парк в период межремонтной эксплуатации.

По результатам ежемесячного анализа на системной основе используют количественный показатель допущенных на предприятии отказов и выхода из строя оборудования, разрабатываются меры по повышению качества ремонта наиболее проблемных узлов подвижного состава, в том числе и с участием производителей. По результатам выборочного исследования установлено, что в процессе постепенного старения пассажирского подвижного состава затраты на его поддержание в работоспособном состоянии увеличиваются в среднем на 10 % в сравнении с затратами на начальном этапе. Связано это в первую очередь со старением элементов электрического и электронного оборудования (конденсаторы, генераторы и т. д.). На протяжении последнего десятилетия вопрос повышения эффективности технического обслуживания и ремонта подвижного состава, поиска эффективных решений по внедрению малообслуживаемых или необслуживаемых технологий, а также повышения самодиагностики оборудования в режиме реального времени является одним из важных и наиболее перспективных [5, 7].

Вопросы повышения эффективности проведения технического обслуживания, жесткая экономическая реальность вынуждают собственников подвижного состава интенсивно искать пути повышения эффективности его обслуживания, снижения времени простоя в нерабочем парке и вовлечения вагона в максимальную эксплуатационную деятельность.

Для этого в пассажирские вагонные депо инвестируются средства на приобретение современного диагностического и измерительного оборудования, позволяющие не только контролировать, но и в ряде случаев прогнозировать техническое состояние определенных элементов подвижного состава, что дает возможность повысить качество, эффективность и достоверность проведения диагностики, а также дефектовки элементов подвижного состава.

В результате этого достаточно точно и объективно оценивается индивидуальное техническое состояние каждой единицы подвижного состава и дается возможность устанавливать персональный набор объема работ по его фактическому состоянию.

Интеграция к системам напольного диагностирования, развитие системы автоматизированного учета эксплуатации подвижного состава представляют собой предпосылки к поэтапному переходу к системе ремонта по его фактическому состоянию, которая должна стать результатом экспериментальной оценки и апробирования предложенных теоретических исследований и разработок в практическую плоскость для создания новой – интегрированно-предупредительной системы ремонта.

В целях определения планируемого времени постановки вагона на проведение его технического обслуживания или ремонта необходимо определить межремонтные периоды с последующим внесением корректировок в эксплуатационные ресурсы с учетом ритмичного захода на ремонт в ремонтное предприятие в соответствии с его загрузкой [9]. Также следует принимать во внимание результаты оценки текущего состояния пассажирского вагона. Для этого производится и анализируется наработка технического состояния, оценка остаточного ресурса, а также вероятности выхода из строя основных лимитирующих узлов, являющиеся основой для общей оценки. Эти данные будут храниться в единой базе данных пассажирского вагонного депо, которая и будет служить основанием для оценки.

Данная информация позволит сформировать последовательность технологических операций, которые будут осуществляться в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, а в случае ее отсутствия будет сформирован порядок проведения технологических операций, при котором будут учитываться требования к деталям, которые необходимо заменить или отремонтировать, для обеспечения эффективной и продолжительной эксплуатации вагона в будущем.

Также немаловажную роль выполняют работы, осуществляемые в различных модуляторных программах ЭВМ по наиболее ответственным элементам подвижного состава с целью установления прогнозного остаточного ресурса, большего, чем нормативная эксплуатационная наработка до следующего планово-предупредительного ремонта, которая будет включать их ремонт, с учетом того, что ряд работ, предусмотренных нормативными правилами, будет отменен.

Принятие после проведения технического обслуживания или ремонта должно осуществляться в соответствии с регламентными требованиями, оформлением чек-листа с фиксацией полученных при этой процедуре контрольных результатов, а также видеофиксацией процесса приемки для подтверждения объективности полученных данных, а также подтверждения использования соответствующих диагностических систем и средств измерения.

Накопление информационного двойника пассажирского вагона должно включать в себя данные о его постройке, датах и месте проведенных технических обслуживаний (ТО-1, ТО-2, ТО-3), плановых ремонтов (ДР, КР-1, КР-2, КРМ и КВР) и списания. Информационную базу также необходимо накапливать данными и результатами приемочных и окончательных испытаний, в том числе диагностических, периода фактического отвлечения вагона из эксплуатации, учета простоя на позициях планового и непланового ремонтов, объема и перечня проведенных дополнительных и диагностических работ, а также фиксации невыполненных работ и технологических операций.

Также необходимо фиксировать результаты рекомендаций и их выполненных, полученные от диагностических программных комплексов, таких как система самодиагностики вагона, диагностические компьютерные программы и т.д., а также неисправности, выявленные при ремонте и разборке в ремонтных цехах или в эксплуатационных участках.

При эксплуатации в электронную базу каждого вагона заносятся данные о его техническом состоянии, проведенных ремонтных, диагностических и регулировочных работах, в том числе выполненные не только работниками в пунктах формирования/оборота, но и в пути следования поездным электромехаником. По результатам анализа этих данных определяются дата и объем необходимого перспективного технического обслуживания или ремонта.

Этот информационный массив является фундаментом цифрового двойника пассажирского вагона (рис. 1), в результате обработки которого возможно произвести планирование, учет, анализ и контроль результатов содержания приписного и прикомандированного парка вагонов, а также оценить достоверность проведенных диагностических испытаний элементов подвижного состава, устанавливать или изменять существующие пороговые и браковочные значения, прогнозировать периоды безотказной работы лимитирующих узлов и деталей.



Рис. 1. Алгоритм построения цифрового двойника

В настоящее время определение фактического технического состояния вагонов основано на проведении статистического обследования, представляющего собой расчет остаточного ресурса каждого контролируемого элемента по величине его износа, наработки или арифметической зависимости цифровых показателей к их допустимым критериям. Именно эти наработанные данные, в том числе и по отказам элементной базы, позволяют сделать вывод о том, какая должна быть периодичность ремонта или технического обслуживания в соответствии с моделью вагона.

При проведении технологических операций по обслуживанию или ремонту в обязательном порядке необходимо фиксировать каждый факт замены узлов и деталей, дату изготовления или ремонта заменяемой детали, а также текущего пробега для формирования итогового значения этой наработки.

Оценка оставшегося ресурса при проведении диагностирования имеет вероятностный характер [1], она менее достоверна, чем данные, полученные по результатам проведения инструментального контроля. Одним из основополагающих факторов является и назначение самой детали, ее функционал, а также каковы последствия выхода ее из строя для самого вагона. По результатам анализа данных о соотношении средних уровней повреждений элементной базы вагона выводом может послужить заключение об остаточном ресурсе, которое будет получено посредством автоматического анализа данных.

Сейчас существует множество видов лимитирующего оборудования, в состав которого входят различные группы деталей, имеющие схожие технические характеристики и назначение. Так, из-за сложности создания различных диагностических средств и комплексов для контроля крепежных и монтажных элементов подвагонного оборудования они являются труднодоступными для диагностики. За счет проведения сбора статистических данных по указанным элементам можно определить максимально допустимую их наработку, которая впоследствии закрепляется в нормативной базе и обязана выполняться в пределах отведенного для них периода времени на техническое обслуживание и ремонт.

Необходимо отметить, что эксплуатируемый в настоящее время подвижной состав, изготовленный в конце XX и начале XXI века, имеет низкий уровень самодиагностики по сравнению с подвижным составом, выпускаемым в настоящее время. Процесс диагностики таких вагонов имеет длительную и трудоемкую подготовительную стадию, что осложняет выявление неисправности в сложном оборудовании, которое в конечном итоге увеличивает расходы на проведение ремонта и приводит к дополнительному нахождению его в нерабочем парке для отыскания причины неисправности или замены неисправного блока.

Первой целью исследования является совершенствование системы технического обслуживания и повышения контроля технического состояния пассажирского вагона в эксплуатации. Основной задачей является оснащение всех вновь выпускаемых вагонов системой бортовой диагностики, с помощью

которой можно определить перечень необходимых контролируемых входных параметров для эффективного входного контроля, эксплуатационной диагностики и выходного контроля через техническое диагностирование в режиме реального времени.

Формирование критериев входного контроля включает в себя фиксацию несоответствий и неисправностей, выявленных при комиссионной приемке, перед проведением единой технической ревизии или плановом ремонте вагона. После завершения ремонтных работ производится контроль качества, целью которого является оценка уровня выполнения регламентных работ, а также устранения дополнительных неисправностей и нарушений, выявленных при выходном контроле [10].

При проведении операций по диагностированию отдельных узлов пассажирского вагона (кузов, колесная пара, редукторно-карданный узел и т.д.) осуществляются их более тщательный осмотр, диагностический входной контроль и построение конечно-элементных 3D-моделей с расчетом и визуализацией напряжений, в процессе проведения планово-предупредительного ремонта и контроля ремонтных критериев для фиксации выходных результатов качества выполнения ремонтных операций (таблица).

Значения напряжений в кузове пассажирского вагона по конструктивным группам металлоконструкции

Наименование конструктивной группы	Оценка эквивалентных напряжений, МПа		Допускаемые напряжения, МПа
	При номинальных размерах всех элементов	По физическому состоянию	
Хребтовая балка	71	81	155
Шкворневая балка	137	152	
Фигурный лист (в месте фановой трубы)	54	58	
Стойки боковой стены	35	42	165
Обшивка боковой стены (2,5 мм)	48	53,7	

В данной работе для разработки 3D-модели кузова вагона и моделирования напряжений в САПР КОМПАС 3D и ANSYS Multiphysics по данным входного контроля использовались три типа конечных элементов: плоские пластинчатые 3- и 4-угольные (стены обшивки и балки) и стержневые (дуга крыши). Параметры расчетной модели следующие: количество узлов – 92 557, число конечных элементов – 97 554.

Результаты расчета показывают, что уровень напряжений в исследуемых конструктивных группах не превышает 152 МПа (рис 2). Учитывалось, что кузов вагона выполнен цельнометаллическим, сварным, несущей конструкции. Высокие эквивалентные напряжения также наблюдаются на верхнем поясе хребтовой балки, в области упоров автосцепки, шкворневых балок, нижних обвязок боковых стен, а также локально на фигурных листах. Особое внимание было уделено прочности фигурного листа в месте установки фановой трубы, где происходит интенсивная локальная коррозия, достигающая до 50% от номинальной толщины. Наиболее нагруженной частью остается шкворневая балка по нижнему горизонтальному листу. Расчет кузова вагона при фактических размерах основных несущих элементов после длительной эксплуатации показал незначительное увеличение напряжений в указанной зоне с 54 до 58 МПа. По результатам моделирования было установлено, что при длительной эксплуатации потеря несущей способности рамы вагона не превышает 12 % от исходного состояния, кузова по нижнему поясу – 35 %, а напряжения не выходят за пределы допускаемых значений.

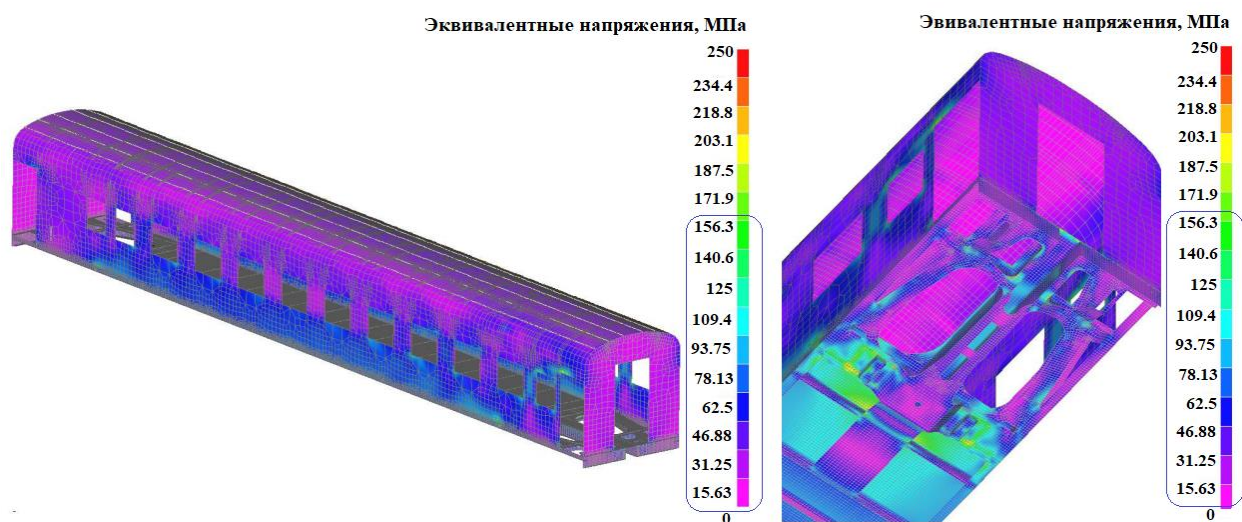


Рис. 2. Расчетный анализ напряжений в кузове пассажирского вагона при фактических размерах основных несущих элементов после длительной эксплуатации, выполненный в ANSYS Multiphysics

Повышение квалификации работников, осуществляющих входной/выходной контроль, ремонт и техническое обслуживание, играет ключевую роль в части оперативности определения причин неисправности. После прохождения специальной подготовки руководители цехов, ремонтный персонал могут приступить к выполнению операционного контроля с использованием переносных и стационарных средств технической диагностики.

Использование бортовых систем функциональной диагностики показывает ее эффективность при проведении непрерывного процесса контроля технического состояния пассажирских вагонов. Используя системы диагностического контроля, можно совмещать результаты сплошной диагностики со входным контролем. При этом непрерывная диагностика дает возможность получать сведения о техническом состоянии диагностируемых узлов подвижного состава, а применение стационарного диагностического комплекса с имитацией движения вагона при его выпуске из ремонта будет дополнительно позволять получать информацию для принятия окончательного решения о качестве проведенного ремонта об объеме и условиях проведения следующего ремонта или технического обслуживания. Встроенные диагностические устройства позволяют получить информацию в режиме реального времени информацию о сбоях, некорректной работе или отказах оборудования, что дает возможность выявлять на ранней стадии зарождающийся дефект и обеспечить купирование его причины с минимальными затратами.

В последнее время огромный интерес представляют собой формирование прогнозно-аналитических автоматизированных систем, позволяющих оценивать изменения технических характеристик подвижного состава по его техническим показателям.

Для того чтобы обнаружить нештатную работу оборудования на начальных этапах развития серьезного отказа, следует воспользоваться данным подходом, так как бортовые системы технического диагностирования на этой стадии позволяют значительно повысить потенциал его раннего обнаружения, применяя алгоритмическое и аппаратное прогнозирование в части изменения состояния наиболее ответственных элементов вагонов, в том числе систематизируя диагностические данные путем мониторинга состояния и осуществления большого количества решаемых задач.

Выводы

Таким образом, совершенствование системы планово-предупредительного ремонта с использованием бортовой диагностики обеспечивает повышение безотказности работы пассажирского подвижного состава, состояние которого оказывает влияние на безопасность движения и комфортабельность пассажирских перевозок; снижает потребность в проведении дополнительных и затратных восстановительных работ при раннем выявлении изменения в работе элементной базы вагона; повышает удовлетворенность пассажира от качественного предоставления услуг и штатной работы систем комфортабельного проследования; снижает факты задержек поездов по отправлению с начальной станции и сокращает задержки при проследовании из-за неисправности вагона; сокращает время и расходы на проведение технического обслуживания и планово-предупредительного ремонта за счет выявления и

устранения дефектов до перехода их в критическое состояние, тем самым снижает риск проведения значительных восстановительных работ или списания.

Эти критерии будут предотвращать рост затрат в случае ускоренного старения пассажирских вагонов. Согласно опыту начала использования диагностического оборудования [6] в ряде пассажирских вагонных депо удалось снизить: затраты на ремонт отдельных элементов подвижного состава – до 25 %; нахождение вагона в нерабочем парке – до 15 %; количество обращений о техническом состоянии подвижного состава от пассажиров – на 30 %; обеспечить графическое проследование поездов за период наблюдения.

Список литературы

1 **Лаврушин, Г. А.** Прогнозирование ресурса машин и конструкций : монография / Г. А. Лаврушин, Е. Г. Лаврушина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Дальневосточный федеральный университет. – Владивосток : Издательство дом Дальневосточного федерального университета, 2012. – 190 с. – ISBN 978-5-7444-2578-4.

2 Вагон пассажирский двухэтажный купейный со спальными местами модель 61-4523. Руководство по эксплуатации. 4523.00.00.000 РЭ / ОАО «ТВЗ». – Тверь, 2021. – 502 с.

3 Дирекция международных и туристических перевозок сообщения главного пассажирского управления МПС СССР. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/10122/page/5784?id=10044&ysclid=lqm33us5kw582543707> (дата обращения: 26.12.2024).

4 **Кизим, А. В.** Задачи и методы поддержки ТОиР оборудования на протяжении его жизненного цикла / А. В. Кизим // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – № 4 (91). – С. 55–59. – ISSN 1990-5297.

5 **Кизим, А. В.** Исследование и разработка методики автоматизации ремонтных работ предприятия / А. В. Кизим, Н. А. Линева // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2008. – № 2 (40). – С. 43–45. – ISSN 1990-5297.

6 Приказ Минтранса РФ от 13.01.2011 № 15 «О внесении изменений в приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 04.04.1997 N 9Ц» // ГАРАНТ. Информационно-правовое обеспечение. – URL: <https://base.garant.ru/6748607/> (дата обращения: 26.12.2024)

7 **Власов, А. И.** Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей / А. И. Власов, П. В. Григорьев, А. И. Кривошеин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 26–35. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-4.

References

1 **Lavrushin, G. A.** Forecasting the resource of machines and structures : monograph / G. A. Lavrushin, E. G. Lavrushina ; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Far Eastern Federal University. – Vladivostok : Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2012. – 190 p. – ISBN 978-5-7444-2578-4.

2 Double-decker passenger compartment car with berths, model 61-4523. Operation manual. 4523.00.00.000 RE. JSC / "TVZ". – Tver, 2021. – 502 p.

3 Directorate of International and Tourist Transportation of the Main Passenger Administration of the USSR Ministry of Railways. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/10122/page/5784?id=10044&ysclid=lqm33us5kw582543707> (date of access: 12/26/2024).

4 **Kizim, A. V.** Tasks and methods of equipment maintenance and repair support throughout its life cycle / A. V. Kizim // Izvestia Volgograd State Technical University. – 2012. – No. 4 (91). – P. 55–59. – ISSN 1990-5297.

5 **Kizim, A. V.** Research and development of methodology for automating repair work at the enterprise / A. V. Kizim, N. A. Lineva // Izvestia Volgograd State Technical University. – 2008. – No. 2(40). – P. 43–45. – ISSN 1990-5297.

6 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 13.01.2011 No. 15 "On Amendments to the Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 04.04.1997 No. 9 Ts" // GARANT. Information and legal support. – URL: <https://base.garant.ru/6748607/> (date of access: 12/26/2024).

7 **Vlasov, A. I.** A model of predictive maintenance of equipment using wireless sensor networks / A. I. Vlasov, P. V. Grigoriev, A. I. Krivoshein // Reliability and quality of complex systems. – 2018. – No. 2 (22). – P. 26–35. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-4.

8 **Финоченко, В. А.** Анализ экозащитных технологий на станциях реостатных испытаний локомотивных депо / В. А. Финоченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2(86). – С. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_42.

9 **Финоченко, В. А.** Инженерная экология : учебное пособие / В. А. Финоченко, Г. Н. Соколова, Т. А. Финоченко ; под редакцией В. А. Финоченко. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – 164 с. – ISBN 978-5-88814-855-6.

10 **Финоченко, В. А.** Технологии защиты окружающей среды от воздействий железнодорожного транспорта / В. А. Финоченко, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1 (54). – С. 62–64. – ISSN 1818-5509.

8 **Finochenko, V. A.** Analysis of environmental protection technologies at rheostat testing stations of locomotive depots / V. A. Finochenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_42.

9 **Finochenko, V. A.** Engineering ecology : A textbook / V. A. Finochenko, G. N. Sokolova, T. A. Finochenko ; Edited by V. A. Finochenko. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – 164 p. – ISBN 978-5-88814-855-6.

10 **Finochenko, V. A.** Technologies of environmental protection from the effects of railway transport / V. A. Finochenko, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (54). – P. 62–64. – ISSN 1818-5509.

A. S. Shinkaruk, A. A. Kulkov, R. Kh. Rafikov

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MAINTENANCE OF PASSENGER ROLLING STOCK

Abstract. This article analyzes and compares the existing system of scheduled preventive maintenance of passenger rolling stock with a promising predictive model for monitoring the condition of critical components in real time to identify the emergence of unstable operation of its elements. Economic reality dictates the need to find solutions to reduce the costs for maintaining the rolling stock of cars in technically sound condition. The proposed phased transition in the system of maintenance of passenger cars based on the actual technical condition allows reducing labor costs, material support costs for carrying out maintenance and repair of cars by eliminating defects of each controlled unit, as well as reducing the level of damage to diagnosed units and increasing the economic component in the process of their operation.

Keywords: passenger car, predictive condition, maintenance and repair, aging, detectability.

For citation: Shinkaruk, A. S. Improving the efficiency of maintenance of passenger rolling stock / A. S. Shinkaruk, A. A. Kulkov, R. Kh. Rafikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 4. – P. 229–237. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_229.

Сведения об авторах

Шинкарук Андрей Сергеевич

Российский университет транспорта (РУТ МИИТ),
кафедра «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава»,
кандидат технических наук,
e-mail: shinkarukas@mail.ru

Кульков Анатолий Александрович

Российский университет транспорта (РУТ МИИТ),
кафедра «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: pow12@mail.ru

Information about the authors

Shinkaruk Andrey Sergeevich

Russian University of Transport (RUT),
Chair «Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: shinkarukas@mail.ru

Kulkov Anatoly Alexandrovich

Russian University of Transport (RUT),
Chair «Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: pow12@mail.ru

Рафиков Рафик Хайдарович

Российский университет транспорта
(РУТ МИИТ),
кафедра «Технология транспортного маши-
ностроения и ремонта подвижного состава»,
кандидат технических наук,
e-mail: rafis-89@mail.ru

Rafikov Rafik Khaidarovich

Russian University of Transport (RUT),
Chair «Technology of Transport Engineering
Repair of Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: rafis-89@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК РГУПС»

1 **Материалы статей** представляют в виде текстов, отформатированных и распечатанных на лазерном или струйном принтере (пригодных для сканирования) на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) в одном экземпляре. Рекомендуемый объем статьи – 5–15 страниц.

Одновременно представляют электронную версию статьи, выполненной в текстовом редакторе Word for Windows, шрифт Times New Roman, 11 pt, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание по ширине, абзацный отступ – 1,25 см, все поля – 2 см.

2 На первой странице должны быть указаны:

- **УДК** – в левом верхнем углу;
- интервал;
- **инициалы и фамилии авторов** – по центру, курсивом;
- интервал;
- **название статьи** – заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру, без переносов;
- интервал;
- **аннотация** (80–150 слов);
- **ключевые слова** (5–10 слов);
- интервал;
- **текст статьи** – печатается с переносами.
- интервал;
- **список литературы** на русском и английском языках (не менее 10 источников).

3 **Статья** должна содержать вводную часть, цель научной разработки, основную часть и выводы. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки журнала на компьютере.

4 **Буквы** латинского алфавита набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5 **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6 **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисовочная подпись обязательны.

7 **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8 **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9 **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

Условия и порядок публикации статей в журнале

- 1** Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.
- 2** Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.
- 3** Автор может прислать статью в адрес редакции:
 - по почте;
 - по электронной почте;
 - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4** Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

5 Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

6 На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.

7 Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.

Краткая информация о журнале

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный сериальный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В. И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» (www.pressa-rg.ru под индексом 53720).

Подписаться на журнал можно через агентство подписки «Урал-Пресс» и агентство «АРЗИ», распространяется журнал на территории Российской Федерации. Подписку можно оформить на квартал, на полгода или на год.

Журнал «Вестник РГУПС» бесплатно рассылается всем отраслевым вузам, в ряд вузов Министерства образования и науки России, центральным и зональным научно-техническим библиотекам, НИИ информации.

Почтовый адрес редакции:

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 (96)
2024**

Уважаемые читатели!
Вы можете подписаться на наш журнал на сайте www.pressa-rgf.ru.
Индекс журнала по каталогу 53720

**Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайте
Российской научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования
РИНЦ и Science Index**

**Требования к оформлению статей размещены на сайте
<http://vestnik.rgups.ru>**

Редакторы: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова,
А.Н. Колесниченко (английский текст)

Корректоры: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова,
А.Н. Колесниченко (английский текст)

Оригинал-макет журнала подготовлен А.О. Куделиной

Подписано в печать 27.12.2024.
Дата выхода в свет 28.12.2024.
Печать офсетная.
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 27,9.
Тираж 510 экз.
Цена свободная.

Бумага офсетная.
Изд. № 52.
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.**