

ISSN 0201-727X



ВЕСТНИК

РОСТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

№ 2
2025

ISSN 0201–727X

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

ВЕСТНИК

**Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

№ 2 (98)

Ростов-на-Дону
2025

ВЕСТНИК
Ростовского государственного университета путей сообщения

2025
№ 2 (98)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK RGUPS
Scientific and Technical Journal

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

- Ланис А.Л., Усов Д.А., Нагаев Е.И., Пушкарев В.Е.** Геотехническая модель системы «насыпь – основание» в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов в ЯНАО..... 8

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Савин Е.З.** Воздействие электромагнитного поля электрифицированных железных дорог однофазного переменного тока на поляризационные явления в волоконных световодах..... 19

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Колоденкова А.Е.** Автоматизация процесса контроля и управления доступом транспортных средств на территорию образовательной организации..... 28
- Сацюк А.В.** Оптимизация архитектуры YOLOv8 для задач захвата объекта БПЛА: анализ компромисса между точностью, скоростью и вычислительными ресурсами..... 35
- Филипченко А.С.** Применение нового метода сжатия изображений в системах машинного зрения..... 43

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Кузьмин Д.В.** Использование различных алгоритмов поиска пути в графах для решения задач пространственного развития транспортной инфраструктуры 53

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Иваночкин П.Г., Четверик М.М., Больших Е.П.** Исследование механических характеристик антифрикционного полимерного композиционного покрытия, содержащего ПТФЭ..... 64
- Кедрова Е.И., Матвеев П.В., Шашурин А.Е.** Модель виброакустической характеристики рольгангов..... 74
- Крутова В.А., Кадубовская Г.В., Фролова Д.С.** Исследование коэффициента потерь на примере рамы мостового крана тяжелой серии..... 81
- Николаев М.Е., Перфилов В.А., Коврыжко С.С., Якуткин Я.Р., Дудников А.С.** Полуавтоматизированный погрузочно-транспортный агрегат 87
- Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Сердюк И.С.** Анализ самоустановки колес цилиндрических передач с арочными зубьями..... 96
- Хиникадзе И.Т.** Экспериментальные исследования шума, генерируемого при эксплуатации сверлильных станков..... 106

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

- Григоренко П.В., Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Самойлова А.С.** Повышение качества электроэнергии на токоприёмнике современного отечественного электровоза переменного тока с коллекторным приводом 114
- Калмыков Б.Ю., Харламов П.В., Калмыкова О.М.** Повышение пассивной безопасности автобусов за счет совершенствования конструкций пассажирских сидений 126
- Менакер Г.М., Пудовиков О.Е.** Адаптивная система автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда..... 132
- Сорокина Е.В.** Совершенствование пассажирского вагона для египетских национальных железных дорог на основе исследования влияния внешних факторов..... 145
- Танаев В.Ф., Курилкин Д.Н., Грачев В.В., Федотов М.В.** Повышение эксплуатационной экономичности тепловозов нормализацией мощности силовой установки..... 154
- Шантаренко С.Г., Кузнецов В.Ф.** Оценка износа гребней бандажей колесных пар электровоза ЭП2К в области их контакта с головкой рельса..... 163

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

Герус В.А., Мишарин А.С. Моделирование взаимодействия показателей качества обслуживания и ключевых показателей эффективности в Едином сетевом технологическом процессе транспортного холдинга	171
Годованый К.А. Технологический аутсорсинг операторской деятельности в условиях профицита вагонного парка на сети железных дорог.....	179
Калмыков Б.Ю., Харламов П.В., Калмыкова О.М. Применение классических микромоделей теории следования за лидером при моделировании дорожного движения.....	188
Климов А.А. Метод исследования конфигурации продольного профиля основной части путей сортировочного парка	195
Мизгирева Е.Е. Программный комплекс выбора рациональных параметров объектов инфраструктуры в компоновочных решениях транспортного узла	208
Мишкурин П.Н. Концепция пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий	219
Подолкина С.Д., Король Р.Г. Метод факторно-аналитической оценки потенциальных мест размещения транспортно-логистических объектов.....	231
Сорокин Д.В., Хашев А.И., Наурузбаев С.М., Степовая А.И., Яновский А.П. Оценка возможности перераспределения грузопотока между различными видами транспорта на генеральных направлениях МТК «Север – Юг»: теоретические аспекты.....	243

CONTENTS

RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

- Lanis A.L., Usov D.A., Nagaev E.I., Pushkarev V.E.** Geotechnical model of the "embankment-foundation" system under conditions of permafrost soil degradation in the Yamalo-Nenets Autonomous District (YNAO)..... 8

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

- Savin E.Z.** Impact of the electromagnetic field of single-phase alternating current electrified railways on polarization phenomena in fiber optic light guides..... 19

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION
AND TELECOMMUNICATIONS

- Kolodenkova A.E.** Automation of the process of control and management of vehicle access to the territory of an educational organization..... 28
- Satsuk A.V.** Optimization of *YOLOv8* architecture for UAV object capture tasks: analysis of the trade-off between accuracy, speed and computational resources..... 35
- Filipchenko A.S.** Application of a new method of image compression in the machine vision systems..... 43

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

- Kuzmin D.V.** The use of various algorithms for finding paths in graphs to solve problems of spatial development of transport infrastructure..... 53

MECHANICAL ENGINEERING

- Ivanochkin P.G., Chetverik M.M., Bolshikh E.P.** Investigation of the mechanical characteristics of an antifriction polymer composite coating containing PTFE 64
- Kedrova E.I., Matveev P.V., Shashurin A.E.** A model of vibroacoustic characteristics of roller conveyors..... 74
- Krutova V.A., Kadubovskaya G.V., Frolova D.S.** Investigation of the loss coefficient using the example of a heavy-duty overhead crane frame..... 81
- Nikolaev M.E., Perfilov V.A., Kowryzhko S.S., Yakutkin Yu.R., Dudnikov A.S.** Semi-automated loading and transport unit..... 87
- Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Serdyuk I.S.** Analysing the self-alignment of cylindrical gear wheels with arch teeth 96
- Khinikadze I.T.** Experimental studies of noise generated during operation of drilling machines.... 106

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY

- Grigorenko P.V., Mel'nichenko O.V., Portnoy A.Yu., Samoilova A.S.** Improving the power quality on the pantograph of a modern domestic alternating current electric locomotive with a collector drive..... 114
- Kalmykov B.Yu., Kharlamov P.V., Kalmykova O.M.** Increasing the passive safety of buses by improving the design of passenger seats..... 126
- Menaker G.M., Pudovikov O.E.** Adaptive automatic control system for the pneumatic brake of a freight train..... 132
- Sorokina E.V.** Improvement of the passenger carriage for the Egyptian National Railways based on the study of the influence of external factors..... 145
- Tanaev V.F., Kurilkin D.N., Grachev V.V., Fedotov M.V.** Improving the operational efficiency of diesel locomotives by normalizing the power plant capacity..... 154
- Shantarenko S.G., Kuznetsov V.F.** Evaluation of wear of wheel set rims of electric locomotive EP2K in the area of their contact with rail head..... 163

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

Gerus V.L., Misharin A.S. Modeling the interaction of service quality indicators and key performance indicators in a single network technological process of a transport holding	171
Godovany K.A. Technological outsourcing of operator activities in conditions of a surplus of wagon fleet on the railway network.....	179
Kalmykov B.Yu., Kharlamov P.V., Kalmykova O.M. Application of classical micromodels of follow-the-leader theory in modelling road traffic.....	188
Klimov A.A. The method of studying the configuration of the longitudinal profile of the main part of the sorting yard tracks.....	195
Mizgireva E.E. A software package for selecting rational parameters of infrastructure facilities in the layout solutions of a transport hub.....	208
Mishkurov P.N. The concept of spatial-temporal optimization of transport and logistics processes of industrial enterprises.....	219
Podolinnaya S.D., Korol R.G. The method of factor-analytical assessment of potential locations of transport and logistics facilities.....	231
Sorokin D.V., Khashev A.I., Nauruzbaev S.M., Stepovaya A.I., Yanovsky A.P. Assessment of the possibility of redistributing cargo flow between transport modes on the general directions of the ITC “North – South”.....	243

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.139

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_8

*А. Л. Ланис, Д. А. Усов, Е. И. Нагаев, В. Е. Пушкарев***ГЕОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «НАСЫПЬ – ОСНОВАНИЕ»
В УСЛОВИЯХ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ЯНАО ***

Аннотация. Деградация многолетнемерзлых грунтов в Ямало-Ненецком автономном округе имеет негативный тренд на увеличение, что связано как с изменением климата, так и инженерно-хозяйственной деятельностью человека. В статье рассмотрен вопрос возникновения просадок основания земляного полотна линейной транспортной инфраструктуры в Арктической зоне Российской Федерации с точки зрения установки взаимосвязи криогенных деформаций и характеристик грунтов. Разработана геотехническая модель системы «насыпь – основание» в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов в ЯНАО, позволяющая проектировать мероприятия по повышению эксплуатационной надежности, на основе терм стабилизации грунтов или противодеформационных сооружений. Для подтверждения возможности расчетов по разработанной геотехнической модели выполнена ее верификация путем сравнения качественной и количественной картины деформирования с результатами инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемого участка автомобильной дороги Надым – Салехард.

Ключевые слова: деградация многолетнемерзлых грунтов, криогенные деформации, многолетнемерзлые грунты, земляное полотно, геотехническая модель, транспортные сооружения.

Для цитирования: Геотехническая модель системы «насыпь – основание» в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов в ЯНАО / А. Л. Ланис, Д. А. Усов, Е. И. Нагаев, В. Е. Пушкарев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 8–18. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_8.

Введение

Практически вся территория Арктической зоны характеризуется сплошным или островным распространением многолетнемерзлых пород. За период с 1971 по 2020 г. наблюдается существенный рост температурного режима в регионе: среднегодовая температура повысилась на 3,5 °С, что составляет около 0,7 °С каждые десять лет. Такие изменения отражаются на состоянии окружающей среды и грунтовых условий. Например, сравнение годовых отклонений температуры от нормы за период с 1961 по 1990 г. и с 2008 по 2021 г. показывает увеличение разницы с 1,3 до 2,9 °С [1]. При этом глубина сезонного протаивания грунтов деятельного слоя выросла с 97 до 107 см, что свидетельствует о значительном влиянии потепления на кровлю многолетнемерзлых пород.

Потепление в Арктике происходит в два раза быстрее, чем в целом по планете, и приводит к уменьшению ледового покрова, деградации мерзлоты, изменению условий циркуляции атмосферы, увеличению осадков и погодным аномалиям [2]. Так, в связи с глобальным изменением климата и отчасти техногенным воздействием человека сложился негативный тренд на прогрессирующее деформаций сооружений на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) ввиду их деградации.

По оценкам международных исследований к концу XXI века деградация ММГ продолжит ускоряться, приповерхностный слой мерзлоты может потерять до 90 % своей площади из-за дальнейшего роста температур [3].

Одним из наиболее неблагоприятных последствий изменения климата в Арктической зоне являются просадки основания земляного полотна транспортных сооружений, связанные с проявлениями инженерно-геокриологических процессов [4, 5]. Методы управления такими деформациями до сих пор нельзя признать совершенными. Поэтому решение обозначенной выше проблемы имеет существенную научную значимость, заключающуюся в получении новых подходов, технологий, способов и кон-

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

трольно-диагностических методов для управления криогенными деформациями. Это должно позволить не только решить проблему адаптации объектов линейной транспортной инфраструктуры к изменениям климата и характеристик многолетнемерзлых пород в Арктической зоне Российской Федерации [6], но и получить методологическую основу, новые научные знания для решения других научных проблем.

Для установки связей и зависимостей между криогенными процессами и изменением физико-механических характеристик системы «насыпь – основание» в условиях ЯНАО необходимо разработать и верифицировать соответствующую геотехническую модель, что и является целью настоящей работы.

Теоретические основы, предпосылки, допущения

Авторами настоящей работы ранее выявлены особенности геокриологического состояния эксплуатируемого земляного полотна автомобильной дороги Надым – Салехард, в том числе протекающие в системе «насыпь – основание» криогенных процессов и сопутствующих им деформаций [7]. Выявлены последствия негативных криогенных процессов (деградации ММГ): продольная осевая трещина покрытия, просадки обочины, продольные трещины по кромке проезжей части и на откосах раскритием до 10 см, а также термокарстовые просадки в полосе отвода у подошвы земляного полотна, которые можно считать характерными для системы «насыпь – основание» в условиях деградации ММГ в ЯНАО [7]. На рис. 1 представлен геокриологический профиль характерного участка земляного полотна в соответствии с результатами исследований, приведенных в статье [7].

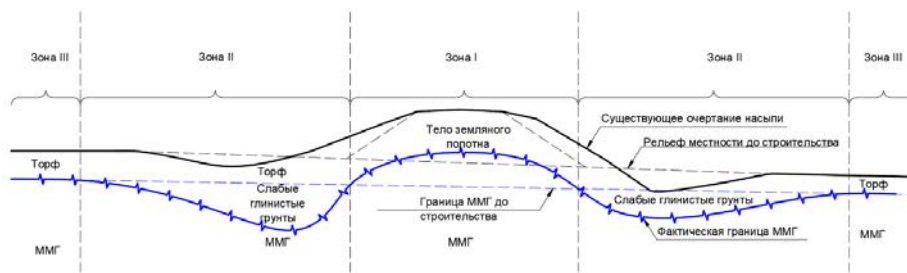


Рис. 1. Поперечный геокриологический профиль характерного участка земляного полотна [7]

Ранее выполненные авторами исследования позволили сформулировать следующие особенности геокриологического состояния характерного для условий ЯНАО участка эксплуатируемой насыпи:

«...– грунты основания и тела земляного полотна под проезжей частью находятся в многолетнемерзлом состоянии;

– максимальная величина деградации ММГ произошла под откосными частями земляного полотна и в полосе отвода на достаточно большую ширину, что связано с нарушением естественных условий теплообмена за счет аккумуляции снега в холодный период года;

– после деградации ММГ формируются слабые водонасыщенные грунты, зоны термических просадок заполняются поверхностными водами;

– деформирование конструктивных элементов автомобильной дороги, в зависимости от зоны, происходит как за счет термических просадок (основание откосов и полоса отвода), так и за счет активных сдвиговых смещений грунтов деятельного слоя в откосных частях земляного полотна» [7].

Таким образом, для оценки влияния криогенных деформаций на эксплуатационные показатели линейных транспортных сооружений в условиях ЯНАО необходимо учитывать особенности физико-механических характеристик грунтов земляного полотна и основания, в том числе их состояние (талое, мерзлое и оттаивающее).

Известным фактом является различие в процессе осадки мерзлых грунтов при оттаивании и талых грунтов. Мерзлые грунты при оттаивании имеют запаздывание во времени деформаций, что связано с проявлением упруговязких и вязкопластичных свойств [8]. Для деформирования таких грунтов характерна стадия пластики во всей области изменения напряжений. Помимо этого, необходимо учитывать значительную сжимаемость и зависимость проницаемости от уплотнения.

Ю.К. Зарецким [8] введено понятие о трех зонах, образующихся, когда мерзлый грунт подвергается воздействию внешних сил и источника тепла. Так, в первой зоне температура грунта выше температуры фазовых переходов, во второй – грунт находится в пластичномерзлом состоянии, в третьей

– грунт находится в мерзлом состоянии. Такой подход учитывает работу грунтов основания сооружений с точки зрения их состояния, однако, для транспортных сооружений большое влияние оказывают геометрические параметры модели, что усложняет решение задачи описанным аналитическим методом.

Похожий подход к описанию оттаивания грунтов был представлен в статье [9]. Авторами была разработана одномерная модель для расчета осадки оттаивающих сезонно-мерзлых грунтов земляного полотна, которая представлена многослойной средой, состоящей из оттаявшего слоя (переменной мощности), слоя сезонно-мерзлого грунта и слоя грунта не попадающего в границы деятельного слоя.

Решение задачи деформирования железнодорожного земляного полотна на основе подхода, предложенного Ю. К. Зарецким, было описано в работах [10, 11] с применением метода конечных элементов (МКЭ). Была предложена трехслойная модель оттаивающего основания, состоящая из оттаявшего грунта, прослоя оттаивающего грунта и нижнего слоя мерзлого грунта. Границы между слоями переменны [11]. Так, применение МКЭ позволило учитывать геометрические параметры земляного полотна и сложное инженерно-геологическое строение с заданными характеристиками грунтовых элементов.

Необходимо отметить, что описанные выше подходы к решению сложившейся проблемы не в полной мере учитывают особенности геокриологического состояния эксплуатируемого земляного полотна характерного для условий ЯНАО, перечисленные ранее. В том числе необходимо учитывать, что грунтовая среда является многослойной, где каждый слой имеет свои физико-механические характеристики и поведение. Для выполнения качественных расчетов и получения адекватных результатов необходимо прежде всего верно выбрать модели поведения грунтов.

Так, в поперечном профиле на рассматриваемом участке автомобильной дороги Надым – Салехард можно выделить следующие слои:

- дорожная одежда, рекомендуемая модель поведения – линейно-упругая;
- земляное полотно автомобильной дороги (состояние талое, консолидация завершилась), рекомендуемая модель – упрочняющегося грунта. Такая модель дает хорошее соответствие опытным данным на всем диапазоне деформаций, поскольку эта модель, в отличие от модели Мора – Кулона, позволяет учесть пластическое деформирование грунта на стадии его допредельного состояния и учесть нелинейное поведение грунта. Эта модель включает: в качестве поверхности разрушения – формулировку Мора – Кулона; для описания упругой области напряженно-деформированного состояния – гиперболическую формулировку DuncanChang [12] с изменяемыми модулями упругости для траектории первичного нагружения и траектории разгружения – повторного нагружения; для описания пластических сдвиговых и объемных деформаций – две функции текучести для девиаторного и изотропного нагружений;

- сезоннооттаивающий грунт, представленный сильноразложившимся водонасыщенным торфом и глинистыми грунтами текучей консистенции (состояние талое, консолидация не завершилась), рекомендуемая модель – ползучести слабого грунта, построенная в рамках теории вязкопластичности грунта [13]. Такая модель используется для описания, зависящего от времени поведения слабых грунтов, таких как нормально уплотненные глины и торф. Модель учитывает логарифмическое первичное и вторичное уплотнение. Ползучесть создается до тех пор, пока имеется эффективное напряжение. В реальности эффективное напряжение приблизительно равно напряжению от собственного веса грунта, это говорит о том, что деформации будут происходить без дополнительного пригруза;

- таликовая область в массиве ММГ представлена сезоннооттаивающими грунтами, которые переместились в массив ММГ ввиду его деградации под откосными частями (состояние талое, консолидация не завершилась), рекомендуемая модель – ползучести слабого грунта;

- ММГ, рекомендуемая модель поведения – Кулона – Мора. Такая модель может быть использована, т. к. данный слой имеет высокие значения прочностных и деформационных характеристик и практически не деформируется.

Таким образом, анализ современных подходов к выбору моделей поведения грунтов для выполнения расчетов методом конечных элементов позволил обосновать модели поведения грунтов для геотехнической модели системы «насыпь – основание» в условиях деградации ММГ в ЯНАО.

Результаты исследования

В настоящей статье для учета особенностей геокриологического состояния характерного для условий ЯНАО участка эксплуатируемой насыпи разработана геотехническая модель поперечного

профиля насыпи в условиях деградации ММГ в ЯНАО (рис. 2). Такая модель учитывает как существующие исследования [8–11], так и модели поведения соответствующих грунтовых слоев, представленные выше.

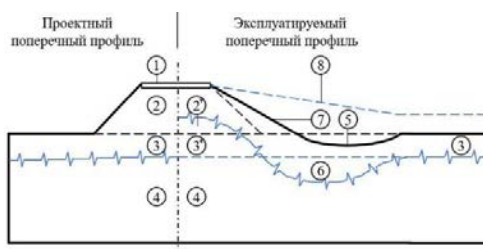


Рис. 2. Геотехническая модель поперечного профиля насыпи в условиях деградации ММГ в ЯНАО

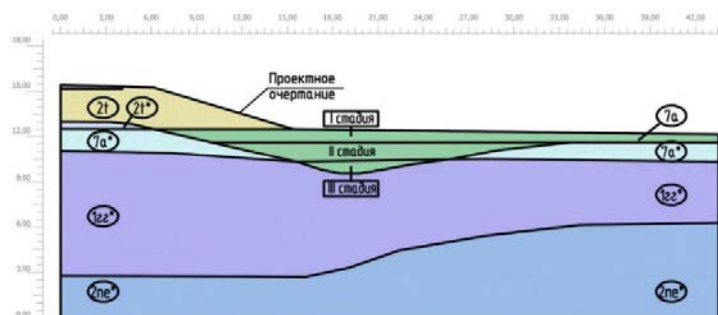
На рис. 2 представлены два полупоперечных профиля: левый – проектный, правый – эксплуатируемый, имеющий характерную деформацию. Учитывая анализ слоев поперечного профиля, выполненный выше, и рекомендуемые модели поведения грунтов в условиях исследования, элементы модели можно свести в табл. 1.

Таблица 1

Элементы разработанной модели

Вводные параметры	Ед. изм.	Примечание
Геометрические параметры модели		
Ширина земляного полотна	м	Принимается по проекту (при новом строительстве) или по результатам обследования
Высота насыпи	м	
Заложение откосов	-	
Глубина и ширина термической просадки (элемент 5)	м	Принимается по результатам обследования
Высота снегового покрова (элемент 8)	м	
1 – дорожная одежда автомобильной дороги (модель линейно-упругая)		
Удельный вес	кН/м ³	Принимаются по результатам обследования
Коэффициент Пуассона	-	
Модуль упругости	кН/м ²	
2 – проектное очертание тела земляного полотна / 7 – Существующее очертание тело земляного полотна после возникновения деградации ММГ (модель упрочняющегося грунта)		
Удельный вес	кН/м ³	Принимается по результатам инженерно-геологических изысканий
Коэффициент Пуассона	-	
Секущий модуль жесткости при стандартном	кН/м ²	
Касательный модуль жесткости при первичном нагружении	кН/м ²	
Жесткость при разгрузке / повторном нагружении	кН/м ²	
Удельное сцепление	кН/м ²	
Угол внутреннего трения	градус	
Угол дилатансии	градус	
2* – грунт тела земляного полотна, перешедший в многолетнемерзлое состояние при эксплуатации / 3* – сезонно-оттаивающий грунт, перешедший в многолетнемерзлое состояние при эксплуатации / 4 – многолетнемерзлый грунт основания (модель Кулона – Мора)		
Удельный вес	кН/м ³	Принимается по результатам инженерно-геологических изысканий
Коэффициент Пуассона	-	
Модуль упругости	кН/м ²	
Угол внутреннего трения	градус	
Угол дилатансии	градус	
3 – сезоннооттаивающий грунт / 6 – таликовая область в массиве ММГ (модель ползучести слабого грунта)		
Удельный вес	кН/м ³	Принимается по результатам инженерно-геологических изысканий
Коэффициент пористости		
Удельное сцепление	кН/м ²	
Угол внутреннего трения	градус	
Модифицированный коэффициент сжимаемости	-	
Модифицированный коэффициент разбухания	-	
Модифицированный коэффициент ползучести	-	

Участок автомобильной дороги имеет две полосы движения. Земляное полотно представлено насыпью. Дорожная одежда капитального типа с асфальтобетонным покрытием состоит из четырех основных слоев мощностью до 60 см. Инженерно-геологическое строение определено по результатам бурения технических скважин с отбором образцов ненарушенной структуры, дальнейшим их лабораторным испытанием и объединением в инженерно-геологические элементы (рис. 3).



Критерием верификации модели будет являться получение качественной и количественной картины деформирования при моделировании проектного очертания насыпи, соответствующей ре-

результатам инженерно-геокриологического мониторинга, выполненного на данном участке. Допускаемой величиной отклонения результатов считается отличие в 30 %, как для прочностных и деформационных характеристик грунтов в соответствии с [13].

В программном комплексе, основанном на методе конечных элементов, была сформирована цифровая модель полупоперечного профиля на участке автомобильной дороги Надым – Салехард (рис. 3). В расчетах используется полупоперечник правый, как имеющий наибольшую термическую просадку.

При верификации была выполнена серия расчетов с целью подтверждения возможности оценки деформаций при различной величине оттаявшей толщи, определенной по результатам натурных наблюдений. Выполненные расчеты геотехнической модели поперечного профиля насыпи в условиях деградации ММГ в ЯНАО на участке автомобильной дороги Надым – Салехард объединены в следующие стадии:

– нулевая стадия – наибольшее промерзание сезоннооттаивающих грунтов, грунты естественного основания находятся в мерзлом состоянии, насыпь отсутствует;

– I стадия – насыпь отсыпана до проектного очертания в зимний период, кровля ММГ поднялась в насыпь (ИГЭ-2т*), сезоннооттаивающие грунты находятся в талом состоянии (ИГЭ-7а);

– II стадия – деградация ММГ в основании, грунты ИГЭ-7а* переходят в талое состояние ИГЭ-7а, образуется термическая просадка;

– III стадия – продолжение деградации ММГ в основании, грунты ИГЭ-1гг* переходят в талое состояние, грунты ИГЭ-7а занимают место ИГЭ-1гг*. Стадия соответствует существующим инженерно-геологическим условиям на момент обследования [7]. По результатам лабораторных исследований грунтов были получены физико-механические характеристики выделенных инженерно-геологических элементов (рис. 3) необходимые для задания моделей поведения грунтов, описанных ранее (табл. 1), которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Физико-механические характеристики выделенных
инженерно-геологических элементов**

Наименование характеристики	Единица измерения	Номер элемента модели				
		2т	7а	7а*	2пе*	1гг*
		Песок мелкий неоднородный маловлажный средней плотности	Торф сильноразложившийся водонасыщенный	Торф твердомерзлый сильноразложившийся атакситовой криотекстуры	Суглинок легкий пылеватый пластичномерзлый льдистый слоисто-сетчатой криотекстуры при оттаивании текучий	Суглинок легкий с галькой пластичномерзлый слабльдистый массивной криотекстуры при оттаивании мягкопластичный,
Удельный вес	кН/м ³	17,17	12,07	10,99	17,95	18,93
Коэффициент пористости	д.е.	0,619	2,440	-	-	-
Модуль упругости	МПа	-			Не деформируется. > 300 МПа	
Секущий модуль жесткости при стандартном	кН/м ²	9100	-	-	-	-
Касательный модуль жесткости при первичном нагружении	кН/м ²	27600	-	-	-	-
Жесткость при разгрузке / повторном нагружении	кН/м ²	70300	-	-	-	-
Удельное сцепление	кН/м ²	3	30	-	-	-
Угол внутреннего трения	градус	29,7	10	-	-	-
Модифицированный коэффициент сжимаемости	-	-	0,1646	-	-	-
Модифицированный коэффициент разбухания	-	-	0,0532	-	-	-
Модифицированный коэффициент ползучести	-	-	0,0504	-	-	-

Выполненный расчет методом конечных элементов позволил получить деформированный вид цифровой модели полупоперечного профиля. На рис. 4 представлена схема деформирования, объединяющая все стадии расчета. Сплошной заливкой обозначены грунты основания и тела насыпи, которые в процессе деформации остаются неподвижными и не подвергаются значительным перемещениям. Градиентной заливкой выделены грунты, испытывающие деформации, при которых происходит их вдавливание, что отражает сложное взаимодействие между различными слоями. Штриховкой показаны грунты, подверженные перемещениям, а штриховкой с заливкой – те, которые замещают друг друга или переходят из одного состояния в другое. Характерным примером является ИГЭ-7а*, который по мере деградации ММГ переходит в ИГЭ-7а, что наглядно демонстрирует переход грунта из твердомерзлого состояния в талое, что сопровождается значительными перемещениями и изменением его характеристик. Такая визуализация позволяет четко проследить последовательность деформационных процессов, происходящих в насыпи и основании, и оценить их влияние на сооружение в целом.

На первой стадии расчета, при переходе грунтов деятельного слоя (ИГЭ-7а*) в талое состояние (ИГЭ-7а), происходит перемещение дневной поверхности на 0,16 м вблизи подошвы откоса насыпи. Тонкой цветной штриховой линией обозначены очертания тела насыпи после реализации деформаций. В результате грунт насыпи (ИГЭ-2т) вытесняет торф (ИГЭ-7а), частично занимая его место.

На второй стадии расчета происходит деградация ММГ, ИГЭ-7а* переходит в талое состояние. Этот фазовый переход сопровождается новыми деформациями, влекущими за собой образование термической просадки глубиной до 0,34 м. Перемещения на этой стадии показаны цветной штриховой линией. Грунт насыпи продолжает перемещаться, вдавливая и замещая грунт ИГЭ-7а.

На третьей стадии продолжается деградация ММГ, зона термической просадки достигает 0,52 м, ее границы обозначены сплошной утолщенной цветной линией. На этом этапе продолжается оттаивание грунтов, и в нижней части разреза торф ИГЭ-7а вдавливается в мерзлый грунт ИГЭ-1гг*. Очертания насыпи практически не изменяются, а торф ИГЭ-7а под телом насыпи полностью переходит в талое состояние.

Существующее очертание насыпи показано черной утолщенной сплошной линией и практически совпадает с результатами расчета. Реальная термическая просадка составляет 0,58 м, что превышает просадку на третьей стадии расчета на 10,3 %. Для наглядности деформации на рис. 4 визуальны увеличены в три раза.

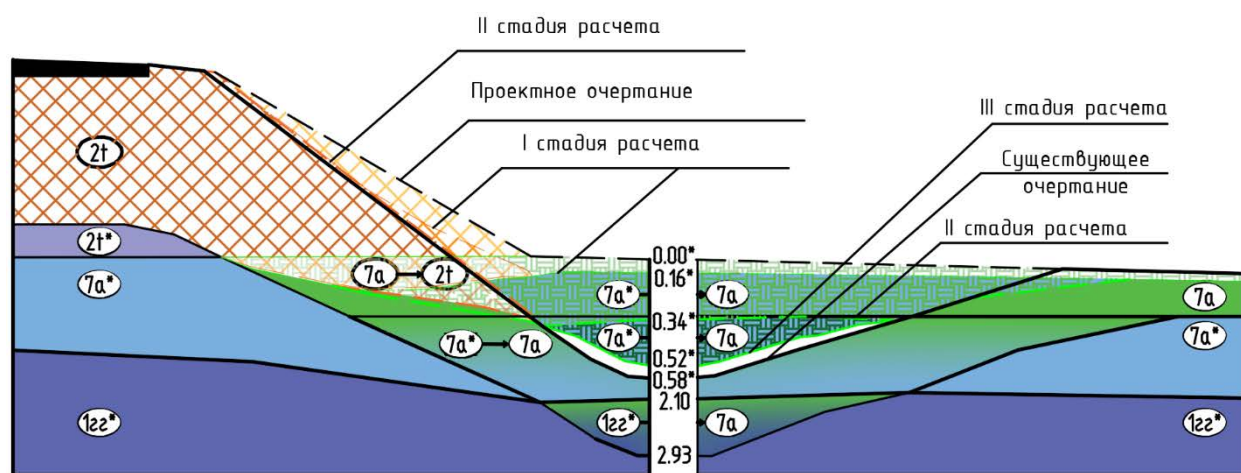


Рис. 4. Деформированный вид цифровой модели полупоперечного профиля

Для возможности подтверждения количественной картины деформирования выполнено наложение деформированного вида и изолиний перемещений узлов сетки по результатам третьей стадии расчета (рис. 5).

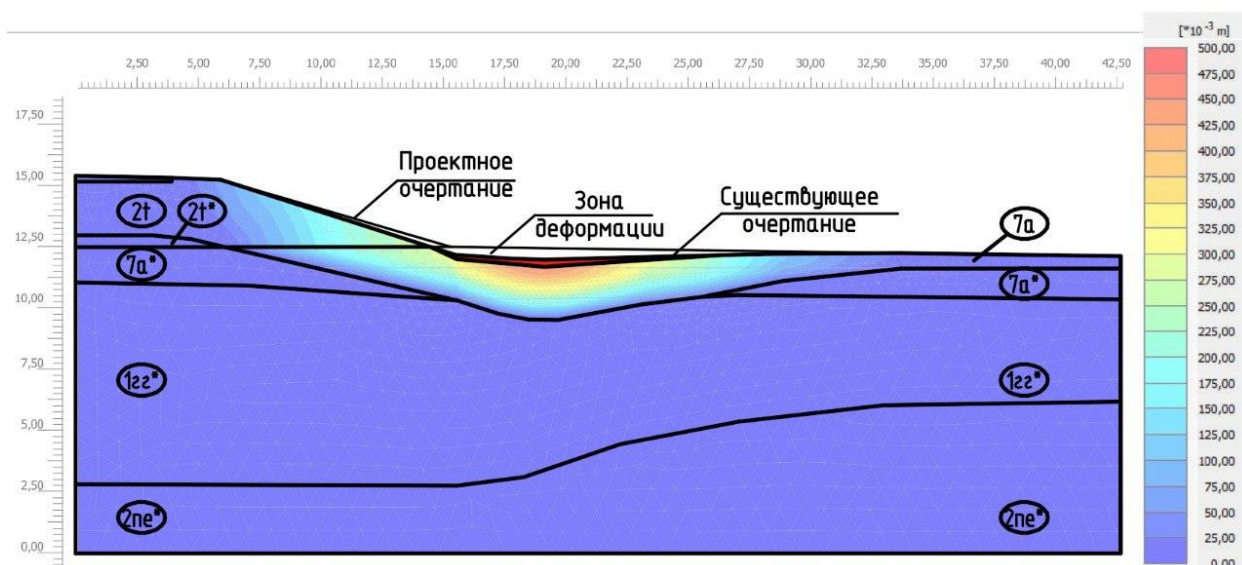


Рис. 5. Качественная и количественная картина деформирования цифровой модели полуперечного профиля

По результатам выполненного расчета разработанной модели были получены следующие результаты:

- качественно картина деформирования полуперечного профиля на участке автомобильной дороги Надым – Салехард близко отображает деформированный вид цифровой модели (рис. 4), форма термической просадки практически совпадает;

- в откосных частях фиксируются активные сдвиговые смещения грунтов деятельного слоя, в связи с ползучестью и одновременным перераспределением объема слабых грунтов в основании, представленных сильноразложившимся водонасыщенным торфом, который в свою очередь перемещается вниз ввиду вытаивания ледяных включений (рис. 5);

- количественная картина деформирования подтверждается, суммарные перемещения узлов сетки модели достигли в месте расположения термической просадки 0,52 м, что на 10,3 % не совпадает с величиной просадки, определенной по результатам обследования (0,58 м).

Анализируя полученные результаты, можно резюмировать следующее:

- обоснованы модели поведения грунтов для геотехнической модели в условиях деградации ММГ в ЯНАО;

- разработана модель, позволяющая оценивать и прогнозировать деформирование насыпи при деградации ММГ в условиях ЯНАО, не прибегая к анализу характера изменений его температурного поля;

- сформулированы основные положения по моделированию участков, подвергшихся или потенциально подверженных криогенным деформациям;

- подтверждена качественная и количественная картина деформирования при сопоставлении ее с характером деформирования и величиной реальных деформаций в области термической просадки;

- модель верифицирована и может быть использована для учета фактора деформирования в составе методики проектирования.

Эксплуатация линейных транспортных сооружений в условиях деградации ММГ в ЯНАО требует проектирования и реализации специальных противодеформационных мероприятий, оценка эффективности которых возможна с использованием разработанной геотехнической модели.

Список литературы

- 1 Ревин, Б. А. Климатические риски социального развития Ямало-Ненецкого автономного округа / Б. А. Ревин, Т. Л. Харьков // Проблемы прогнозирования. – 2023. – № 4 (199). – С. 157–167. – DOI 10.47711/0868-6351-199-157-167.
- 2 Государственное автономное учреждение Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики». – URL:

References

- 1 Revin, B. A. Climatic risks of the social development of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug / B. A. Revin, T. L. Kharkov // Problems of forecasting. – 2023. – No. 4 (199). – P. 157–167. – DOI 10.47711/0868-6351-199-157-167.
- 2 The State Autonomous Institution of the Yamalo-Nenets Autonomous District "Scientific

<https://arctic.yanao.ru/presscenter/news/90294/>
(дата обращения: 17.10.2024).

3 Climate Change 2021 : The Physical Science Basis / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani [et al.] // Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ; Cambridge University Press : Cambridge, UK. – 2021. – ISBN 978-1-009-15789-6.

4 **Fondjo, S. A. A.** Assessment of the Mineral Composition of Heaving Soils Using Geotechnical Properties / S. A. A. Fondjo, E. Theron // Civil Engineering and Architecture, 8, 619–631. – 2020. – ISSN 2334-2986.

5 **Samec, P.** Soil Degradation Processes Linked to Long-Term Forest-Type Damage / P. Samec, A. Kucera, G. Tomasova // Forest Degradation Under Global Change. IntechOpen, 2023. – ISBN 978-1-80539-496-5.

6 Указ Президента РФ № 529 от 18.06.2024 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» // Президент России [официальный сайт]. – URL: <http://krem-lin.ru/acts/news/74328> (дата обращения: 24.09.2024).

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

8 **Зарецкий, Ю. К.** Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений / Ю. К. Зарецкий. – Москва : Стройиздат, 1988. – 352 с. – ISBN 5-274-00297-3.

9 **Ланис, А. Л.** Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, Д. А. Усов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (58). – С. 104–111. – ISSN 1815-9265.

10 **Ашпиз, Е. С.** Земляное полотно в условиях многолетнемерзлых грунтов северного широтного хода / Е. С. Ашпиз // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 22–25. – ISSN 0131-5765.

11 **Вавринюк, Т. С.** Оценка устойчивости и деформативности земляного полотна железных дорог в условиях распространения мерзлоты : специальность 05.22.06 «Железнодорожный

Center for Arctic Studies". – URL: <https://arctic.yanao.ru/presscenter/news/90294/> / (date of access: 10/17/2024).

3 Climate Change 2021 : The Physical Science Basis / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani [et al.] // Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ; Cambridge University Press : Cambridge, UK. – 2021. – ISBN 978-1-009-15789-6.

4 **Fondjo, S. A. A.** Assessment of the Mineral Composition of Heaving Soils Using Geotechnical Properties / S. A. A. Fondjo, E. Theron // Civil Engineering and Architecture, 8, 619–631. – 2020. – ISSN 2334-2986.

5 **Samec, P.** Soil Degradation Processes Linked to Long-Term Forest-Type Damage / P. Samec, A. Kucera, G. Tomasova // Forest Degradation Under Global Change. IntechOpen, 2023. – ISBN 978-1-80539-496-5.

6 Decree of the President of the Russian Federation No. 529 dated 18.06.2024 "On approval of priority areas of scientific and technological development and the list of the most important high-tech technologies" // President of Russia [Official website]. – URL: <http://krem-lin.ru/acts/news/74328> (date of access: 09/24/2024).

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

8 **Zaretsky, Yu. K.** The viscoplasticity of soils and calculations of structures / Yu. K. Zaretsky. – Moscow : Stroyizdat, 1988. – 352 p. – ISBN 5-274-00297-3.

9 **Lanis, A. L.** The effect of thawing of seasonally frozen soils on the deformation of the earth bed / A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, D. A. Usov // The Siberian Transport University Bulletin. – 2021. – No. 3 (58). – P. 104–111. – ISSN 1815-9265.

10 **Ashpiz, E. S.** The earth bed in the conditions of permafrost soils of the northern latitudinal course / E. S. Ashpiz // Track and track facilities. – 2021. – No. 3. – P. 22–25. – ISSN 0131-5765.

11 **Vavrinyuk, T. S.** Assessment of the stability and deformability of the railway roadbed in conditions of permafrost spread : specialty 05.22.06 "Railway track, survey and design of railways" :

путь, изыскание и проектирование железных дорог»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вавринюк Татьяна Сергеевна; МГУПС (МИИТ). – Москва, 2013. – 204 с.

12 **Schanz, T.** On the Modeling of the Mechanical Behavior of Friction Materials. Reports of the Institute of Geotechnics 45 / T. Schanz // University of Stuttgart. – Stuttgart, 1998. – 152 p.

13 PLAXIS, 2D Version 8 / R. B. J. Brinkgreve [et al.]. – Rotterdam: Balkema, 1997. – 200 p. – ISBN 90-5410-891-3.

14 **ГОСТ 20522-2012.** Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2013.

dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Vavrinyuk Tatiana Sergeevna; MGUPS (MIIT). – Moscow, 2013. – 204 p.

12 **Schanz, T.** On the Modeling of the Mechanical Behavior of Friction Materials. Reports of the Institute of Geotechnics 45 / T. Schanz // University of Stuttgart. – Stuttgart, 1998. – 152 p.

13 PLAXIS, 2D Version 8 / R. B. J. Brinkgreve [et al.]. – Rotterdam: Balkema, 1997. – 200 p. – ISBN 90-5410-891-3.

14 **GOST 20522-2012.** Soils. Methods of statistical processing of test results. – Moscow: Standartinform, 2013.

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

GEOTECHNICAL MODEL OF THE "EMBANKMENT – FOUNDATION" SYSTEM UNDER CONDITIONS OF PERMAFROST SOIL DEGRADATION IN THE YAMALO-NENETS AUTONOMOUS DISTRICT (YNAO)

Abstract. The degradation of permafrost soils in the Yamalo-Nenets Autonomous District (YNAO) shows a negative trend of increasing, which is associated with both climate change and human engineering and economic activities. The article examines the issue of the occurrence of ground subsidence in the foundation of linear transport infrastructure in the Arctic zone of the Russian Federation from the perspective of establishing a relationship between cryogenic deformations and soil characteristics. A geotechnical model of the "embankment – foundation" system has been developed for conditions of permafrost degradation in the YNAO, enabling the design of measures to improve operational reliability through soil thermal stabilization or anti-deformation structures. To confirm the feasibility of calculations based on the developed geotechnical model, its verification was carried out by comparing qualitative and quantitative deformation patterns with the results of engineering-geocryological monitoring of an operational section of the Nadym – Salekhard highway.

Keywords: permafrost soil degradation, cryogenic deformations, permafrost soils, embankment, geotechnical model, transport facilities.

For citation: Geotechnical model of the "embankment-foundation" system under conditions of permafrost soil degradation in the Yamalo-Nenets Autonomous District (YNAO) / A. L. Lanis, D. A. Usov, E. I. Nagaev, V. E. Pushkarev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 8–18. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_8.

Сведения об авторах

Ланис Алексей Леонидович

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

Усов Дмитрий Андреевич

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

Information about the authors

Lanis Alexey Leonidovich

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

Usov Dmitry Andreevich

Siberian State Transport University (STU), Chair "Railway and Railroad Facilities", Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: usovda96@ya.ru

Нагаев Егор Игоревич

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

Пушкарев Владислав Евгеньевич

Школа естественных наук,
Тюменский государственный университет,
ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения
Арктики»,
кафедра прикладной и технической физики,
младший научный сотрудник,
аспирант,
e-mail: vladpuskr@mail.ru

Nagaev Egor Igorevich

Siberian State Transport University (STU),
Chair "Railway and Railroad Facilities",
Lecturer,
e-mail: einagaev@mail.ru

Pushkarev Vladislav Evgenievich

School of Natural Sciences,
Tyumen State University, State Autonomous
Institution of Yamal-Nenets Autonomous District "
Scientific Center for Arctic Studies",
Chair of Applied and Technical Physics,
Junior Researcher,
Postgraduate Student,
e-mail: vladpuskr@mail.ru

TRANСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 535.51 : 621.372.822

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_19

Е. З. Савин

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ**

Аннотация. Показано, что под действием внешнего электрического поля в одномодовом волоконном световоде проявляется эффект Керра, а под действием магнитного поля – эффект Фарадея. При этом происходит изменение эллиптичности поляризованного излучения и поворот большой оси эллипса. Изменение указанных параметров поляризованного излучения приводит к усилению поляризационной модовой дисперсии. Выполнена оценка суммарного уширения импульсов за счет воздействия электромагнитного поля. В работе констатируется, что такое уширение импульсов совместно с уширением импульсов за счет хроматической дисперсии становится причиной значительного ограничения длины регенерационного участка и уменьшения пропускной способности волоконных световодов.

Ключевые слова: электромагнитное поле, волоконный световод, эффект Керра, эффект Фарадея, длина регенерационного участка, скорость передачи информации.

Для цитирования: Савин, Е. З. Воздействие электромагнитного поля электрифицированных железных дорог однофазного переменного тока на поляризационные явления в волоконных световодах / Е. З. Савин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 19–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_19.

Введение

Основу волоконно-оптического кабеля (ВОК) составляет волоконный световод (ВС), который в данный момент является самой перспективной направляющей средой для передачи информации. При использовании методов волнового мультиплексирования пропускная способность волоконных световодов действительно не знает границ.

При строительстве волоконно-оптической магистрали на железнодорожном транспорте наиболее производительным способом является подвеска ВОК на опорах контактной сети электрифицированных железных дорог. В работе [1] рассматриваются внешние факторы, которые при этом могут оказать воздействие на поляризационные явления в волоконных световодах. К числу подобного внешнего воздействия можно отнести следующие факторы, суть которых приведена в соответствующей литературе: механические вибрации [2], электромагнитное поле [3], температура окружающей среды [4], поле сверхвысоких частот [5].

Реальный волоконный световод представляет собой анизотропную среду, в которой фаза для двух ортогонально поляризованных мод имеет различные значения. Вследствие этого составляющие электромагнитной волны распространяются с разной скоростью, что приводит к уширению импульсов. Это явление называется поляризационной модовой дисперсией (*PMD*), но проявляется она значительно слабее, чем основной вид дисперсии в одномодовых оптических волокнах – хроматическая. Однако внешние факторы вносят свой вклад в усиление анизотропии волоконного световода и соответственно к увеличению *PMD*.

При распространении электромагнитной волны в волоконном световоде наблюдается эллиптическая поляризация, когда конец вектора напряженности электрического поля описывает поверхность эллиптического цилиндра. Эллиптическая поляризация характеризуется двумя параметрами: эллиптичностью (отношение малой оси к большой оси эллипса) и углом поворота большой оси эллипса. Действие внешних факторов приводит к изменению указанных параметров поляризованного излучения.

Анализируя степень влияния вышеприведенных причин на поляризационную модовую дисперсию, необходимо отметить, что доминирующее воздействие на параметры волоконного световода оказывает электромагнитное поле электрифицированных железных дорог, так как волоконно-оптический кабель располагается на незначительном удалении от контактной подвески. В настоящее время существует утверждение, что волоконные световоды обладают высокой защищенностью от воздействия

внешних электромагнитных полей [6]. Однако, доказательства, представленные в настоящей работе, опровергают это общепринятое положение. Целью данной работы является определение дальности непосредственной связи и пропускной способности волоконных световодов с учетом проявления поляризационной модовой дисперсии, которая возникает за счет действия внешнего электромагнитного поля электрифицированных железных дорог.

Основная часть

Для более детальной реализации поставленной цели электромагнитное воздействие на поляризационные явления в волоконном световоде может быть условно представлено в виде суммарного действия отдельно электрического и магнитного полей.

В лаборатории «Волоконная оптика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения была разработана экспериментальная установка по исследованию влияния электрического поля на поляризационные явления в волоконном световоде [7].

Выполненные экспериментальные исследования можно представить в виде соответствующих графиков, которые приведены на рис. 1 и 2. При этом прослеживается четкая связь между полученными результатами и так называемой начальной эллиптичностью, которая наблюдается на выходе волоконного световода при отсутствии воздействия внешнего электрического поля.

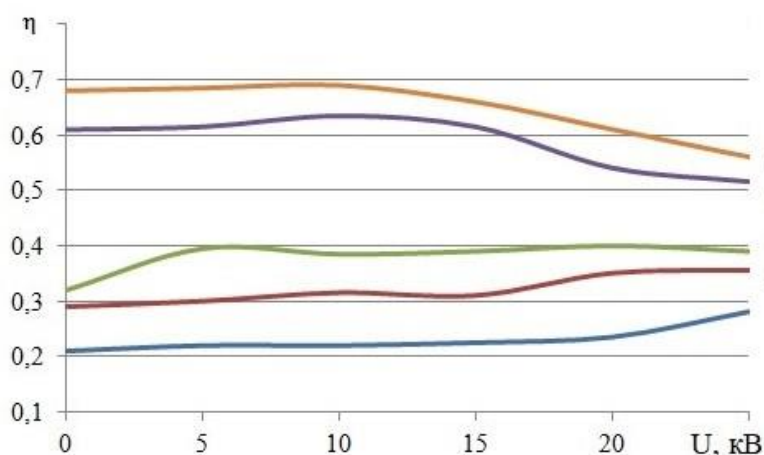


Рис. 1. Зависимость эллиптичности излучения для волокна типа NZDSF от напряжения внешнего электрического поля и соответствующих значений начальной эллиптичности:

1 – $\eta_0 = 0,21$; 2 – $\eta_0 = 0,29$; 3 – $\eta_0 = 0,32$; 4 – $\eta_0 = 0,61$; 5 – $\eta_0 = 68$.

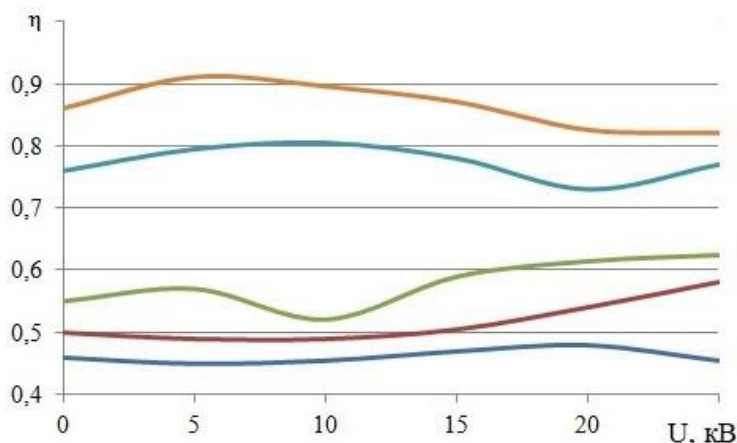


Рис. 2. Зависимость эллиптичности излучения для волокна типа SF от напряжения внешнего электрического поля и соответствующих значений начальной эллиптичности:

1 – $\eta_0 = 0,46$; 2 – $\eta_0 = 0,50$; 3 – $\eta_0 = 0,55$; 4 – $\eta_0 = 0,76$; 5 – $\eta_0 = 0,86$

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что угол поворота большой оси эллипса поляризованного излучения остается величиной постоянной. Изменяется только эллиптичность. Этот факт свидетельствует о том, что в волоконном световоде, помещенном во внешнее электрическое поле, проявляется электрооптический эффект Керра. В волоконном световоде усиливается

анизотропия, что приводит к появлению разности фаз ортогональных мод и соответствующему уширению импульсов оптических сигналов.

Уширение импульсов $\tau_{\text{эл}}$ за счет разности фаз $\Delta\varphi$ ортогональных составляющих электромагнитной волны, распространяющейся по волоконному световоду, определится [8]:

$$\tau_{\text{эл}} = \Delta\varphi \cdot \lambda / 2\pi c.$$

Соответствующая разность фаз рассчитывается по формуле:

$$\Delta\varphi = \arccos(\eta_0) \left(\frac{1}{1 - \eta} \right),$$

где η – эллиптичность на выходе волоконного световода при воздействии внешнего электрического поля.

Тогда уширение импульсов, вызванное влиянием внешнего электрического поля, рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{эл}} = \frac{\lambda \cdot \arccos(\eta_0) \left(\frac{1}{1 - \eta} \right)}{2\pi c} \cdot \frac{c}{\text{км}}. \quad (1)$$

Выполненные теоретические расчеты [9], основу которых составили уравнения Максвелла, показали, что в точке расположения ВОК на опорах контактной сети в зависимости от наличия и расположения проводов ДПР значения индуцируемого напряжения находятся в пределах 9–12 кВ.

Если воспользоваться данными из вышеприведенных графиков (рис. 1, 2) и формулой (1), то можно рассчитать уширение импульсов для различных типов волоконных световодов. При этом для оптических волокон типа NZDSF расчеты выполнены на длине волны $\lambda = 1550$ нм, а для волокон типа SF на длине волны $\lambda = 1310$ нм при воздействии электрического поля, величина потенциала которого находится в пределах 9–12 кВ. Соответствующие результаты расчетов приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Уширение импульсов в оптическом волокне типа NZDSF в зависимости от напряжения внешнего электрического поля

$\tau_{\text{эл}}, \text{ пс/км}$	Напряжение внешнего электрического поля (кВ)				Среднее значение $\tau_{\text{эл}}, \text{ пс/км}$
	9	10	11	12	
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,21$	1,43	1,44	1,44	1,44	1,44
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,29$	1,53	1,54	1,54	1,53	1,54
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,32$	1,69	1,67	1,67	1,68	1,68
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,61$	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,68$	2,22	2,18	2,15	2,12	2,17

Таблица 2

Уширение импульсов в оптическом волокне типа SF в зависимости от напряжения внешнего электрического поля

$\tau_{\text{эл}}, \text{ пс/км}$	Напряжение внешнего электрического поля (кВ)				Среднее значение $\tau_{\text{эл}}, \text{ пс/км}$
	9	10	11	12	
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,46$	1,39	1,40	1,40	1,41	1,40
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,50$	1,41	1,43	1,46	1,49	1,44
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,55$	1,43	1,43	1,46	1,49	1,45
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,76$	2,66	2,59	2,52	2,46	2,56
$\tau_{\text{эл}} (\text{пс/км})$ при $\eta_0 = 0,86$	3,72	3,55	3,39	3,13	3,45

Из результатов, приведенных в табл. 1, 2, следует, что *PMD* проявляется сильнее в волоконных световодах типа SF. Кроме того, независимо от типа волокна уширение импульсов возрастает с увеличением начальной эллиптичности.

Для исследования влияния магнитного поля на поляризационные явления в волоконном световоде была также разработана экспериментальная установка, структурная схема которой приведена в [10].

В ходе экспериментов было установлено, что в результате воздействия внешнего магнитного поля в волоконном световоде возникает эффект Фарадея, который проявляется в изменении угла поворота большой оси эллипса поляризованного излучения.

Угол поворота большой оси эллипса в волоконном световоде при воздействии внешнего магнитного поля подчиняется следующему эмпирическому закону [11]:

$$\theta = VHI, \quad (2)$$

где V – постоянная Верде;

H – напряженность внешнего магнитного поля;

l – длина световодной линии. Для кварцевого стекла, легированного окисью германия, на длине волны $\lambda = 1550$ нм постоянная Верде соответствует значению $V = 3,13 \cdot 10^{-5}$, град/А, а на длине волны $\lambda = 1310$ нм – $V = 2,51 \cdot 10^{-5}$, град/А.

Известно, что модуль абсолютной величины напряженности магнитного поля контактной сети в рассматриваемой области рассчитывается по формуле [12]:

$$H = \sqrt{H_y^2 + H_x^2}, \quad (3)$$

где H_x и H_y – горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля, А/м.

Данные составляющие вблизи контактной сети переменного тока находятся по формулам:

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N I_i \frac{y - y_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}; \\ H_y &= \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N I_i \frac{x - x_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где I_i – величина тока контактной сети, А;

x, y – координаты рассматриваемой точки;

i – соответствующий элемент тяговой сети (контактный провод, несущий трос, рельсы).

Изменение угла поворота большой оси эллипса также влияет на фазовую скорость ортогональных составляющих электромагнитной волны, что приводит к уширению импульсов, распространяющихся по волоконному световоду. Связь между уширением импульсов в результате воздействия внешнего магнитного поля ($\tau_{мп}$) и углом поворота большой оси эллипса поляризованного излучения установлена посредством следующего соотношения [5]:

$$\tau_{мп} = \frac{\theta \cdot \lambda}{2\pi c}, \frac{с}{км}.$$

Задаваясь возможным значением в контактном проводе по формулам (3, 4), можно рассчитать соответствующее значение напряженности магнитного в точке подвеса ВОК, а затем по формуле (2) – угол поворота большой оси эллипса и соответственно уширение импульсов ($\tau_{мп}$), которое возникает в волоконных световодах в результате воздействия внешнего магнитного поля. Результаты вычислений приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Уширение импульсов в оптическом волокне типа NZDSF в зависимости от тока
в контактном проводе**

	Ток в контактном проводе (А)						
	300	400	600	800	1000	1200	1500
$\tau_{мп}$, пс/км	1,13	1,50	2,25	3,00	3,75	4,50	5,63

Таблица 4

**Уширение импульсов в оптическом волокне типа SF в зависимости от тока
в контактном проводе**

	Ток в контактном проводе (А)						
	300	400	600	800	1000	1200	1500
$\tau_{мп}$, пс/км	0,57	0,76	1,13	1,51	1,89	2,27	2,84

Тогда уширение импульсов за счет суммарного действия электрического и магнитного полей определяется:

$$\tau_{эмп} = \sqrt{\tau_{эп}^2 + \tau_{мп}^2}. \quad (5)$$

По формуле (5) выполнены расчеты уширения импульсов в волоконных световодах типа NZDSF и SF за счет суммарного действия электрического и магнитного полей для соответствующих значений тока в контактном проводе, результаты которых приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

**Уширение импульсов в оптическом волокне типа NZDSF
за счет действия электромагнитного поля**

$\tau_{эп}$, пс/км	Уширение импульсов $\tau_{эмп}$ за счет действия электромагнитного поля для соответствующих значений $\tau_{мп}$ (пс/км)						
	1,13	1,50	2,25	3,00	3,75	4,50	5,63
1,44	1,83	2,08	2,67	3,33	4,02	4,73	5,81
1,54	1,91	2,15	2,73	3,37	4,06	4,76	5,84
1,68	2,02	2,25	2,81	3,44	4,11	4,81	5,88
2,08	2,37	2,57	3,07	3,65	4,29	4,96	6,00
2,17	2,44	2,64	3,13	3,70	4,34	5,00	6,03

Таблица 6

**Уширение импульсов в оптическом волокне типа SF
за счет действия электромагнитного поля**

$\tau_{эп}$, пс/км	Уширение импульсов $\tau_{эмп}$ за счет действия электромагнитного поля для соответствующих значений $\tau_{мп}$ (пс/км)						
	0,33	0,44	0,66	0,88	1,10	1,32	1,65
1,40	1,51	1,59	1,80	2,06	2,35	2,67	3,16
1,44	1,55	1,63	1,83	2,09	2,38	2,69	3,18
1,45	1,56	1,64	1,84	2,10	2,38	2,69	3,19
2,56	2,62	2,67	2,80	2,97	3,18	3,42	3,82
3,45	3,50	3,53	3,63	3,77	3,93	4,13	4,47

В одномодовых волоконных световодах со смещенной ненулевой дисперсией (NZDSF) доминирует хроматическая дисперсия. В соответствии с рекомендациями МСЭ-Т для оптического волокна типа G.655 удельный коэффициент хроматической дисперсии ($D(\lambda)$) на длине волны $\lambda = 1550$ нм составляет 1–10 пс/нм·км [11].

Уширение импульсов при этом рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{xp}} = \Delta\lambda \cdot D(\lambda),$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектра источника излучения.

Тогда уширение импульсов за счет действия электромагнитного поля с учетом хроматической дисперсии определится

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_{\text{эмп}}^2 + \tau_{\text{xp}}^2}.$$

Задаваясь значением ширины спектра источника излучения $\Delta\lambda = 1\text{ нм}$, уширение импульсов за счет действия хроматической дисперсии составит следующий диапазон $\tau_{\text{xp}} = 1 - 10\text{ пс/км}$.

Суммарное уширение импульсов за счет влияния электромагнитного поля и хроматической дисперсии целесообразно оценивать с учетом максимального воздействия электрического поля, которое наблюдается при значении начальной эллиптичности $\eta_0 = 0,68$, то есть $\tau_{\text{эп}} = 2,17\text{ пс/км}$.

Результаты расчетов суммарного уширения импульсов в волоконном световоде типа NZDSF с учетом хроматической дисперсии для диапазона $\tau_{\text{xp}} = 1-6\text{ пс/км}$ и воздействия внешнего электромагнитного поля приведены в табл. 7.

Таблица 7

Суммарное уширение импульсов в волоконном световоде типа NZDSF

$\tau_{\text{xp}}, \text{ пс/км}$	Суммарное уширение импульсов τ_{Σ} в зависимости от $\tau_{\text{эмп}}$ (пс/км)						
	2,44	2,64	3,13	3,70	4,34	5,00	6,03
1,0	2,64	2,82	3,28	3,84	4,45	5,10	6,12
2,0	3,16	3,31	3,71	4,21	4,77	5,38	6,36
3,0	3,87	4,00	4,33	4,77	5,27	5,83	6,74
4,0	4,69	4,79	5,08	5,45	5,90	6,40	7,24
5,0	5,57	5,65	5,90	6,22	6,62	7,07	7,84
6,0	6,48	6,55	6,77	7,05	7,40	7,81	8,51

Дисперсия в волоконных световодах ограничивает дальность непосредственной связи и скорость передачи информации.

Длина регенерационного участка с учетом дисперсионных явлений рассчитывается по следующей формуле [12]:

$$l_p = \frac{0,25 \cdot 10^6}{\tau_{\Sigma} \cdot B}, \text{ км},$$

где B – скорость передачи информации, Мбит/с.

Расчет длины регенерационного участка, как правило, производится для наихудших возможных условий. В данном случае такими условиями являются значения суммарного уширения импульсов, которые наблюдаются при $\tau_{\text{эмп}} = 6,03\text{ пс/км}$. Результаты выполненных расчетов длины регенерационного участка для различной скорости передачи информации и волоконного световода типа NZDSF в зависимости от суммарного значения уширения импульсов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Длина регенерационного участка с учетом суммарного уширения импульсов для ВС типа NZDSF

Скорость передачи информации, Мбит/с	Длина регенерационного участка (км) при соответствующим τ_{Σ} (пс/км)					
	6,12	6,36	6,74	7,24	7,84	8,51
155	264	254	239	223	206	190
622	66	63	60	56	51	47
2500	16	16	15	14	13	12
10000	4	4	4	3	3	3

Выводы

Исходя из выполненных экспериментальных и теоретических исследований, можно сделать следующие выводы.

1 Установлено, что в одномодовых оптических волокнах в результате воздействия внешнего электрического поля проявляется электрооптический эффект Керра, а под действием внешнего магнитного поля – магнитооптический эффект Фарадея.

2 Дисперсионные явления в одномодовых волоконных световодах различного типа за счет действия электромагнитного поля проявляются по-разному. Так уширение импульсов за счет действия внешнего электрического поля в волоконных световодах типа SF преобладает над аналогичным параметром в волоконных световодах с ненулевой смещенной дисперсией типа NZDSF, а за счет действия магнитного поля, наоборот, уширение импульсов в волоконных световодах с ненулевой смещенной дисперсией типа NZDSF преобладает над таким же параметром в волоконных световодах типа SF.

3 Исследование поляризационных явлений в одномодовых волоконных световодах со смещенной ненулевой дисперсией типа NZDSF показали, что суммарное уширение импульсов при воздействии внешнего электромагнитного поля становится настолько значительным, что оказывается соизмеримым с уширением импульсов за счет проявления хроматической дисперсии. Поэтому в расчетах длины регенерационного участка и пропускной способности волоконных световодов необходимо учитывать поляризационную модовую дисперсию, обусловленную воздействием внешнего электромагнитного поля.

4 Из анализа данных, приведенных в табл. 8, следует, что использовать оптические волокна типа NZDSF для аппаратуры синхронной цифровой иерархии, работающей на скорости свыше 622 Мбит/с из-за воздействия внешнего электромагнитного поля, является нецелесообразным.

Список литературы

1 **Савин, Е. З.** Воздействие внешних факторов на поляризационные явления в волоконных световодах / Е. З. Савин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2011. – 111 с. – ISBN 978-5-262-00576-5.

2 **Войкусов, Т. С.** Воздействие механических вибраций на поляризационные явления в оптических волокнах / Т. С. Войкусов, Е. З. Савин // Известия РАН. Серия физическая, 2006. – Т. 70, № 9. – С. 1306–1309. – ISSN 03676765.

3 **Мильков, Ю. А.** Влияние электромагнитного поля электрифицированных железных дорог на поляризационные явления в волоконном световоде / Ю. А. Мильков, Е. З. Савин // Инновационные технологии – транспорту и промышленности. Труды 45-й Международной научно-практической конференции, ДВГУПС. – Хабаровск, 2007. – С. 160–164. – ISBN 978-5-907295-29-2.

4 **Мильков, Ю. А.** Температурно-зависимые поляризационные явления в волоконных световодах / Ю. А. Мильков, Е. З. Савин // Информационные технологии в науке и образовании : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2024. – С. 125–129. – ISBN 978-5-262-00965-7.

5 **Савин, Е. З.** Воздействие поля сверхвысоких частот на поляризационные явления в оптических волокнах / Е. З. Савин // Цифровые инфокоммуникационные технологии :

References

1 **Savin, E. Z.** Effect of external factors on polarization phenomena in optical fibers / E. Z. Savin. – Khabarovsk : DVGUPS Publishing House, 2011. – 111 p. – ISBN 978-5-262-00576-5.

2 **Voikusov, T. S.** Effect of mechanical vibrations on polarization phenomena in optical fibers / T. S. Voikusov, E. Z. Savin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical Series, 2006. – Vol. 70, No. 9. – P. 1306–1309. – ISSN 03676765.

3 **Milkov, Yu. A.** Influence of the electromagnetic field of electrified railways on polarization phenomena in a fiber optic light guide / Yu. A. Milkov, E. Z. Savin // Innovative technologies for transport and industry. Proceedings of the 45th International scientific and practical conference, DVGUPS. – Khabarovsk, 2007. – P. 160–164. – ISBN 978-5-907295-29-2.

4 **Milkov, Yu. A.** Temperature-dependent polarization phenomena in fiber optic light guides / Yu. A. Milkov, E. Z. Savin // Information technologies in science and education : materials of the All-Russian scientific and practical conference. – Khabarovsk : DVGUPS Publishing house, 2024. – P. 125–129. – ISBN 978-5-262-00965-7.

5 **Savin, E. Z.** The impact of the microwave field on polarization phenomena in optical fibers / E. Z. Savin // Digital infocommunication technologies : collection of scientific papers / FSBEI HE

сборник научных трудов / ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС. – 2023. – С. 85–89. – ISBN 978-5-907295-29-2.

6 **Гроднев, И. И.** Волоконно-оптические линии связи / И. И. Гроднев. – Москва : Радио и связь, 1990. – 224 с. – ISBN 5-256-00395-X.

7 **Мильков, Ю. А.** Воздействие электрического поля на волоконно-оптический кабель, подвешенный на опорах контактной сети электрифицированной железной дороги / Ю. А. Мильков, Е. З. Савин // Транспорт АТР. – 2017. № 1 (10). – С. 17–19. – ISSN 2415-8658.

8 **Савельев, И. В.** Курс общей физики / И. В. Савельев // Волны. Оптика. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 256 с. – ISBN 978-5-8114-1210-5.

9 **Савин, Е. З.** Совместное воздействие внешних факторов на подвесной волоконно-оптический кабель / Е. З. Савин, А. Н. Шевцов // Транспорт АТР. – 2023. – № 4 (37). – С. 94–100. – ISSN 2415-8658.

10 **Савин, Е. З.** Физические явления в волоконных световодах / Е. З. Савин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2005. – 139 с. – ISBN 5-262-00239-0.

11 **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики / Д. В. Сивухин // Оптика. – Москва : Изд-во МФТИ, 2002. – 792 с. – ISBN 5-9221-0228-1.

12 **Сидоров, А. И.** Исследование энергетической нагрузки ЭМП вблизи контактной сети / А. И. Сидоров, А. Р. Закирова, А. Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 80–87. – ISSN 1990-8512 (Print). – ISSN 2409-1057 (Online).

13 Рекомендация МСЭ-T G.655 (03/2006). Характеристики одномодового волоконно-оптического волокна и кабеля с ненулевым дисперсионным смещением, UID 11.1002/1000/10390.

14 **Савин, Е. З.** Волоконно-оптические кабели и пассивные компоненты ВОЛП / Е. З. Савин. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2012. – 223 с. – ISBN 978-5-9994-0093-2.

RSTU. – Rostov-on-Don : RSTU. – 2023. – P. 85–89. – ISBN 978-5-907295-29-2.

6 **Grodnev, I. I.** Fiber-optic communication lines / I. I. Grodnev. – Moscow : Radio i svyaz, 1990. – 224 p. – ISBN 5-256-00395-X.

7 **Milkov, Yu. A.** Effect of an electric field on a fiber-optic cable suspended on supports of the contact network of an electrified railway / Yu. A. Milkov, E. Z. Savin // Pacific Rim countries transportation system. – 2017. No. 1 (10). – P. 17–19. – ISSN 2415-8658.

8 **Savelyev, I. V.** General physics course / I. V. Savelyev // Waves. Optics. – Saint Petersburg : Lan, 2021. – 256 p. – ISBN 978-5-8114-1210-5.

9 **Savin, E. Z.** Combined impact of external factors on suspended fiber-optic cable / E. Z. Savin, A. N. Shevtsov // Pacific Rim countries transportation system. – 2023. – No. 4 (37). – P. 94–100. – ISSN 2415-8658.

10 **Savin, E. Z.** Physical phenomena in fiber optics / E. Z. Savin. – Khabarovsk: Publishing house DVGUPS, 2005. – 139 p. – ISBN 5-262-00239-0.

11 **Sivukhin, D. V.** General course of physics / D. V. Sivukhin // Optics. – Moscow : Publishing house of Moscow Institute of Physics and Technology, 2002. – 792 p. – ISBN 5-9221-0228-1.

12 **Sidorov, A. I.** Study of the energy load of EMF near the contact network / A. I. Sidorov, A. R. Zakirova, A. N. Gorozhankin // Bulletin of South Ural State University. Series “Power Engineering”. – 2024. – Vol. 24, No. 1. – P. 80–87. – ISSN 1990-8512 (Print). – ISSN 2409-1057 (Online).

13 Recommendation ITU-T G.655 (03/2006). Characteristics of single-mode optical fiber and cable with non-zero dispersion shift, UID 11.1002/1000/10390.

14 **Savin, E. Z.** Fiber-optic cables and passive components of fiber-optic transmission lines / E. Z. Savin. – Moscow : UMC ZDT, 2012. – 223 p. – ISBN 978-5-9994-0093-2.

E. Z. Savin

IMPACT OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF SINGLE-PHASE ALTERNATING CURRENT ELECTRIFIED RAILWAYS ON POLARIZATION PHENOMENA IN FIBER OPTIC LIGHT GUIDES

Abstract. It is shown that under the action of an external electric field in a single-mode fiber optic light guide the Kerr effect appears, and under the influence of a magnetic field – the Faraday effect. In this case there is a change in the ellipticity of polarized radiation and rotation of the large axis of the ellipse. The change in the specified parameters of polarized

radiation leads to an increase in polarization mode dispersion. An estimate of the total pulse broadening due to the effect of the electromagnetic field is made. The paper states that such pulse broadening together with pulse broadening due to chromatic dispersion causes a significant limitation of the length of the regeneration section and a decrease in the throughput of fiber optic light guides.

Keywords: electromagnetic field, fiber optic light guide, Kerr effect, Faraday effect, the length of regeneration section, information transmission rate.

For citation: Savin, E. Z. Impact of the electromagnetic field of single-phase alternating current electrified railways on polarization phenomena in fiber optic light guides / E. Z. Savin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 19–27. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_2_19.

Сведения об авторах

Савин Евгений Зиновьевич

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Автоматика, телемеханика и связь»,
кандидат технических наук, профессор,
e-mail: ev.savin.49@mail.ru

Information about the authors

Savin Evgeniy Zinovievich

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair “Automation, Telemechanics and
Communications”,
Candidate of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ev.savin.49@mail.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 004.8

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_28

*А. Е. Колоденкова***АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ
И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
НА ТЕРРИТОРИЮ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Аннотация. В настоящее время одной из задач антитеррористической защищенности является исключение бесконтрольного проезда транспортных средств на территорию образовательной организации. Для решения данной задачи предложена программная система автоматизации контроля и управления доступом транспортных средств с учетом особенностей объектов образовательных учреждений на основе распознавания автомобильных номеров. Рассмотрены обобщенная схема контроля и управления доступом транспорта, архитектура программной системы с подробным описанием модулей, а также ее ограничения и преимущества перед другими системами аналогичного назначения. Представлены фрагменты экранных форм разработанной программной системы. Программная система позволяет вычислять нарушителей пропускного режима, следить за наличием транспортных средств на территории образовательной организации, а также исключить человеческий фактор работы сторожа-вахтера. Данная система может быть рекомендована начальникам безопасности, охраны для обеспечения безопасности на территории образовательной организации. При этом она может входить в общую систему контроля и управления доступом или действовать независимо.

Ключевые слова: программная система, контроль и управление доступом транспортных средств, распознавание номеров, образовательная организация.

Для цитирования: Колоденкова, А. Е. Автоматизация процесса контроля и управления доступом транспортных средств на территорию образовательной организации / А. Е. Колоденкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 28–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_28.

Введение

В настоящее время управление доступом транспортных средств имеет существенное значение для обеспечения антитеррористической безопасности на территории образовательной организации [1]. Однако, несмотря на современные технологии, процесс контроля и управления доступом транспортных средств на территорию образовательной организации является серьезной проблемой, для решения которой применяются различные мероприятия (установка датчиков обнаружения движения, выбор разрешения и настройка видеокамер, правильное расположение оборудования и др.), и осложнен рядом причин. Это обусловлено особенностями территории образовательной организации: большое количество корпусов и зданий, наличие одного проезда без разделения на въезд и выезд, заезд и выезд несколько раз одного и того же транспортного средства за день, а также отсутствие значительной территории. Это, в свою очередь, приводит к увеличению времени принятия решения о допуске каждого конкретного транспортного средства на территорию и усилий, затраченных начальником безопасности для управления его доступом.

Усовершенствовать процесс допуска транспортных средств можно за счет применения систем интеллектуальной видеоаналитики. Этим и обусловлена необходимость разработки программной системы контроля и управления доступом транспортных средств с учетом особенностей объектов образовательных учреждений на основе распознавания автомобильных номеров. В результате применения данной системы начальник безопасности сможет в комплексе решать задачи (учет количества въездов и времени пребывания на контролируемой территории транспортных средств сотрудников и посетителей, сбор статистики и формирование отчетов и др.), тем самым исключая человеческий фактор и обеспечивая антитеррористическую безопасность на территории образовательной организации.

1 Обзор и анализ существующих систем контроля и управления доступом автотранспорта

В настоящее время существует достаточно большое количество систем для контроля и управления доступом автотранспорта на контролируемую территорию.

Например, цифровая российская система безопасности *VideoNet-AUTO PSIM* [2], объединяющая оборудование систем видеонаблюдения, СКУД, охраны периметра, *SCADA*-систем в единый комплекс. Осуществляет контроль и ограничение доступа автотранспорта на территорию, автоматизирует въезд на территорию, собирает данные о транспортных средствах и формирует отчеты с разными настройками о нахождении автомобилей на территории и времени их стоянки.

Система автоматического учета и контроля проезда транспорта через контрольно-пропускной пункт предприятия *UniServer AUTO: AutoControl* [3]. Осуществляет удаленное подключение клиентов, предоставляет возможность экспорта/импорта данных, выполняет автоматическое управление шлагбаумом, дает разрешение проезда на основании пропусков, осуществляет ведение журналов проездов в различных видах БД (*SQL Lite, MySQL, Firebird*), создает отчеты на основе *FastReport*.

Автомаршал – программное обеспечение для видеоконтроля и учета автотранспорта в потоке и в пунктах контроля [4]. Позволяет создавать списки доступа, следить за статистикой и формировать отчетность, высчитывать время нахождения автомобилей на территории, а также управлять открытием/закрытием шлагбаумов.

КОДОС-Транспорт [5] – автоматизированная система управления контрольно-транспортным пунктом, предназначенная для организации контроля проезда автотранспортного средства и сбора данных об автомобиле. Осуществляет считывание и распознавание номеров транспортных средств, контроль доступа транспортных средств на объект в соответствии со сведениями, записанными в базе данных, создает списки номерных знаков транспортных средств, для которых доступ разрешен или запрещен и др.

Система автоматического распознавания номерных знаков от *Eocortex* [6] – система мониторинга проезда транспортных средств, контроля доступа и регистрации на основе технологии распознавания номерных знаков. Организует автоматический допуск разрешенных транспортных средств, предотвращает въезд посторонних транспортных средств, а также контролирует время нахождения транспортных средств на территории.

Система автоматического распознавания номерных знаков от *GABKOTECH* [7] – система, оснащенная функцией ночного видения и адаптивной технологией камер. Идентифицирует транспортные средства по номерным знакам, мгновенно предоставляя или отказывая в доступе. Осуществляет сбор подробных данных и составление отчетов, предоставляя руководителям объектов подробные журналы регистрации въездов и выездов транспортных средств.

Однако данные системы не лишены недостатков. Во-первых, системы дорогие в обслуживании и сложные в настройке, во-вторых, для установления подобных систем нужны мощные серверы, в-третьих, системы работают при условии двух и более проездов, в-четвертых, для работы систем требуются камеры с хорошей светочувствительностью и разрешимостью, что может привести к повышению нагрузки на сервер без существенного улучшения распознавания. Рассмотренные выше недостатки препятствуют широкому использованию данных систем на практике.

2 Обобщенная схема и архитектура программной системы контроля и управления доступом автотранспорта

Обобщенная схема контроля и управления доступом транспортного средства на территорию образовательной организации представлена на рис. 1.

Отметим, что, когда транспортное средство подъезжает к шлагбауму, программная система считывает номер с пластины и проверяет его на наличие в базе данных (БД). На основе результата сравнения распознанного номера и далее при выполнении настроенных сценариев доступа программная система принимает решение об открытии проезда.

Если номер транспортного средства существует в БД, ему разрешен въезд в данный корпус с учетом соответствия текущего времени с режимом проезда, то происходит сохранение снимка номера транспорта в БД. Далее подается сигнал контроллеру шлагбаума, и он автоматически открывается. После чего запускается таймер, благодаря которому исключается повторное распознавание номера. Заметим, что шлагбаум не открывается, если транспортное средство подъехало в неразрешенное для въезда время либо номер не считывается.

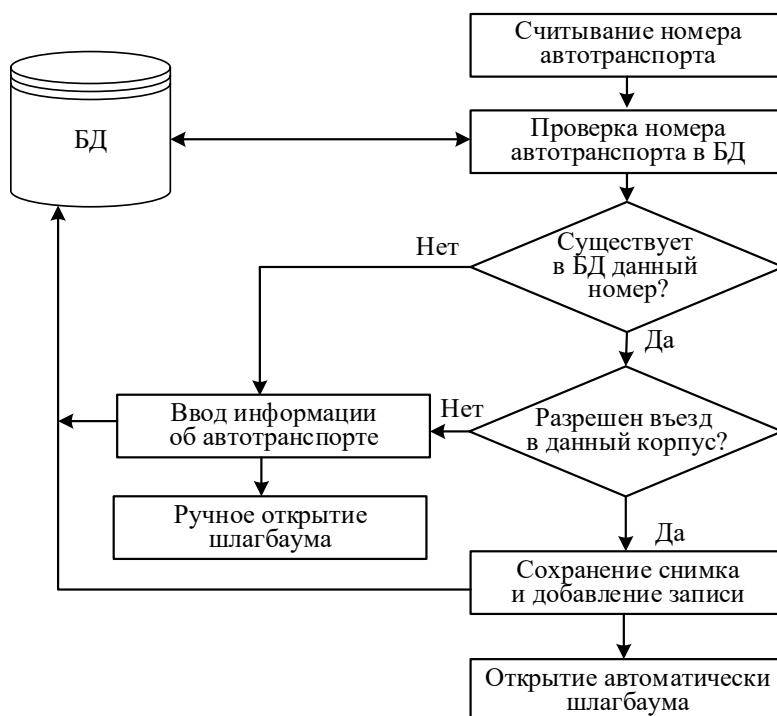


Рис. 1. Обобщенная схема контроля и управления доступом автотранспорта

Если номер транспортного средства отсутствует в БД (например, доставка воды), то существует возможность открытия шлагбаума в ручном режиме сторожем-вахтером с разрешения начальника безопасности. Если транспортное средство превысило время нахождения на территории образовательного учреждения, то шлагбаум на выезд не открывается.

Архитектура программной системы контроля и управления доступом транспортного средства на территорию образовательной организации состоит из модулей (рис. 2).

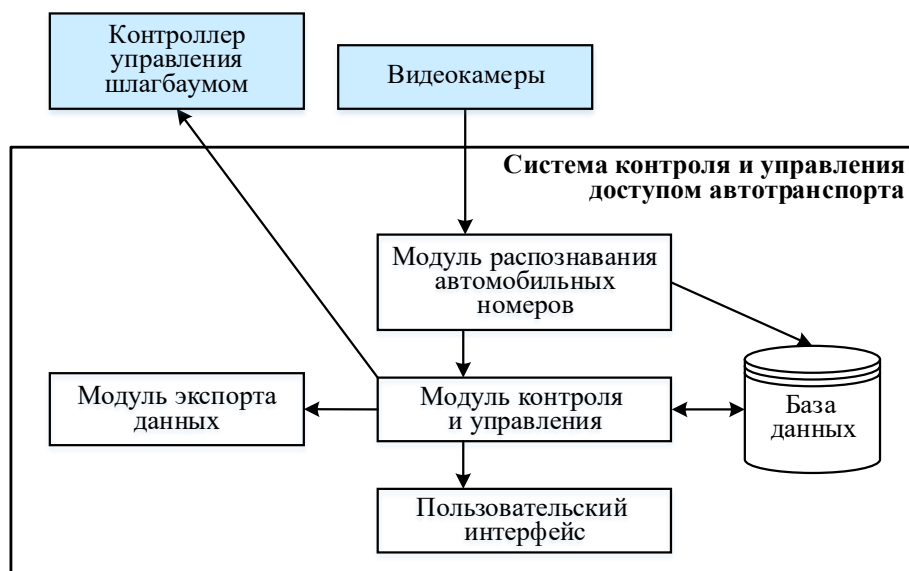


Рис. 2. Архитектура разработанной программной системы

На рис. 2 выделены следующие модули [8]:

1) *База данных* – нужна для хранения, управления и защиты необходимой информации: дата/время проезда транспортного средства, время пребывания его на территории, его изображение и номер, комментарии и др. БД обеспечивает целостность, безопасность и эффективное выполнение операций с данными, а также интеграцию с другими системами организации.

На рис. 3 представлена экранная форма БД записей, где красным цветом выделен транспорт, которому въезд на территорию образовательной организации запрещен.

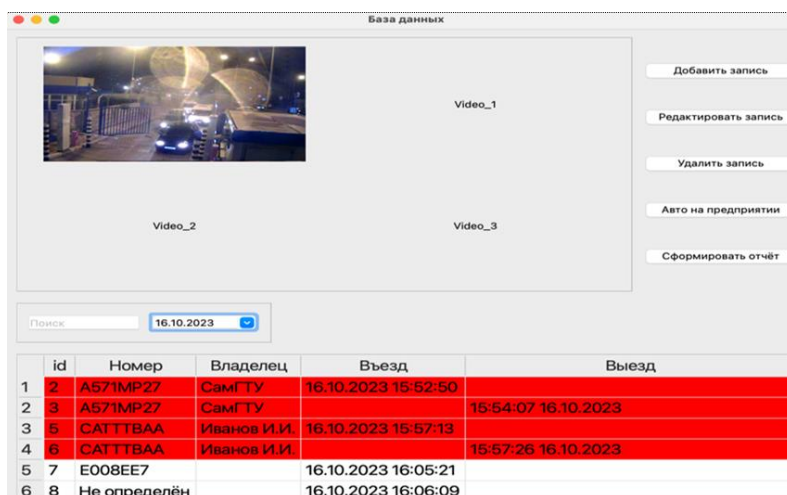


Рис. 3. Экранная форма БД записей

2) *Модуль распознавания автомобильных номеров* – отвечает за автоматическое распознавание государственных регистрационных номеров транспортного средства за счет видео, поступающего с видеокамер, и сохраняет информацию обо всех автомобилях, которые въехали на территорию, в БД. Данный модуль позволяет обеспечить точный учет передвижения транспортных средств без необходимости ручного вмешательства. Программная система распознает только российские номера, при этом они должны быть чистыми, т.е. без грязи, снега и др.

3) *Модуль контроля и управления* – отвечает за настройку прав доступа для различных категорий сотрудников образовательной организации, посетителей и транспортных средств, а также за мониторинг и учет их передвижений на территории. Данный модуль позволяет создавать гибкие правила доступа и адаптировать их к изменяющимся условиям.

4) *Модуль экспорта данных* – отвечает за их преобразование в формат *Excel* (*.xlsx), который является удобным для пользователя (рис. 4).

A1										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	id	Номер	Владелец	Категория	Въезд	Выезд	Телефон	Примечание	Начало запрета	Окончание запрета
2	2	A571MP27	СамГТУ	Запрещено	16.10.2023 15:52:50		+3918740918		00:00:00 01.01.2023	00:00:00 01.01.2023
3	3	A571MP27	СамГТУ	Запрещено		15:54:07 16.10.2023	+3918740918		00:00:00 01.01.2023	00:00:00 01.01.2023
4	5	САТТВБАА	Иванов И.И.	Запрещено	16.10.2023 15:57:13		+93241142134	Машина продана	00:00:00 01.01.2023	00:00:00 01.01.2023
5	6	САТТВБАА	Иванов И.И.	Запрещено		15:57:26 16.10.2023	+93241142134	Машина продана	00:00:00 01.01.2023	00:00:00 01.01.2023
6	7	E008EE7		Разрешено	16.10.2023 16:05:21				00:00:00 01.01.2023	00:00:00 01.01.2023
7	8	Не определен		Разрешено	16.10.2023 16:05:21			2023-10-23 08:54:52.938061	00:00:00 01.01.2023	00:00:00 01.01.2023

Рис. 4. Экранная форма экспорта данных в формат Excel

5) *Пользовательский интерфейс* – обеспечивает удобный доступ к главным окнам (просмотр записей проезда транспортного средства, добавление информации о транспорте и др.) программной системы. На рис. 5 представлена экранная форма добавления информации о транспортном средстве.

Рис. 5. Экранная форма добавления транспортного средства в БД

6) *Видеокамеры* – помогают в реальном времени отслеживать ситуацию, идентифицировать транспортные средства по номерам, предотвращать правонарушения, тем самым повысить безопасность территории. Поскольку корпуса образовательных организаций имеют только один въезд/выезд, то для контроля за направлением движения транспорта и корректного распознавания номерной пластины было принято решение использовать две камеры видеонаблюдения.

При выборе камеры для распознавания номеров необходимо знать расстояние до проезжающего транспортного средства, высоту установки, углы обзора, условия освещения и т.п. Невозможно рекомендовать конкретную модель камеры, не зная этих обстоятельств. При этом необходимо учитывать детализацию номера (плотность пикселей), а также контрастность изображения. Рекомендуется выбирать камеры с разрешением не меньше 1920×1080 .

7) *Контроллер управления шлагбаумом* – необходим для дистанционного управления открытием и закрытием шлагбаума, а также для обеспечения доступа только разрешенным сотрудникам и посетителям. Он позволяет повысить уровень безопасности, так как нарушители не имеют физического доступа к контроллеру.

Для пользовательского интерфейса был выбран фреймворк *PyQt* [8–10], который позволяет создавать различный графический интерфейс и использовать программную систему на разных операционных системах, таких как *Windows*, *Linux*, *macOS*, без необходимости изменения исходного кода.

В качестве СУБД был выбран *MySQL* [11, 12]. Данная реляционная БД позволяет хранить данные в виде таблиц, что позволяет использовать *ORM Peewee*, который представляет данные таблицы в виде объектов и позволяет взаимодействовать с ними без написания запросов к БД, что увеличивает производительность программы и делает работу с БД незаметной для пользователя.

В основе модуля распознавания номеров транспортных средств лежит рекуррентная нейронная сеть библиотеки *pytesseract* и алгоритм машинного обучения – Каскад Хаара. Модуль *Pytesseract* имеет открытый исходный код, что позволяет свободно использовать и модифицировать его в соответствии с потребностями проекта, а также известен своей высокой точностью при извлечении текста, особенно из печатных документов.

Для обработки изображения номера используется библиотека *cv2* языка программирования *Python*. Данная библиотека преобразует изображение в *NumPy*-массив, после чего с ним можно взаимодействовать и изменять так, как нам это необходимо.

Таким образом, разработанная программная система имеет ряд принципиальных преимуществ перед конкурентными системами: учитывает один проезд для въезда/выезда с территории, а также возможность въезда/выезда одного и того же транспортного средства несколько раз за день; не требует установки дополнительного оборудования и особых знаний для настройки программной системы; осуществляет экспорт информации о въезжающем и выезжающем транспорте с территории образовательной организации в формате *xls*, *csv*.

Разработанная программная система контроля и управления доступом транспортных средств на основе распознавания автомобильных номеров была успешно апробирована в ФГБОУ ВО «СамГТУ» при обеспечении антитеррористической защищенности университета. Данная система может быть рекомендована начальникам службы безопасности, начальникам охраны для обеспечения безопасности на территории объектов образовательных организаций.

Заключение

В настоящей работе для повышения антитеррористической безопасности на территории образовательной организации предлагается программная система контроля и управления доступом транспортных средств на основе распознавания автомобильных номеров. Данная система написана на языке программирования *Python*. Важнейшей особенностью разработанной системы является то, что в ней содержится автономная БД, содержащая в комплексе все сведения о транспорте и его проездах на территорию образовательной организации, а также об ограничении въезда транспортного средства на территорию запрещенного для него корпуса. Разработанная система позволяет автоматизировать процесс въезда/выезда, исключает человеческий фактор, повышает эффективность обеспечения антитеррористической безопасности на территории образовательной организации.

Список литературы

1 ГОСТ Р 58485–2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Обеспечение безопасности образовательных организаций. Оказание

References

1 GOST R 58485–2019. National Standard of the Russian Federation. Ensuring security of the edu-

охранных услуг на объектах дошкольных, общеобразовательных и профессиональных образовательных организаций. Общие требования : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 августа 2019 г. № 492-ст : введен впервые. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 16 с.

2 Система безопасности VideoNet // VideoNet : [сайт]. – 2025. – URL: <https://www.videonet.ru/> (дата обращения: 07.04.2025).

3 Система автоматического учета и контроля проезда транспорта через контрольно-пропускной пункт предприятия UniServer AUTO: AutoControl // VesySoft : [сайт]. – URL: <https://uniserver-auto.com/autocontrol/> (дата обращения: 07.04.2025).

4 Система распознавания автомобильных номеров Автомаршал // Mallenom Systems : [сайт]. – 2025. – URL: <https://www.mallenom.ru/products/videokontrol-i-uchet-avtotransporta/avtomarshal/> (дата обращения: 07.04.2025).

5 КОДОС-транспорт // Программное обеспечение : [сайт]. – 2025. – URL: <https://kodos.ru/product/kodos-transport/?ysclid=m95pxlzxfa319497389> (дата обращения: 07.04.2025).

6 License plate recognition (acms) : elevate security & parking efficiency // Eocortex : [сайт]. – 2025. – URL: <https://cctv.eocortex.com/page2084474.html> (дата обращения: 07.04.2025).

7 Automatic number plate recognition // GAB-KOTECH. Products : [сайт]. – 2025. – URL: <https://gabkotech.com/license-plate-recognition-acms/#> (дата обращения: 07.04.2025).

8 **Колоденкова, А. Е.** Структура программной системы контроля и управления доступом автотранспорта в образовательных организациях / А. Е. Колоденкова, С. В. Бесков // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии-2024». – Таганрог : Издательство Ступина С.А., 2024. – Т. 2. – С. 112–117.

9 **Goyal, V.** Local database connectivity and UI design for the smart automated cooker / V. Goyal, K. Sharma, S. R. N. Reddy // In International Conference on Artificial Intelligence of Things. – 2023. – P. 189–200.

10 **Kirsan, A. S.** EksPy : a new Python framework for developing graphical user interface based PyQt5 / A. S. Kirsan, K. Takano, S. Z. Mansurina // Int J Electr Comput Eng (IJECE). – 2024. – No. 14 (1). – P. 520–531.

cational organizations. Provision of security services at the facilities of pre-school, general education and professional educational organizations. General requirements : official edition : approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated August 9, 2019 No. 492-st : introduced for the first time. – Moscow : Standardinform, 2019. – 16 p.

2 VideoNet security system // VideoNet : [website]. – 2025. – URL: <https://www.videonet.ru/> (date of access: 07.04.2025).

3 UniServer AUTO: AutoControl automatic registration and control system for transport passage through an enterprise checkpoint // VesySoft : [website]. – URL: <https://uniserver-auto.com/autocontrol/> (date of access: 07.04.2025).

4 Automarshal Licence plate recognition system // Mallenom Systems : [website]. – 2025. – URL: <https://www.mallenom.ru/products/videokontrol-i-uchet-avtotransporta/avtomarshal/> (date of access: 07.04.2025).

5 KODOS-transport // Software : [website]. – 2025. – URL: <https://kodos.ru/product/kodos-transport/?ysclid=m95pxlzxfa319497389> (date of access: 07.04.2025)

6 License plate recognition (acms) : elevate security & parking efficiency // Eocortex : [website]. – 2025. – URL: <https://cctv.eocortex.com/page2084474.html> (date of access: 07.04.2025).

7 Automatic number plate recognition // GAB-KOTECH. Products : [website]. – 2025. – <https://gabkotech.com/license-plate-recognition-acms/#> (date of access: 07.04.2025).

8 **Kolodenkova, A. E.** The structure of the software system for monitoring and controlling access to vehicles in educational organizations / A. E. Kolodenkova, S. V. Beskov // Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent Systems and Information Technologies-2024." – Taganrog : Stupin S.A. Publishing House, 2024. – Vol. 2. – P. 112–117.

9 **Goyal, V.** Local database connectivity and UI design for the smart automated cooker / V. Goyal, K. Sharma, S. R. N. Reddy / In International Conference on Artificial Intelligence of Things. – 2023. – P. 189–200.

10 **Kirsan, A. S.** EksPy : a new Python framework for developing graphical user interface based PyQt5 / A. S. Kirsan, K. Takano, S. Z. Mansurina // Int J Electr Comput Eng (IJECE). – 2024. – No. 14 (1). – P. 520–531.

11 DataJoint: managing big scientific data using MATLAB or Python / D. Yatsenko, J. Reimer, A. S. Ecker [et al.] // BioRxiv. – 2015. – P. 1–10.

12 **Šušter, I.** Optimization of MySQL database / I. Šušter, T. Ranisavljević // Journal of process management and new technologies. – 2023. – No. 11 (1–2). – P. 141–151.

11 DataJoint: managing big scientific data using MATLAB or Python / D. Yatsenko, J. Reimer, A. S. Ecker [et al.] // BioRxiv. – 2015. – P. 1–10.

12 **Šušter, I.** Optimization of MySQL database / I. Šušter, T. Ranisavljević // Journal of process management and new technologies. – 2023. – No. 11 (1–2). – P. 141–151.

A. E. Kolodenkova

AUTOMATION OF THE PROCESS OF CONTROL AND MANAGEMENT OF VEHICLE ACCESS TO THE TERRITORY OF AN EDUCATIONAL ORGANIZATION

Abstract. Currently, one of the tasks of anti-terrorist security is to eliminate the uncontrolled passage of vehicles to the territory of the educational organization. To solve this problem, a software system for automating the control and management of vehicle access is proposed, taking into account the specifics of educational institutions based on the recognition of vehicle licence plates. The article considers a generalized scheme for transport access control and management, the architecture of the software system with a detailed description of the modules, as well as its limitations and advantages over other systems of a similar purpose. The fragments of screen forms of the developed software system are presented. The software system allows to calculate the violators of the access regime, to monitor the presence of vehicles on the territory of the educational organization, and eliminate the human factor in the work of a security guards. This system can be recommended for security chiefs, security guards to ensure security on the territory of the educational organization. At the same time, it can be included in the general access control and management system or act independently.

Keywords: software system, vehicle access control and management, number plate recognition, educational organization.

For citation: Kolodenkova, A. E. Automation of the process of control and management of vehicle access to the territory of an educational organization / A. E. Kolodenkova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya – 2025. – No. 2. – P. 28–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_28.

Сведения об авторах

Колоденкова Анна Евгеньевна

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева (Самарский университет),
кафедра «Информационные системы и технологии»,
доктор технических наук, доцент,
профессор,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Information about the authors

Kolodenkova Anna Evgenievna

Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University),
Chair “Information Systems and Technologies”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associated Professor, Professor,
e-mail: anna82_42@mail.ru

А. В. Сацюк

**ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ *YOLOv8*
ДЛЯ ЗАДАЧ ЗАХВАТА ОБЪЕКТА БПЛА:
АНАЛИЗ КОМПРОМИССА МЕЖДУ ТОЧНОСТЬЮ,
СКОРОСТЬЮ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ**

Аннотация. В работе представлен комплексный подход к оптимизации модели *YOLOv8n* для задач обнаружения объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Основное внимание уделено методам квантования (INT8/INT4) и прунинга (50/75%), направленным на снижение вычислительной сложности модели при сохранении приемлемой точности. В результате оптимизации разработана модель *YOLOv8n-Optimized-Drone*, демонстрирующая 4-кратный прирост скорости обработки на платформе *Raspberry Pi 5* по сравнению с базовой версией. Размер модели сокращен в 3.8 раза, что критически важно для встраиваемых систем БПЛА.

Для обучения и валидации модели создан специализированный датасет с разметкой *bounding box*, учитывающий условия съемки с БПЛА. Натурные испытания подтвердили эффективность предложенного метода, обеспечивающего баланс между производительностью, энергопотреблением и точностью. Дополнительно исследовано влияние различных уровней квантования и прунинга на итоговые метрики, что позволило определить оптимальную конфигурацию для развертывания на маломощных устройствах. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшей адаптации модели к динамическим условиям полета и интеграции с мультисенсорными системами БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, квантование, прунинг, оптимизация нейросетевой модели, нейронная сеть, *YOLO*, метрики *YOLO*.

Для цитирования: Сацюк, А. В. Оптимизация архитектуры *YOLOv8* для задач захвата объекта БПЛА: анализ компромисса между точностью, скоростью и вычислительными ресурсами / А. В. Сацюк // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 35–42. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_35.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все чаще используются в решении широкого спектра задач, включая наблюдение, доставку, поиск и спасение, а также мониторинг окружающей среды. Ключевым элементом эффективной работы БПЛА является возможность автономного захвата и сопровождения объектов в режиме реального времени. Для реализации этой функциональности необходимы высокопроизводительные и энергоэффективные системы компьютерного зрения.

Одним из наиболее перспективных подходов к решению данной задачи является использование алгоритмов глубокого обучения, в частности, моделей класса *YOLO* (*You Only Look Once*). *YOLOv8*, как одна из последних итераций этой архитектуры, демонстрирует высокие результаты в задачах обнаружения объектов, обеспечивая высокую точность и скорость обработки изображений. Однако, интеграция *YOLOv8* на борту БПЛА представляет собой сложную задачу из-за ограничений по вычислительным ресурсам и энергопотреблению.

БПЛА, оснащенные микрокомпьютерами и маломощными камерами типа *MIPI*, обладают ограниченной вычислительной мощностью и объемом памяти. В таких условиях прямое применение стандартных версий *YOLOv8* может привести к неприемлемо низкой частоте кадров, недостаточной для обеспечения надежного захвата и сопровождения объекта в динамичных условиях полета.

Таким образом, возникает необходимость в оптимизации архитектуры *YOLOv8* для эффективной работы на борту БПЛА с ограниченными ресурсами.

Анализ научных публикаций показывает, что современные исследования в области обнаружения объектов с помощью БПЛА активно сосредоточены на оптимизации алгоритмов *YOLO* [1–4] для обеспечения высокой производительности, снижения энергопотребления и адаптации к ограниченным вычислительным ресурсам встраиваемых платформ. Большое внимание уделяется следующим направлениям: модификация архитектуры *YOLO*, включая создание облегченных версий и оптимизацию су-

ществующих архитектур для снижения вычислительных затрат при сохранении точности; использование трансферного обучения с применением предобученных моделей *YOLO* для ускорения обучения и повышения обобщающей способности, особенно при работе с ограниченными наборами данных, характерными для задач обнаружения объектов на БПЛА. Актуальным остается вопрос оптимизации для конкретных платформ, включая адаптацию алгоритмов *YOLO* к архитектуре процессоров, используемых в БПЛА, и к специализированным аппаратным ускорителям. Важным направлением является повышение устойчивости моделей к изменяющимся условиям освещения и погодным явлениям [5]. В ряде исследований [6–9] проводится сравнительный анализ различных алгоритмов обнаружения объектов (включая *YOLO*) на реальных БПЛА с оценкой скорости обработки, точности и энергопотребления, что подчеркивает практическую значимость данной тематики. В рассмотренных работах также все больше внимания уделяется вопросам оптимизации модели с учетом энергопотребления, что особенно актуально для БПЛА с ограниченным временем полета. Вместе с тем комплексная оптимизация, сочетающая квантование, прунинг и адаптацию к конкретным условиям эксплуатации БПЛА (включая учет динамического изменения вычислительной нагрузки и агрессивную аугментацию данных для повышения устойчивости), оставалась недостаточно изученной. В представленной работе предложен подход, направленный на восполнение этого пробела, и продемонстрирована его эффективность в реальных условиях эксплуатации БПЛА.

Целью данной работы является исследование компромисса между точностью обнаружения, скоростью обработки и потреблением вычислительных ресурсов при адаптации *YOLOv8* для задачи захвата объекта БПЛА. Результаты данного исследования позволят определить оптимальную архитектуру *YOLOv8* для автономного захвата и сопровождения объектов с использованием БПЛА, обеспечивая баланс между точностью, скоростью и энергоэффективностью.

Основная часть

В рамках данного исследования проведена оценка эффективности различных методов оптимизации архитектуры *YOLOv8* для задач захвата объекта беспилотным летательным аппаратом. Исследование включало в себя несколько этапов: формирование специализированного датасета, обучение базовой модели нейронной сети, реализация методов оптимизации, оценка производительности оптимизированных моделей.

Для обучения и последующей оценки производительности модели разработан специализированный датасет. Он состоит из 160 изображений целевого объекта, полученных с камеры БПЛА в различных условиях освещения и с разных углов обзора. Важным ограничением является наличие в кадре только одного экземпляра целевого объекта, что соответствует сценарию захвата и сопровождения единственной цели [10, 11]. Датасет разделен на обучающую (80 %) и валидационную (20 %) выборки. Разметка изображений выполнена посредством ограничивающих прямоугольников (*bounding boxes*), определяющих положение и размеры целевого объекта в кадре.

В качестве контрольной точки обучена базовая модель *YOLOv8n* с применением стандартных гиперпараметров, рекомендованных разработчиками: размер выходного изображения 640×640, размера батча 8, скорость обучения динамическая и установлена в пределах 0.00001–0.1. Процесс обучения осуществлялся на вычислительном кластере с использованием графических процессоров *NVIDIA GeForce GTX 1650*. Мониторинг обучения производился с использованием стандартных метрик *box_loss*, *cls_loss*, *dfl_loss*, *Precision*, *Recall*, *mAP50* и *mAP50-95*.

box_loss – функция потерь, оценивающая точность предсказанных ограничивающих прямоугольников вокруг объектов.

cls_loss – функция потерь, оценивающая точность классификации объектов на общем фоне.

dfl_loss – функция потерь, используемая в *YOLOv8* для улучшения предсказания *bounding box*. Данная функция фокусируется на обучении модели более точно предсказывать распределение вероятностей положения границ объекта, особенно в сложных случаях (например, при перекрытии объектов или при плохом освещении).

P (*Precision* с англ. точность) – функция, показывающая долю правильно обнаруженных объектов среди всех объектов, предсказанных моделью как целевые. Функция характеризует точность модели.

R (*Recall* с англ. полнота) – функция, показывающая долю правильно обнаруженных объектов среди всех фактических целевых объектов в датасете.

mAP50 (*Mean Average Precision at IoU=0.5*) – среднее значение точности для всех классов, вычисленное при пороге равном 0.5.

mAP50-95 (Mean Average Precision at IoU from 0.5 to 0.95) – среднее значение AP, вычисленное для различных порогов IoU, от 0.5 до 0.95 с шагом 0.05.

Анализ данных (рис. 1) показал, что после 60 эпох наблюдается стабилизация метрик, дальнейшее увеличение числа эпох не приводит к существенному улучшению результатов обучения.

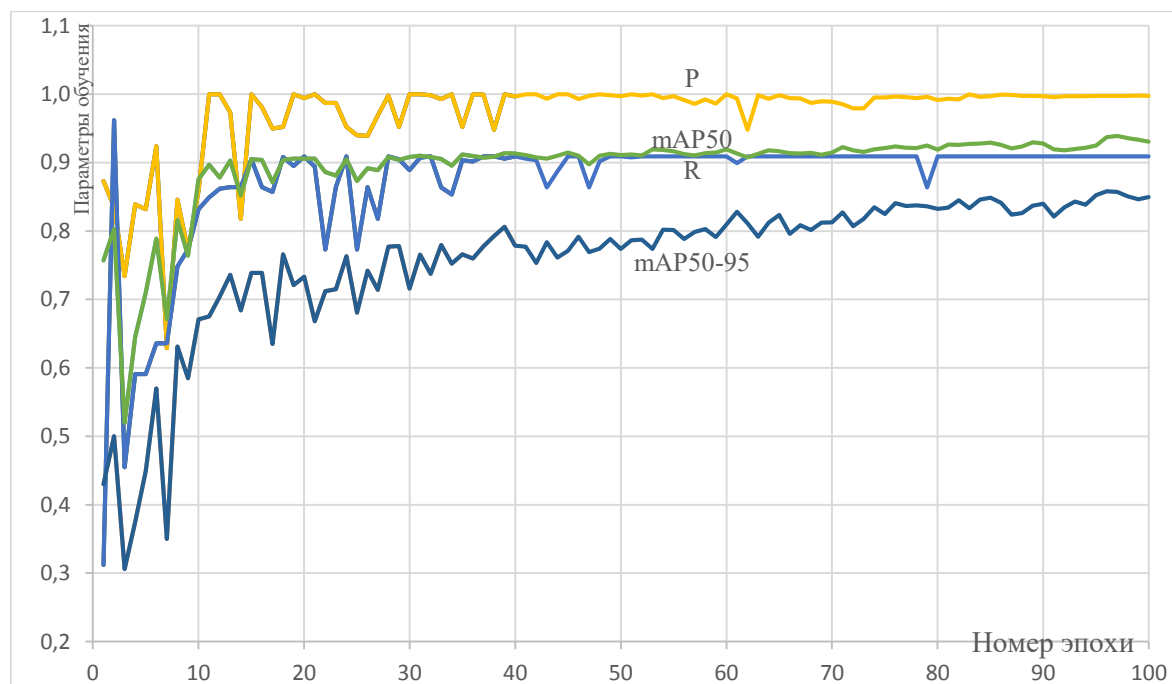


Рис. 1. Процесс обучение нейронной сети *YOLOv8n*

В результате обучения модели *YOLOv8n* на собственном наборе данных, была получена модель *YOLOv8n-Drone*.

В рамках данного исследования, для адаптации *YOLOv8n-Drone* к условиям ограниченных вычислительных ресурсов БПЛА, были реализованы следующие методы оптимизации, нацеленные на снижение вычислительной сложности модели без существенной потери точности обнаружения:

1 **Квантизация.** Квантизация заключается в преобразовании весов и активаций нейронной сети из формата с плавающей точкой (обычно *FP32* или *FP16*) в формат с фиксированной точкой (например, *INT8* или *INT4*). Это позволяет значительно уменьшить объем памяти, необходимый для хранения модели, и ускорить вычисления, поскольку целочисленные операции выполняются быстрее и энергоэффективнее на большинстве аппаратных платформ, используемых во встраиваемых системах (микрокомпьютеры).

В данном исследовании использовалась техника *Quantization Aware Training (QAT)*, реализованная с помощью библиотеки *PyTorch*. *QAT* подразумевает обучение модели с учетом эффектов квантизации. В процессе обучения в модель добавляются операции, имитирующие квантизацию и деквантизацию, что позволяет сети адаптироваться к ограниченному диапазону значений и минимизировать потери точности.

При *INT8* квантизации веса и активации квантовались до 8-битного целочисленного формата. Это обеспечивает хороший компромисс между уменьшением размера модели и сохранением точности.

При *INT4* квантизации веса и активации квантовались до 4-битного целочисленного формата. Это позволило добиться еще большего уменьшения размера модели и увеличения скорости вычислений, однако потребовало более тщательной настройки параметров обучения для компенсации потери точности.

Таким образом, в данном исследовании квантизация *YOLOv8n-Drone* позволила преобразовать веса и активации модели в целочисленный формат (*INT8* и *INT4*), значительно снизив размер модели и увеличив скорость обработки на микрокомпьютере. При этом, использование *INT4* квантизации обеспечило наибольший прирост *FPS*, но сопровождалось незначительным снижением точности обнаружения объектов. Полученные квантованные модели демонстрируют пригодность *YOLOv8n-Drone* для эффективного развертывания на встраиваемых платформах с ограниченными вычислительными ресурсами.

2 *Прунинг*. Прунинг (англ. *pruning* – «обрезка») – метод сжатия нейронной сети, направленный на уменьшение её вычислительной сложности и объёма памяти за счёт удаления избыточных или малозначимых параметров (весов, нейронов или целых слоёв). В данной работе применялся *weight pruning* – поэтапное обнуление весов с наименьшими абсолютными значениями с последующей переподготовкой модели для сохранения точности. Этот подход позволяет сократить размер модели и ускорить её работу на встраиваемых устройствах без существенной потери качества предсказаний.

В рамках исследования по оптимизации *YOLOv8n-Drone* для задач БПЛА, прунинг был применен как метод уменьшения вычислительной сложности модели путем удаления избыточных или малозначимых соединений.

В проекте использован метод *weight pruning*, заключающийся в обнулении весов с наименьшей абсолютной величиной. Этот метод прост в реализации и достаточно эффективен для уменьшения размера модели. Для упрощения процесса прунинга и управления им применялась библиотека *SparseML*. *SparseML* предоставляет инструменты для применения различных техник прунинга, а также для оценки и переподготовки модели после прунинга.

Прунинг не применялся однократно, а выполнялся итеративно. После каждой итерации обнуления весов, модель подвергалась переподготовке на обучающем датасете. Это позволяло восстановить часть потерянной точности и компенсировать негативное влияние прунинга.

Ключевым параметром прунинга является уровень разреженности, определяющий долю весов, которые будут обнулены. В исследовании были протестированы два уровня разреженности: 50 и 75 %.

Обнулению подвергались 50 % весов с наименьшей абсолютной величиной. Это обеспечивало умеренное уменьшение размера модели и увеличение скорости, при относительно небольшом снижении точности. Также обнулению подвергались 75 % весов с наименьшей абсолютной величиной. Это приводило к более значительному уменьшению размера модели и увеличению скорости, но требовало более тщательной переподготовки для сохранения приемлемого уровня точности.

После каждой итерации прунинга и переподготовки, производилась оценка производительности модели на валидационном датасете. Измерялись метрики *Precision*, *Recall*, *mAP50*, *mAP50-95*, а также *FPS* и энергопотребление на платформе *Raspberry Pi 5*.

Реализация прунинга в данном исследовании позволила значительно уменьшить размер *YOLOv8n* и повысить скорость инференса на *Raspberry Pi 5*, за счет обнуления наименее значимых весов. Увеличение уровня разреженности приводило к большему уменьшению размера модели и увеличению скорости, но требовало более тщательной переподготовки для минимизации потерь точности. Таким образом, прунинг является эффективным методом оптимизации, требующим балансировки между уровнем разреженности и усилием, затраченным на переподготовку, для достижения оптимального компромисса между размером модели, скоростью и точностью в задачах захвата объектов БПЛА.

В таблице представлены результаты экспериментов по оптимизации модели *YOLOv8n-Drone* для развертывания на встраиваемой платформе *Raspberry Pi 5*. Рассматривались различные методы оптимизации, включая квантование (*INT8* и *INT4*) и прунинг (50 и 75 %). Основными критериями оценки являлись размер модели, точность (*Precision*, *Recall*, *mAP50*, *mAP50-95*), скорость обработки (*FPS* и задержка) и энергопотребление.

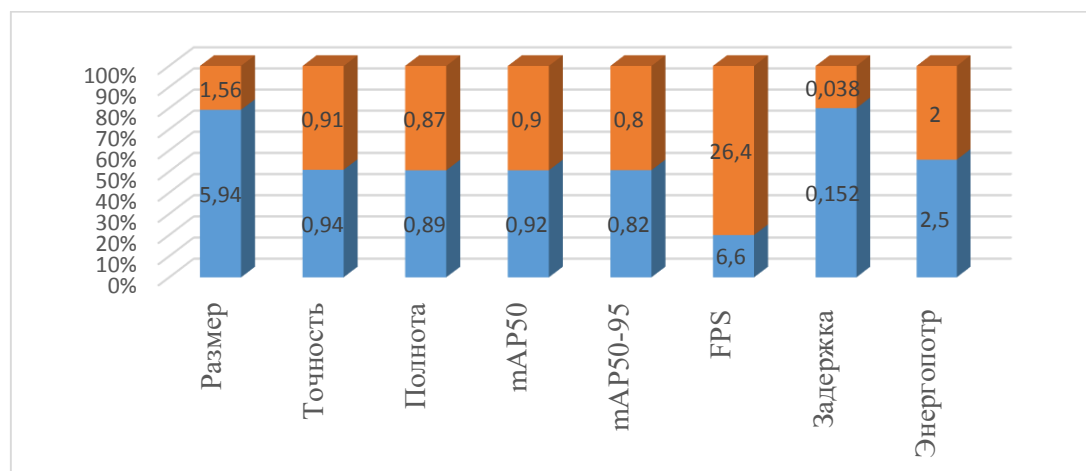
Наиболее значимые улучшения были достигнуты при использовании комбинации квантования *INT8* и прунинга 50 % (*YOLOv8n-Optimized-Drone*). Размер модели был уменьшен до 1.56 MB, что в ~3.8 раза меньше, чем у базовой модели (5.94 MB). При этом наблюдалось лишь незначительное снижение точности: *Precision* уменьшился с 0.94 до 0.91, *Recall* – с 0.89 до 0.87, *mAP50* – с 0.92 до 0.90, а *mAP50-95* – с 0.82 до 0.80. Наиболее важным является то, что *FPS* увеличился с 6.6 до 26.4, а задержка снизилась с 152 до 38 мс. Энергопотребление также уменьшилось с 2.5 до 2.0 W.

Квантование *INT8* показало прирост *FPS* в 3 раза. Прунинг 50 % самостоятельно – в 1,5 раза, а совместно эти методы показали – в 4 раза, поэтому использование этих методов, а также в комбинации, как это демонстрируется в *YOLOv8n-Optimized-Drone*, дает выигрыш в *FPS* и задержке. Другие методы оптимизации, такие как квантование *INT4* и прунинг 75 %, привели к еще большему уменьшению размера модели, но за счет более значительного снижения точности.

Таблица результатов экспериментов по оптимизации модели *YOLOv8n-Drone*

Метод оптимизации	Размер модели (МБ)	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	FPS (RPI 5)	Задержка (мс)	Энергопотреб. (W)
Базовая модель (<i>YOLOv8n-Drone</i> , 60 эпох)	5.94	0.94 (0.91–0.98)	0.89 (0.88–0.90)	0.92 (0.91–0.93)	0.82 (0.81–0.83)	6.6	152 (146–156)	2.5 (2.4–2.6)
<i>YOLOv8n-Optimized-Drone</i> (INT8 + Prune 50 %)	1.56	0.91 (0.89–0.93)	0.87 (0.85–0.89)	0.90 (0.88–0.92)	0.80 (0.78–0.82)	26.4	38 (37–40)	2.0 (1.9–2.1)
Квантизация (INT8)	3.12	0.92 (0.90–0.94)	0.88 (0.86–0.90)	0.91 (0.89–0.93)	0.81 (0.79–0.83)	19.8	76 (73–78)	2.1 (2.0–2.2)
Квантизация (INT4)	1.56	0.89 (0.87–0.91)	0.85 (0.83–0.87)	0.88 (0.86–0.90)	0.79 (0.77–0.81)	9.8	102 (99–105)	1.8 (1.7–1.9)
Прунинг (50 %)	3.74	0.93 (0.91–0.95)	0.88 (0.86–0.90)	0.91 (0.89–0.93)	0.81 (0.79–0.83)	9.9	101 (96–108)	2.3 (2.2–2.4)
Прунинг (75 %)	1.56	0.88 (0.86–0.90)	0.86 (0.84–0.88)	0.87 (0.85–0.89)	0.78 (0.76–0.80)	9.1	110 (106–114)	1.9 (1.8–2.0)

Снижение точности при использовании *YOLOv8n-Optimized-Drone* (INT8 + Prune 50 %) является незначительным (менее 3 %) и может быть приемлемым в зависимости от конкретного приложения. Для большинства задач обнаружения объектов, где важна скорость обработки в реальном времени, небольшое снижение точности вполне оправдано значительным увеличением *FPS* и уменьшением задержки (рис. 2). Например, в системах видеонаблюдения, где требуется быстрое обнаружение потенциальных угроз, или в системах управления дронами, где важна оперативная реакция, скорость обработки имеет приоритет над максимальной точностью.

Рис. 2. Влияние оптимизации модели *YOLOv8n-Optimized-Drone* на производительность

В то же время дальнейшее уменьшение размера модели за счет использования квантования *INT4* или прунинга 75 % приводит к чрезмерному снижению точности, что может быть неприемлемым для многих приложений. Поэтому, учитывая достигнутый баланс между размером модели, точностью

и скоростью обработки, *YOLOv8n-Optimized-Drone (INT8 + Prune 50 %)* представляется оптимальным выбором для развертывания на *Raspberry Pi 5* в задачах обнаружения объектов в реальном времени. Дальнейшее увеличение точности потребовало бы использования более тяжелых моделей, что привело бы к неприемлемому снижению производительности на встраиваемой платформе.

Выводы

Данная работа представила систематическое исследование методов оптимизации модели *YOLOv8n* для развертывания на встраиваемой платформе *Raspberry Pi 5*, ориентированное на обнаружение объектов с применением беспилотных летательных аппаратов. Результаты, полученные в ходе натурных испытаний с использованием БПЛА в реальных условиях, подтвердили эффективность предложенного подхода. Достигнут существенный прогресс в оптимизации модели, о чем свидетельствует модель *YOLOv8n-Optimized-Drone (INT8 + Prune 50 %)*, которая обеспечивает значительное снижение размера модели и задержки при незначительной потере точности, что делает ее оптимальной для задач обнаружения в реальном времени в условиях ограниченных ресурсов БПЛА. Дальнейшее развитие предусматривает изучение адаптивных методов оптимизации, учитывающих динамические изменения вычислительной нагрузки и внешних условий в ходе полета БПЛА, а также исследование более агрессивных методов аугментации данных для повышения устойчивости модели к вариативности условий съемки и улучшения обобщающей способности. Кроме того, планируется изучение возможности интеграции модели с другими сенсорами БПЛА для повышения точности и надежности обнаружения.

Список литературы

- 1 Улучшенный алгоритм на основе *YOLOv5* для обнаружения амброзии полыннолистной на изображениях, полученных с помощью БПЛА / С. Сяомин, С. Тяньцэн, М. Хаомин [и др.] // Front. Plant Sci. – 2021. – Т. 15. – С. 1360419. – DOI 10.3389/fpls.2024.1360419.
- 2 Real-time Object Detection for UAV Aerial Images Based on Improved *YOLOv7* / Y. Zhang, X. Chen, H. Li, Y. Wang // Journal of Electronic Imaging. – 2015. – Vol. 32, No. 6. – P. 063002. – DOI 10.3390/electronics12234886.
- 3 Сацюк, А. В. Оценка эффективности алгоритмов *YOLO* для обнаружения объектов в реальном времени во встраиваемых системах беспилотных транспортных средств / А. В. Сацюк, Р. В. Белый, А. Е. Ищенко // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2024. – № 4 (75). – С. 73–82. – ISSN 1993-5579.
- 4 Redmon, J. A. *YOLO9000* : Better, Faster, Stronger / J. Redmon, A. Farhadi // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – arXiv :1612.08242v1.
- 5 Сацюк, А. В. Анализ трекеров алгоритмов компьютерного зрения в вопросах отслеживания подвижных объектов в видеопотоке / А. В. Сацюк, Е. Г. Воевода // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2023. – № 71. – С. 54–65. – ISSN 1993-5579.
- 6 Библиотека программиста. *JavaScript* для глубокого обучения / Ф. Шолле, Э. Нильсон, С. Бэйлесчи [и др.]. – Санкт-Петербург : Питер, 2021. – 576 с. – ISBN 978-5-4461-1697-3.

References

- 1 An improved *YOLOv5-based* algorithm for common ragweed detection in UAV images / S. Xiaoming, S. Tianzeng, M. Haoming [et al.] // Front. Plant Sci. – 2021. – Vol. 15. – P. 1360419. – DOI 10.3389/fpls.2024.1360419.
- 2 Real-time Object Detection for UAV Aerial Images Based on Improved *YOLOv7* / Y. Zhang, X. Chen, H. Li, Y. Wang // Journal of Electronic Imaging. – 2015. – Vol. 32, No. 6. – P. 063002. – DOI 10.3390/electronics12234886.
- 3 Satsuk, A. V. Evaluation of the effectiveness of *YOLO* algorithms for real-time object detection in embedded systems of unmanned vehicles / A. V. Satsuk, R. V. Bely, A. E. Ishchenko // Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport. – 2024. – No. 4 (75). – P. 73–82. – ISSN 1993-5579.
- 4 Redmon, J. A. *YOLO9000* : Better, Faster, Stronger / J. Redmon, A. Farhadi // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – arXiv :1612.08242v1.
- 5 Satsuk, A. V. Analysis of computer vision algorithm trackers in matters of tracking moving objects in a video stream / A. V. Satsuk, E. G. Voevoda // Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport. – 2023. – No. 71. – P. 54–65. – ISSN 1993-5579.
- 6 Programmer's Library. *JavaScript* for deep learning / F. Schollet, E. Nilsson, S. Bayleschi [et al.]. – Saint-Petersburg : Piter, 2021. – 576 p. – ISBN 978-5-4461-1697-3.

7 *YOLOv8*. Ultralytics. Официальный репозиторий *YOLOv8* / G. Jocher, A. Stoken, A. Chaly [et al.]. – 2023. – URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (date of access: 02/07/2025).

8 Enhancing Geometric Factors in Model Learning and Inference for Object Detection and Instance Segmentation / Z. Zheng, P. Wang, D. Ren [et al.] // Transactions on Cybernetics. – DOI 10.1109/TCYB.2021.3095305.

9 An Efficient UAV-Based Aerial Image Object Detection Method via Improved *YOLOv4* / B. Liu, X. Li, G. Wang [et al.] // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 12, No. 21. – P. 3599. – DOI 10.1109/SIU53274.2021.9478027.

10 Сацюк, А. В. Особенности разработки беспилотных летательных аппаратов для отрасли железнодорожного транспорта / А. В. Сацюк, А. А. Воробьев // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2023. – № 68. – С. 13–21. – ISSN 1993-5579.

11 Сацюк, А. В. Автономное наведение БПЛА с использованием компьютерного зрения : проблема точного управления рулями / А. В. Сацюк, Д. В. Швалов // Автоматика на транспорте. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 372–381. – DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-04-372-381.

12 Lalak, M. Automated Detection of Atypical Aviation Obstacles from UAV Images Using a YOLO Algorithm / M. Lalak, D. Wierzbicki // Sensors (Basel). – 2022. – Vol. 22, No. 17. – P. 6611. – DOI 10.3390/s22176611.

7 *YOLOv8*. Ultralytics. Official *YOLOv8* repository / G. Jocher, A. Stoken, A. Chaly [et al.]. – 2023. – URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (date of access: 02/07/2025).

8 Zheng, Z. ??? Enhancing Geometric Factors in Model Learning and Inference for Object Detection and Instance Segmentation / Z. Zheng, P. Wang, D. Ren [et al.] // Transactions on Cybernetics. – DOI 10.1109/TCYB.2021.3095305.

9 An Efficient UAV-Based Aerial Image Object Detection Method via Improved *YOLOv4* / B. Liu, X. Li, G. Wang [et al.] // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 12, No. 21. – P. 3599. – DOI 10.1109/SIU53274.2021.9478027.

10 Satsuk, A. V. Features of the development of unmanned aerial vehicles for the railway transport industry / A. V. Satsuk, A. A. Vorobyov // Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport. – 2023. – No. 68. – P. 13–21. – ISSN 1993-5579.

11 Satsuk, A. V. Autonomous guidance of UAVs using computer vision : the problem of precise control of rudders / A. V. Satsuk, D. V. Shvalov // Automation in transport. – 2024. – Vol. 10, No. 4. – P. 372–381. – DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-04-372-381.

12 Lalak, M. Automated Detection of Atypical Aviation Obstacles from UAV Images Using a YOLO Algorithm / M. Lalak, D. Wierzbicki // Sensors (Basel). – 2022. – Vol. 22, No. 17. – P. 6611. – DOI 10.3390/s22176611.

A. V. Satsuk

OPTIMIZATION OF *YOLOv8* ARCHITECTURE FOR UAV OBJECT CAPTURE TASKS: ANALYSIS OF THE TRADE-OFF BETWEEN ACCURACY, SPEED AND COMPUTATIONAL RESOURCES

Abstract. This paper presents a comprehensive approach to optimizing the *YOLOv8n* model for object detection tasks using unmanned aerial vehicles (UAVs) under constrained computational resources. The focus is on quantization (INT8/INT4) and pruning (50%/75%) techniques aimed at reducing the model's computational complexity while maintaining acceptable accuracy. As a result of optimization, the *YOLOv8n-Optimized-Drone* model was developed, demonstrating a 4-fold increase in processing speed on the Raspberry Pi 5 platform compared to the basic version. The model size was reduced by 3.8 times, which is critical for embedded UAV systems.

A specialized dataset with bounding box markup was created for training and validating the model, taking into account the UAV shooting conditions. Field tests confirmed the effectiveness of the proposed method, which provides a balance between performance, power consumption, and accuracy. Additionally, the influence of different quantization and pruning levels on final metrics was investigated, enabling the determination of the optimal configuration for deployment on low-power devices. The obtained results open prospects for further adaptation of the model to dynamic flight conditions and integration with multi-sensor UAV systems.

Keywords: unmanned aerial vehicle, quantization, pruning, neural network model optimization, neural network, *YOLO*, *YOLO metrics*.

For citation: Satsuk, A. V. Optimization of *YOLOv8* architecture for UAV object capture tasks: analysis of the trade-off between accuracy, speed and computational resources / A. V. Satsuk // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 35–42. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_2_35.

Сведения об авторах

Сацюк Александр Владимирович

Донецкий институт железнодорожного транспорта (ДОНИЖТ),
кафедра «Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: alexandersatsuk@gmail.com

Information about the authors

Satsuk Alexander Vladimirovich

Donetsk Institute of Railway Transport (DonIRT),
Chair “Automation, Telemechanics, Communication and Computer Engineering”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: alexandersatsuk@gmail.com

А. С. Филипченко

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО МЕТОДА СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация. В задачах ряда современных вычислительных центров широкое применение нашли автоматические системы программной роботизации. Используемая российская платформа программной роботизации «RPA Robin» хорошо зарекомендовала себя, в том числе в области задач автоматизации администрирования целого класса информационных систем железнодорожного транспорта. Возникший рост числа информационных систем, управляемых и администрируемых программными роботами, накладывает ограничения на ресурс оперативной памяти терминальных серверов. В данной статье предлагается способ снижения потребления оперативной памяти терминальными серверами программной роботизации в вычислительных центрах путем применения нового специализированного метода сжатия изображений с потерями.

Ключевые слова: избыточность сообщений, обработка изображений, машинное зрение, сжатие данных, программная роботизация, оперативная память.

Для цитирования: Филипченко, А. С. Применение нового метода сжатия изображений в системах машинного зрения / А. С. Филипченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 43–52. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_43.

Введение

В области инноваций цифровой железной дороги выделяют ключевые возможности, к которым в том числе относятся «Большее использование данных» и «Ускоренное исследование, разработки и внедрение новых технологий» [1]. Однако основная проблема в использовании больших данных заключается в сложности их обработки, поскольку они накладывают принципиально иные требования к скорости обработки и объёму запоминающих устройств. В данном исследовании раскроем возможный способ снижения нагрузки на устройства хранения данных путём применения нового метода сжатия изображений в системах машинного зрения.

Повышение показателей эффективности систем технического зрения на транспорте в части экономии ресурсов оперативных запоминающих устройств является важной задачей, решение которой поможет существенно снизить производственные и экономические риски транспортно-логистического бизнеса [2]. В настоящее время большое развитие получили различные робототехнические системы, призванные помогать человеку в различных сферах его деятельности. Однако многие задачи, стоящие перед разрабатываемыми комплексами, остаются нерешёнными или решаются с недостаточной точностью. К таким задачам, требующим повышения точности решения, относится задача слежения за объектами на видеопоследовательности [3].

В данной статье ставится задача исследовать влияние применения нового метода сжатия изображений на снижение потребления оперативной памяти терминальными серверами, используемыми в сфере машинного зрения. Для решения данной задачи потребуется подготовить программную реализацию нового метода сжатия в интегрированной среде разработки «RPA Robin» и провести количественные эксперименты с замерами потребления оперативной памяти без использования данной реализации и с её использованием с целью сравнения.

Для исследования будет взят вполне распространённый в сфере программной роботизации алгоритм взаимодействия с интерфейсом десктопной консоли администрирования информационных систем. Данный алгоритм взаимодействия использует инструменты машинного зрения для управления консолью администрирования путём нажатия на кнопки и ввода текста в соответствующие поля. По умолчанию классический алгоритм такого взаимодействия не содержит механизмов сжатия данных, хотя и работает с большими объёмами компьютерной графики. В связи с этим предполагается, что применение механизмов сжатия позволит снизить нагрузку на оперативное запоминающее устройство вычислительной системы, выполняющей данный алгоритм. В результате необходимо получить коли-

чественную разницу в среднем потреблении ресурса ОЗУ между классической реализацией и реализацией с новым механизмом сжатия изображений, которая должна засвидетельствовать соответствующее улучшение алгоритма.

Основная часть

В процессе разработки программных роботов на платформе «RPA Robin» часто возникает потребность использовать инструменты машинного зрения. Данная потребность чаще всего связана с использованием программных пакетов консолей администрирования для рабочих станций, реализованных в виде десктопных приложений. В случае когда консоль администрирования реализована в виде веб-приложения, машинное зрение не требуется, поскольку к элементам интерфейса веб-приложения можно обращаться через браузер с использованием инструментов «XPath» [4]. Однако если консоль администрирования реализована в виде настольной программы, то без машинного зрения в этом случае уже не обойтись. Очевидно, что в данном случае вычислительная нагрузка и потребление ресурсов возрастают. Поэтому дальнейшее развитие подобных интеллектуальных систем будет обеспечиваться углубленными исследованиями технологий распознавания сигналов, таких как звуковой анализ, машинное зрение и системы самодиагностики [5, 6].

Добиться высокой эффективности обработки и интерпретации сигналов в оптических устройствах возможно при наличии их математических моделей [7]. Возьмём простейшую и наиболее часто встречающуюся задачу машинного зрения в системах программной роботизации. Пусть требуется выполнить нажатие левой кнопкой мыши по кнопке в интерфейсе консоли администрирования. Чтобы выполнить такое нажатие, необходимо по шаблону кнопки на снимке экрана с открытой консолью администрирования получить координаты $(x; y)$ этой кнопки на экране. Таким образом, для программы решения данной задачи машинного зрения входными данными являются снимок экрана с консолью администрирования и шаблон кнопки, а выходными данными – координаты этой кнопки для последующего нажатия на неё. Формализация данной задачи в том числе может быть отнесена к алгоритмам обработки и анализа больших данных [8]. В виде схемы данная задача представлена на рис. 1.

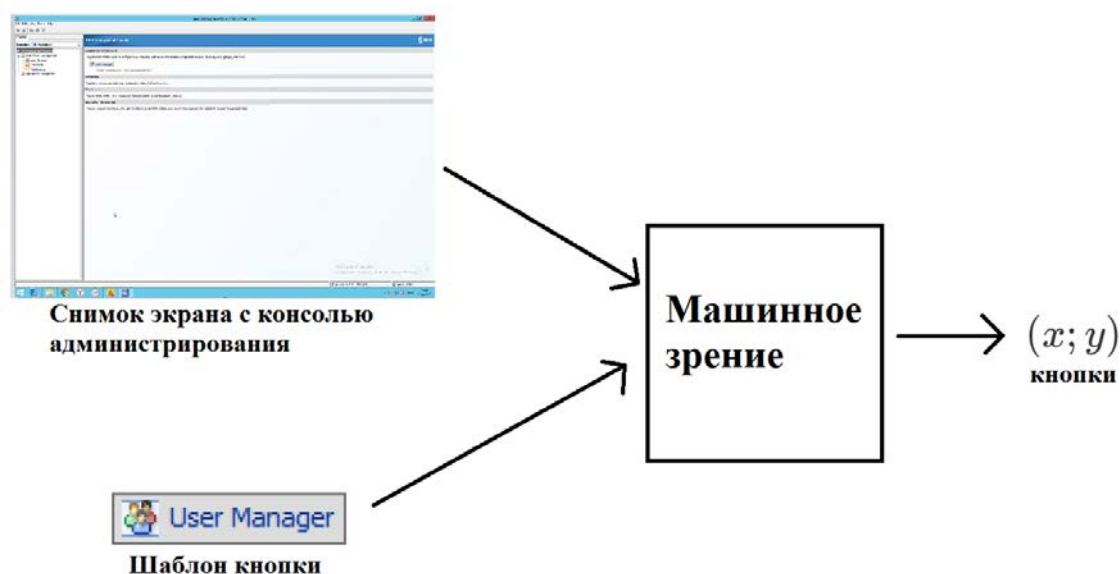


Рис. 1. Исследуемая задача машинного зрения

Подобную постановку задачи машинного зрения вполне можно считать универсальной, поскольку она возникает не только в системах программной роботизации, но и, например, в системах автоведения поездов [9]. В классической реализации описанной задачи машинного зрения обычно используются немодифицированные снимки экрана. Однако подобные изображения обладают изрядной долей избыточности. Наличие избыточности в записи сообщений какого-либо источника информации проявляется в возможности записать эти сообщения в среднем более кратко, используя те же самые знаки, то есть заменяя код на другой с тем же алфавитом [10]. Максимальная доля «лишних» знаков определяется по статистическим свойствам рассматриваемого источника сообщений и также называется его избыточностью. В этом понимании избыточность сообщений R определяется по формуле (1), где m – число букв алфавита, а H – энтропия источника на букву сообщения:

$$R = 1 - \frac{H}{H_{\max}} = 1 - \frac{H}{\log_2 m}. \quad (1)$$

Для экономии оперативной памяти в процессе выполнения функций машинного зрения указанную избыточность имеет смысл отбросить. Но как именно обнаружить эту избыточность в исходных изображениях экрана и шаблона кнопки? Ответ на этот вопрос даёт теория информационной энтропии Шеннона. Энтропия Шеннона численно оценивает среднее количество информации, необходимое для описания символа сигнала и вычисляется по формуле (2), где $H(X)$ – энтропия случайной величины X , которая является источником информации; $p(x_i)$ – вероятность того, что символ x_i из множества возможных символов $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ будет выбран; n – количество возможных символов, которые могут быть получены от источника информации [11]:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i). \quad (2)$$

Поскольку цифровые технологии – это представление информации в формате нулей и единиц [12], то для минимального описания информации достаточно только двух этих состояний. Этим объясняется основание логарифма равное числу 2 в формулах (1) и (2).

Максимум информационной энтропии на равномерном распределении доказывается, например, методом множителей Лагранжа [13, 14]. При делении изображений на компоненты по частоте, низкочастотный компонент изображения представляет нормальное распределение, а высокочастотные – равномерное. Следовательно, для задачи машинного зрения избыточным является низкочастотный компонент изображения, и его допустимо отбросить, тем самым добившись сжатия исходных и обрабатываемых роботом данных. При этом скорость и точность определения координат объектов не изменяется, поскольку для систем машинного зрения высокочастотные компоненты изображений являются достаточно информативными.

В данном исследовании в качестве платформы программной роботизации используется программный пакет «RPA Robin» версии 1.3.8. Функции сжатия изображений и определения координат реализованы на языке программирования «C#». В качестве алгоритма сжатия взято вейвлет-преобразование «Коэна – Добеши – Фово», которое уже хорошо зарекомендовало себя в подобных задачах, в том числе в условиях применения параллельных вычислений [15]. Для реализации свёртки сигнала использовано авторское программное обеспечение, прошедшее регистрацию в Роспатенте [16].

Для работы с изображениями использована библиотека «System.Drawing.Bitmap». Для замеров потребления ОЗУ применялась библиотека «System.Diagnostics.Process». При решении задачи машинного зрения использовалась библиотека «Emgu CV», являющаяся кросс-платформенным «.Net» дополнением для библиотеки «OpenCV».

Прямая реализация дискретного вейвлет-преобразования «Коэна – Добеши – Фово» – «CDF 9/7» – оперирует двумя фильтрами [17]:

- фильтром низких частот $L = (l_1, l_2, \dots, l_9)$;
- фильтром высоких частот $H = (h_1, h_2, \dots, h_7)$.

Формула (3) отражает процесс преобразования входных сигналов $X[n] = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ в два компонента [18]: низкочастотный компонент $X^{[L]}[n]$ и высокочастотный компонент $X^{[H]}[n]$ –

$$X^{[L]}[n] = \sum_{i=1}^9 X[n-i+1]l_i, X^{[H]}[n] = \sum_{i=1}^7 X[n-i+1]h_i. \quad (3)$$

Алгоритм сжатия изображений вейвлет-преобразованием «CDF 9/7» можно представить в виде блок-схемы на рис. 2. Данный алгоритм хорошо распараллеливается, особенно при использовании числа параллельных потоков кратных 8. Стоит отметить, что интегрированная среда разработки «RPA Robin» также имеет встроенные инструменты распараллеливания вычислительного процесса, которые хорошо зарекомендовали себя на практике [19, 20]. Иерархическая структура, основанная, например, на применении параллельных вычислений, может быть полезна для сокращения аппаратных затрат и упрощения доказательства безопасности по сравнению с реализацией всех функций в одном процессоре [21].

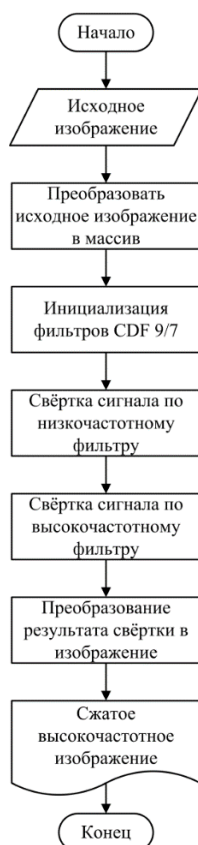
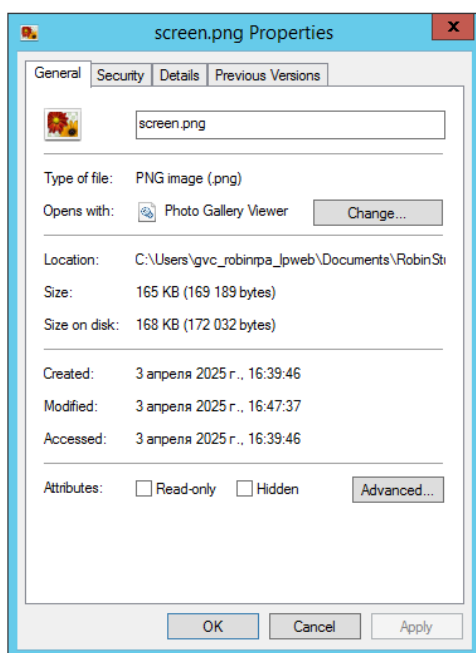
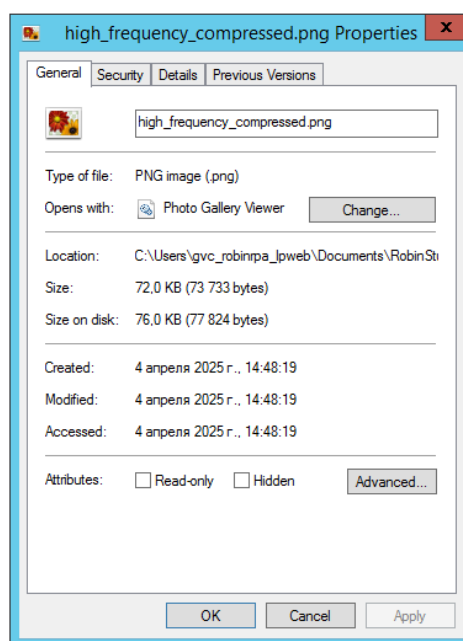


Рис. 2. Блок-схема алгоритма сжатия на основе «CDF 9/7» в данной постановке задачи

В рамках проведённого исследования данным алгоритмом был сжат снимок экрана с открытой консолью администрирования «SAS Management Console». Результаты сжатия снимка экрана приведены на рис. 3. Видно, что исходное изображение было сжато более чем в два раза. Так, если судить по абстрактному размеру, то изображение сжалось на 56,42 %, а если судить по конкретному размеру на диске, то на 54,76 %.



a



б

Рис. 3. Размеры изображения со снимком экрана:

a – до сжатия; *б* – после сжатия

Для определения координат объектов машинным зрением необходимо загрузить в проект робота библиотеки «Emgu.CV.UI.dll» и «Emgu.CV.World.dll». В операционной системе Microsoft Windows NT данные библиотеки обычно располагаются в каталоге «C:\Program Files (x86)\ROBIN Platform». Блок-схема данного алгоритма представлена на рис. 4. Цикл организован чисто в исследовательских целях. Для получения координат объекта достаточно одной итерации, но необходимость понимания поведения алгоритма на обработке однородных потоков данных требует многократного повторения эксперимента. В нашем случае мы организуем цикл на 100 последовательных итераций распознавания. Алгоритм распознавания универсальный: мы можем распознавать как исходные, так и высокочастотные изображения, просто изменив путь к файлам в коде. Данное обстоятельство позволяет нам достоверно сравнить реализации с исходными и сжатыми изображениями.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма технического зрения для множества испытаний

Для сравнения реализаций воспользуемся встроенными в «C#» инструментами мониторинга потребления ОЗУ процессом. Блок-схема алгоритма мониторинга представлена на рис. 5.

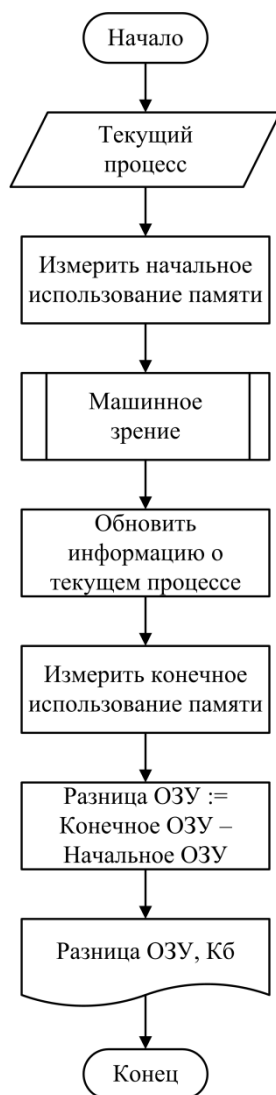


Рис. 5. Блок-схема алгоритма мониторинга потребления оперативной памяти

Для каждой реализации по 100 итераций выполнено пять замеров. В таблице представлены полученные результаты замеров. В последней строке таблицы отдельно указаны посчитанные средние арифметические значения.

**Сравнение потребления оперативной памяти функциями машинного зрения
в различных реализациях**

Обработка исходных изображений	Обработка сжатых изображений
14828 Кб	14308 Кб
14636 Кб	13776 Кб
15148 Кб	14464 Кб
15316 Кб	13112 Кб
15368 Кб	14384 Кб
Средние значения:	
15059,2 Кб	14008,8 Кб

Таким образом, обработка исходных изображений потребовала в среднем 15059,2 Кб оперативной памяти, а обработка сжатых изображений – 14008,8 Кб. В итоге потребление оперативной памяти в данных реализациях можно представить гистограммой на рис. 6.

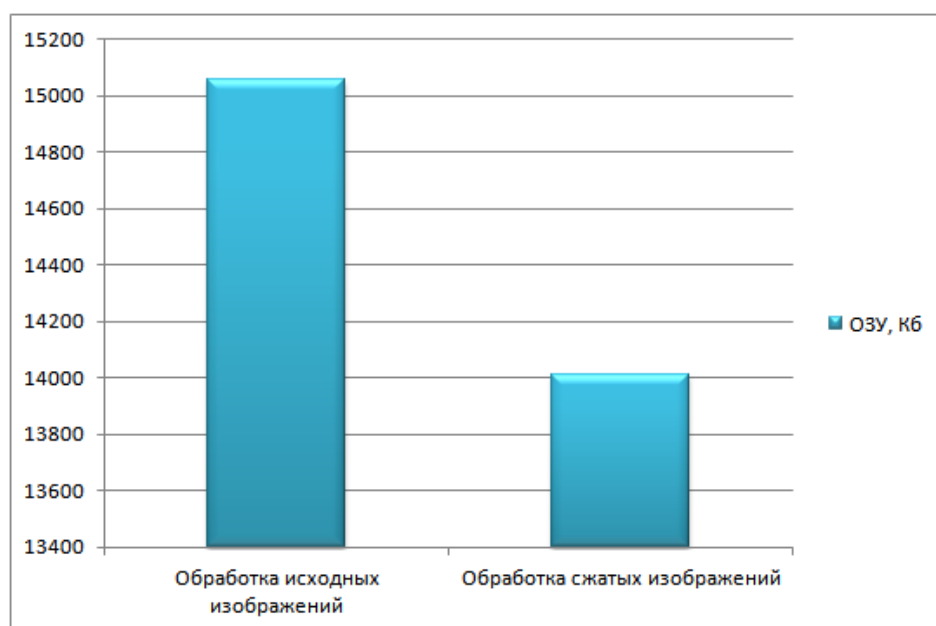


Рис. 6. Сравнение средних значений потребления ОЗУ по реализациям

Заключение

В статье выполнена постановка задачи, требующая применения нового метода сжатия изображений в системах машинного зрения в системах программной роботизации. Описана исследуемая задача машинного зрения, заключающаяся в получении координат (x; y) кнопки пользовательского интерфейса для последующего наведения и взаимодействия с ней указателем мыши. Данная задача машинного зрения является универсальной и довольно часто повторяющейся при использовании программной роботизации.

Описана теория, лежащая в основе механизмов сжатия данных. Теория адаптирована к задаче сжатия изображений путем фильтрации компонентов изображений дискретным вейвлет-преобразованием. В виде блок-схемы формализован алгоритм сжатия на основе «CDF 9/7» в данной постановке задачи. Алгоритм апробирован на снимке экрана с пользовательским интерфейсом. Проанализированы результаты сжатия путем измерения объемов изображения в байтах до и после сжатия.

Детализирована программная реализация и блок-схема алгоритма технического зрения для данной задачи. Описан механизм и блок-схема алгоритма мониторинга потребления оперативной памяти. Проведены испытания классической реализации машинного зрения, обрабатывающей исходные изображения, и улучшенной реализации, выполняющей обработку сжатых изображений. В испытаниях проведены замеры потребления ресурса оперативной памяти процессом. Для каждой реализации выполнено пять испытаний, посчитаны средние арифметические значения.

Результаты испытаний показали выигрыш в экономии ОЗУ в 7 % в улучшенной реализации машинного зрения, использующей сжатые изображения. Применение механизмов сжатия изображений позволило снизить нагрузку на оперативное запоминающее устройство вычислительной системы, выполняющей исследуемый алгоритм машинного зрения. Для многократно повторяющихся задач и однородных потоков данных эффект от экономии ресурсов будет накапливаться в том числе при масштабировании вычислений.

Список литературы

- 1 Экономика инноваций цифровой железной дороги. Опыт Великобритании / В. П. Куприяновский, П. В. Куренков, Г. В. Бубнова [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5, № 3. – С. 79–99. – ISSN 2307-8162.
- 2 Информационные технологии управления рисками транспортно-логистического бизнес-блока холдинга «РЖД» / Д. Г. Кахриманова,

References

- 1 Economics of innovations for digital railways. Experience in the UK / V. P. Kupriyanovsky, P. V. Kurenkov, G. V. Bubnova [et al.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Vol. 5, No. 3. – P. 79–99. – ISSN 2307-8162.
- 2 Information technologies of risk management of the transport and logistic business block of the holding “RZD” / D. G. Kakhriyanova,

Г. В. Бубнова, О. В. Ефимова [и др.] // Информационные технологии и инновации на транспорте : материалы 4-й Международной научно-практической конференции, Орел, 15–16 мая 2018 года / Под редакцией А. Н. Новикова. – Орел : Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, 2019. – С. 38–43.

3 **Bozhenyuk, A.** Image Stabilization by Orientation of the Unmanned Aerial Vehicle / A. Bozhenyuk, K. Morev, I. Dolgiy // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 330 LNNS. – P. 647–653. – DOI 10.1007/978-3-030-87178-9_64.

4 **Ларина, Т. Б.** Проектирование программных роботов в среде RPA Robin / Т. Б. Ларина, А. С. Филиппченко // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции, Сочи, 01–10 октября 2022 года / Под редакцией С. У. Увайсова. – Москва : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н. Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА имени профессора Н. Е. Жуковского, 2022. – С. 15–20.

5 **Rozenberg, E. N.** Big Data-Based Methods for Functional Safety Case Preparation / E. N. Rozenberg, A. M. Olshansky, A. V. Ozerov // Journal of Information Technology and Applications. – 2023. – Vol. 13, No. 2. – P. 91–98. – DOI 10.7251/JIT2302091R.

6 Об использовании методов Big Data в области обеспечения функциональной безопасности / Е. Н. Розенберг, А. М. Ольшанский, А. В. Озеров, Р. А. Сафронов // Надежность. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 38–46. – DOI 10.21683/1729-2646-2022-22-2-38-46.

7 **Долгий, И. Д.** Волноводно-оптические технологии сбора информации и математические модели ее представления в интегрированных системах диспетчерского управления и централизации / И. Д. Долгий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 2 (42). – С. 58–64. – ISSN 0201-727X.

8 **Желенков, Б. В.** Типология алгоритмов обработки и анализа больших данных / Б. В. Желенков, А. С. Филиппченко // Цифровые технологии и решения в сфере транспорта и образования: материалы II Национальной научно-практической конференции. – Москва : Российский университет транспорта, Белый ветер, 2023. – С. 43–49.

G. V. Bubnova, O. V. Efimova [et al.] // Information Technologies and Innovations in Transport : Proceedings of the 4th International scientific and practical conference, Orel, 15–16 May 2018 / Edited by A. N. Novikov. – Orel : Orel State University named after I. S. Turgenev, 2019. – P. 38–43.

3 **Bozhenyuk, A.** Image Stabilization by Orientation of the Unmanned Aerial Vehicle / A. Bozhenyuk, K. Morev, I. Dolgiy // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 330 LNNS. – P. 647–653. – DOI 10.1007/978-3-030-87178-9_64.

4 **Larina, T. B.** Designing software robots in the RPA Robin environment / T. B. Larina, A. I. Filipchenko // Innovative, information and communication technologies : collection of works of the XIX International scientific and practical conference, Sochi, October 01–10, 2022 / edited by S. U. Uvaisov. – Moscow : Association of graduates and employees of the VVIA named after professor N. E. Zhukovsky for the promotion of the preservation of the historical and scientific heritage of the VVIA named after professor N. E. Zhukovsky, 2022. – P. 15–20.

5 **Rozenberg, E. N.** Big Data-Based Methods for Functional Safety Case Preparation / E. N. Rozenberg, A. M. Olshansky, A. V. Ozerov // Journal of Information Technology and Applications. – 2023. – Vol. 13, No. 2. – P. 91–98. – DOI 10.7251/JIT2302091R.

6 On the use of Big Data methods in the field of ensuring functional safety / E. N. Rosenberg, A. M. Olshansky, A. V. Ozerov, R. A. Safronov // Reliability. – 2022. – Vol. 22, No. 2. – P. 38–46. – DOI 10.21683/1729-2646-2022-22-2-38-46.

7 **Dolgiy, I. D.** Waveguide-optical technology for data acquisition and mathematical models for its presentation in the integrated systems of dispatcher control and centralization / I. D. Dolgiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2011. – No. 2 (42). – P. 58–64. – ISSN 0201-727X.

8 **Zhelenkov, B. V.** Typology of Big Data processing and analysis algorithms / B. V. Zhelenkov, A. S. Filipchenko // Digital technologies and solutions in the field of transport and education : Materials of the II National scientific and practical conference. – Moscow : Russian University of Transport, Bely Veter, 2023. – P. 43–49.

9 Реализация логистических решений по повышению эффективности железных дорог Российской Федерации / М. А. Дежков, А. А. Никонюк, С. А. Филипченко [и др.] // Логистика. – 2025. – № 1 (218). – С. 10–14. – ISSN 2219-7222.

10 Математический энциклопедический словарь. / Гл. ред. Ю. В. Прохоров ; Ред. кол. : С. И. Адян, Н. С. Бахвалов, В. И. Битюцков, А. П. Ершов, Л. Д. Кудрявцев, А. Л. Онищик, А. П. Юшкевич. – Москва : Советская энциклопедия, 1988. – 847 с.

11 **Shannon, C. E.** A Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon // Bell System Technical Journal. – 1948. – No. 27. – P. 379–423.

12 **Климов, А. А.** К толкованию «цифровых» экономических понятий / А. А. Климов, П. В. Куренков, В. Н. Емец // Экономика железных дорог. – 2018. – № 1. – С. 69–73. – ISSN 1727-6500.

13 **Васильев, А. М.** Введение в статистическую физику: учебное пособие / А. М. Васильев. – Москва : Высш. школа, 1980. – 272 с.

14 **Филипченко, А. С.** Моделирование безотказной работы параллельной специализированной вычислительной системы на транспорте методом неопределённых множителей Лагранжа / А. С. Филипченко // Цифровые технологии и решения в сфере транспорта и образования : материалы III Национальной научно-практической конференции, Москва, 05 декабря 2024 года. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 252–259.

15 **Филипченко, А. С.** Вычисление показателей эффективности оптимизированной реализации параллельного алгоритма CDF 9/7 / А. С. Филипченко // Интеллектуальные транспортные системы : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 476–482. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-476-482.

16 **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683191 Российская Федерация.** Параллельная аппаратно-эффективная реализация дискретного вейвлет-преобразования CDF 9/7 для обработки изображений / А. С. Филипченко. – № 2024683056 ; заявл. 07.10.2024 ; опублик. 10.10.2024.

17 **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Издание 3-е, исправленное и дополненное. – Москва : Техносфера, 2012. – 1104 с. – ISBN 978-5-94836-331-8.

18 **Lyakhov, P.** Comparison of Approaches to the

9 Implementation of logistics solutions to improve the efficiency of railways of the Russian Federation / M. A. Dezhkov, A. A. Nikonyuk, S. A. Filipchenko [et al.] // Logistics. – 2025. – No. 1 (218). – P. 10–14. – ISSN 2219-7222.

10 Mathematical Encyclopedic Dictionary. / Ed.-in-chief Yu. V. Prokhorov ; Ed. Team : S. I. Adyan, N. S. Bakhvalov, V. I. Bityutskov, A. P. Ershov, L. D. Kudryavtsev, A. L. Onishchik, A. P. Yushkevich. – Moscow : Sov. Encyclopedia, 1988. – 847 p.

11 **Shannon, C. E.** A Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon // Bell System Technical Journal. – 1948. – No. 27. – P. 379–423.

12 **Klimov, A. A.** On the interpretation of "digital" economic concepts / A. A. Klimov, P. V. Kurenkov, V. N. Yemets // Railroad Economics. – 2018. – No. 1. – P. 69–73. – ISSN 1727-6500.

13 **Vasiliev, A. M.** Introduction to statistical physics : textbook / A. M. Vasiliev. – Moscow : Vysh. shkola, 1980. – 272 p.

14 **Filipchenko, A. S.** Modelling of failure-free operation of a parallel specialized computing system on transport by the method of indefinite Lagrange multipliers / A. S. Filipchenko // Digital technologies and solutions in transport and education : Proceedings of the III National scientific and practical conference, Moscow, December 05, 2024. – Moscow : Russian University of Transport (MIIT), 2024. – P. 252–259.

15 **Filipchenko, A. S.** Calculation of performance indicators of an optimized implementation of parallel CDF 9/7 algorithm / A. S. Filipchenko // Intelligent transport systems : Proceedings of the III International scientific and practical conference, Moscow, May 30, 2024. – Moscow : Russian University of Transport (MIIT), 2024. – P. 476–482. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-476-482.

16 **Certificate of state registration of computer program No. 2024683191 Russian Federation.** Parallel hardware-efficient realization of discrete wavelet transform CDF 9/7 for image processing / A. S. Filipchenko. – No. 2024683056 ; applied. 07.10.2024 ; published 10.10.2024.

17 **Gonzalez, R.** Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods. – 3rd edition, revised and supplemented – Moscow : Technosphere, 2012. – 1104 p. – ISBN 978-0-13-234563-7.

18 **Lyakhov, P.** Comparison of Approaches to the

Circuits Design for DWT with CDF 9/7 Wavelet / P. Lyakhov, N. Nagornov, M. Bergerman // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 424. – P. 1–9. – DOI 10.1007/978-3-030-97020-8_1.

19 **Larina, T. B.** Experiments with multi-threaded processing in RPA Robin / T. B. Larina, A. S. Filipchenko // Information Innovative Technologies : International Scientific-Practical Conference, Prague, 25–29 April 2022. – Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022. – P. 245–252.

20 **Larina, T. B.** Features of operations parallelization in RPA systems / T. B. Larina, A. S. Filipchenko // Information Innovative Technologies : International Scientific-Practical Conference, Prague, 25–29 April 2022. – Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022. – P. 239–245.

21 Оценка безопасности и бесперебойности работы системы управления маневровым локомотивом с техническим зрением / И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг, И. А. Панферов [и др.] // Надежность. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 30–37. – DOI 10.21683/1729-2646-2023-23-1-30-37.

Circuits Design for DWT with CDF 9/7 Wavelet / P. Lyakhov, N. Nagornov, M. Bergerman // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 424. – P. 1–9. – DOI 10.1007/978-3-030-97020-8_1.

19 **Larina, T. B.** Experiments with multi-threaded processing in RPA Robin / T. B. Larina, A. S. Filipchenko // Information Innovative Technologies : International Scientific-Practical Conference, Prague, 25–29 April 2022. – Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022. – P. 245–252.

20 **Larina, T. B.** Features of operations parallelization in RPA systems / T. B. Larina, A. S. Filipchenko // Information Innovative Technologies : International Scientific-Practical Conference, Prague, 25–29 April 2022. – Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2022. – P. 239–245.

21 Assessment of the safety and continuity of operation of the control system of a shunting locomotive with technical vision / I. B. Shubinsky, E. N. Rozenberg, I. A. Panferov [et al.] // Reliability. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 30–37. – DOI 10.21683/1729-2646-2023-23-1-30-37.

A. S. Filipchenko

APPLICATION OF A NEW METHOD OF IMAGE COMPRESSION IN THE MACHINE VISION SYSTEMS

Abstract. Robotic process automation systems are widely used in the tasks of a number of modern computing centers. The Russian robotic process automation platform “RPA Robin” has proven itself well, including in the field of automation of administration of a whole class of railway transport information systems. The emerging growth in the number of information systems managed and administered by software robots imposes limitations on the RAM resource of terminal servers. This paper proposes a way to reduce RAM consumption by terminal servers of software robotics in computing centers by applying a new specialized method of lossy image compression.

Keywords: message redundancy, digital image processing, machine vision, data compression, RPA, RAM.

For citation: Filipchenko, A. S. Application of a new method of image compression in the machine vision systems / A. S. Filipchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 43–52. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_43.

Сведения об авторах

Филипченко Александр Сергеевич
Главный вычислительный центр – филиал
ОАО «Российские железные дороги»,
отдел корпоративных систем управления
производством,
технолог I категории,
e-mail: filipchenkoas@gvc.rzd.ru

Information about the authors

Filipchenko Aleksandr Sergeevich
Main Computing Center – branch of JSC “Russian
Railways”, Department of Corporate Production
Management Systems,
Senior Technologist,
e-mail: filipchenkoas@gvc.rzd.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 656.022

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_53

*Д. В. Кузьмин***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ПУТИ В ГРАФАХ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ
ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Аннотация. Рассмотрен вопрос применимости алгоритмов Дейкстры, A^* и поиска в ширину для решения задач поиска пути в средах с препятствиями. Данные алгоритмы могут быть использованы при решении задач пространственного развития линейных объектов наземной транспортной инфраструктуры.

С алгоритмами проведена серия простых экспериментов с целью определения количественных показателей их асимптотической сложности, т. е. количества выполняемых операций и времени выполнения алгоритма в условиях поиска пути в средах с препятствиями. Серия экспериментов имеет различную конфигурацию, определяемую направленностью поиска (однонаправленный и двунаправленный), способом прохода ячеек (прямой и смешанный) и вариантом алгоритма поиска. При рассмотрении алгоритма A^* в качестве дополнительного параметра, конфигурирующего работу алгоритма, были использованы различные метрики – расстояния Чебышева, манхэттенское, евклидово.

Ключевые слова: алгоритмы поиска пути, алгоритм Дейкстры, алгоритм A^* , алгоритм поиска в ширину, трассирование, пространственное развитие транспортной инфраструктуры, транспортные системы, теория графов.

Для цитирования: Кузьмин, Д. В. Использование различных алгоритмов поиска пути в графах для решения задач пространственного развития транспортной инфраструктуры / Д. В. Кузьмин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 53–63. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_53.

Введение

Пространственное развитие транспортной инфраструктуры является фундаментальной задачей организации работы и функционирования транспортных систем. Значительная часть подходов к решению данной задачи сводится к декомпозиции рассматриваемого полигона на отдельные территориальные единицы, совокупность которых в дальнейшем рассматривается как граф. Совокупность рассматриваемых отдельных территориальных единиц, не имеющая разрывов и наложений, представляет собой растровую пространственную модель.

Под растровым моделированием пространственных данных понимают способ цифрового описания пространственных объектов и топологических отношений между ними. Описание выполняется с помощью регулярных и нерегулярных сеток, покрывающих рассматриваемый полигон. Сетка делит рассматриваемый полигон на дискретные ячейки – отдельные территориальные единицы (ОТЕ). При решении геоинформационных задач чаще используются регулярные (постоянные) сетки, в которых все ОТЕ имеют одинаковый размер, форму и т. д. Все ОТЕ содержат одинаковый набор параметров, характеризующих их пространственные свойства, т. н. атрибутивные данные, которые могут содержать информацию о топологических, гидрографических, антропогеографических и других свойствах пространства. Соединение центроидов ОТЕ образует граф.

Основная часть

Растровые сетки широко используются для решения геоинформационных задач поиска пути, например для трассировок трубопроводов [1, 2], автомобильных дорог [3, 4], железных дорог [3, 5], линий электропередач [6, 7]. Логика использования растровых сеток в этом случае заключается в присвоении всем ОТЕ одинакового набора пространственных данных – т. н. атрибутов. Анализируя различными методами распределение значений атрибутов ОТЕ, исследователь может определить наилучший маршрут в рамках существующей инфраструктуры или оптимальное пространственное развитие трассы.

Растровые модели поиска имеют слабые стороны. По причине графового представления пространства (абстракция узлов и связей) возникают неизбежные искажения трассировки: например, трасса может оказаться избыточно длинной или содержать множество геометрических несовершенств.

Это приводит к получению нереалистичных результатов определения пространственного развития трассы. Подробно данная проблематика рассмотрена в работе [8]. В частности, отмечается, что одномерный граф является приближением к бесконечному числу трассировок в рамках рассматриваемой области пространства, поэтому неизбежны фактические расхождения между расчетной и реальной трассой. Путь, прокладываемый в растровом пространстве, имеет дискретный шаг, определяемый в том числе геометрическими свойствами формы ОТЕ. Это приводит к неизбежным удлиннениям и геометрическим несовершенствам трассы. Особенно явно эти негативные эффекты проявляются в неоднородных растровых пространствах. По причине существенной разницы количественных показателей атрибутивных данных путь подвержен частым изменениям направления, тогда как в условиях однородности раstra данные искажения менее выражены [9].

Использование алгоритмов поиска в пространствах, содержащих препятствия

При формировании дискретного пространства часть отдельных территориальных единиц может потенциально не подходить для трассирования, а следовательно, должна быть исключена из рассмотрения. Причины для такого исключения могут быть самыми разнообразными. Например, отдельная территориальная единица может принадлежать природоохранной зоне, покрывать сложный гидрографический объект, содержать военные объекты и прочее.

Процесс исключения неперспективных ячеек может быть выполнен двумя путями: явно, т. е. через удаление непригодных ячеек (соответствующих вершин и ребер графа), или через функцию стоимости. Опишем формально процесс исключения неперспективных для трассирования ячеек из рассмотрения.

Представим дискретное пространство рассматриваемого полигона в виде графа $G = (V, E)$, где V – множество вершин, E – множество ребер. Каждая ячейка v пространства является отдельной территориальной единицей $v \in V$, находящейся в окружении множества соседних ячеек $A(v)$. Данное множество напрямую зависит от типа связности, т. е. может содержать 4 или 8 ячеек (возможны и иные варианты связности). Каждая ячейка v имеет числовой рейтинг $R(v)$, отражающий ее пригодность для трассирования. Часть ячеек (вершин графа), непригодных для трассирования, представляет множество $U \subset V$. Стартовая и целевая ячейки – соответственно S и T .

Множество исключенных из рассмотрения ячеек U определяется заранее на основе анализа исследуемого пространства, например, с помощью анализа ГИС данных:

$$U = \{v \in V \mid \text{ячейка } v \text{ непригодна для посещения}\}$$

После формирования множества U возможны несколько вариантов исключения.

Неявное исключение заключается в модификации функции стоимости перехода между ячейками. Для того чтобы алгоритм избегал посещения таких ячеек, стоимость их посещения должна быть принципиально большой.

$$c(u, v) = \begin{cases} \infty, & \text{если } v \in U, \\ f(R(u), R(v), d(u, v)), & \text{если } v \notin U, \end{cases}$$

где $d(u, v)$ – расстояние между ячейками u и v , определенное какой-либо метрикой, например евклидовой; $f(R(u), R(v), d(u, v))$ – функция, определяющая стоимость перехода в зависимости от рейтингов ячеек и расстояния между ними.

Если специфика задачи предполагает работу с графом, взвешенным по вершинам, то необходимо определение функции $p: V \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$, назначающей штраф каждой вершине, принадлежащей множеству исключенных вершин U .

$$p(v) = \begin{cases} M, & \text{если } v \in U, \\ 0, & \text{если } v \notin U, \end{cases}$$

где M – большое положительное число, явно превышающее суммарную стоимость любого разумного пути. Если специфика задачи требует градации степени запрета на посещение ячейки, то размер штрафа может быть различным. Например, размеры штрафа для природоохранных зон и зон со сложными геологическими условиями могут существенно отличаться. Поскольку природные заповедники, национальные парки, природные парки и памятники природы относятся к особо охраняемым природным территориям федерального значения, на использование земельных участков и водных объектов в границах их охранных зон [10], в том числе строительство наземной транспортной инфраструктуры, существуют строгие ограничения. Следовательно, отдельные территориальные единицы, содержащие

такие объекты, должны иметь полный запрет на рассмотрение алгоритмом. В случае сложных геологических условий величина штрафа может быть ниже, так как трассирование в рамках такой отдельной территориальной единицы возможно, но требует дополнительных затрат, например, связанных с осушением болот, объемными подготовительными работами и проч.

В случае если решение задачи требует использования различных штрафов к посещению ячейки при работе алгоритма, то необходимо использовать различные значения M для соответствующих подмножеств U .

Теперь функция веса вершины должна помимо рейтинга самой вершины содержать штраф:

$$w'(v) = w(v) + p(v),$$

где $w'(v)$ – модифицированный вес вершины v .

Стоимость перехода между вершинами u и v определяется функцией $c(u, v)$ и зависит от весов соответствующих вершин и расстояния между ними:

$$c(u, v) = g(w'(u), w'(v), d(u, v)),$$

где $d(u, v)$ – расстояние между ячейками u и v . В случае если граф взвешен по вершинам и не имеет весов ребер данное расстояние принимается равным единице $d(u, v) = 1$ для всех существующих ребер пары u и v . В противном случае $d(u, v) = \infty$. Если же ребра взвешены, то расстояние $d(u, v)$ принимается равным весу соответствующего ребра пары u и v ;

g – функция, определяющая стоимость перехода, которая может быть представлена в виде суммы модифицированных весов вершин:

$$g(w'(u), w'(v), d(u, v)) = w'(u) + w'(v).$$

С учетом расстояния:

$$g(w'(u), w'(v), d(u, v)) = w'(u) + w'(v) + d(u, v).$$

Важно, чтобы g не была отрицательной. После модификации функции стоимости алгоритм поиска пути может быть запущен на соответствующем графе.

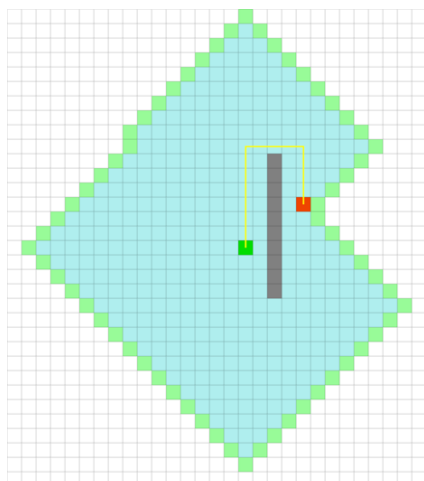
Таким образом, неявное исключение ячеек заключается в добавлении штрафа к весу (рейтингу) вершины. Так как величина штрафа может существенно превышать суммарную стоимость любого возможного пути в рамках рассматриваемого графа, алгоритм поиска вынужден избегать посещения данных ячеек при наличии соответствующих альтернатив.

Поведение различных алгоритмов для поиска пути в рамках пространств, содержащих препятствия, имеет отличия. Проведем серию экспериментов для сравнения различных алгоритмов на предмет пространственной и временной сложности выполнения.

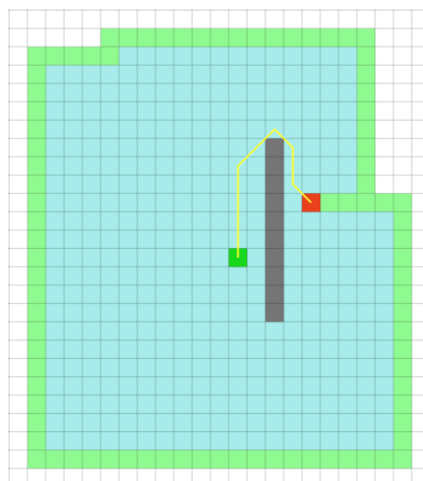
На рассматриваемое ранее поле добавим линейное препятствие между вершинами старта и финиша. Конфигурация эксперимента определяется вариантами реализации поиска (однаправленный, двунаправленный) и возможностью пересечения ячейки (прямое, смешанное). Визуализация результатов экспериментов с алгоритмом поиска в ширину представлена на рис. 1.

Очевидно, что появление единственного препятствия потребовало от алгоритма выполнения значительно большего числа операций. Сравним результаты проведенных экспериментов с результатами, полученными ранее при использовании алгоритма в условиях среды, не имеющей препятствий. Для удобства восприятия обобщим результаты в виде столбиковой диаграммы, представленной на рис. 2.

Наличие препятствий напрямую определяет количество выполняемых операций, а следовательно, и потребляемых вычислительных мощностей. Связано это в первую очередь с тем, что, обходя препятствие, находящееся на пути к целевой ячейке, алгоритм выполняет множество избыточных вычислений. Это обусловлено в первую очередь отсутствием эвристики. Каждая итерация основного цикла увеличивает радиус фронта поиска на ячейку. Таким образом, пока поиск уперся в препятствие и фактически фронт поиска не двигается в сторону целевой вершины, алгоритм вынужден с каждым шагом перебирать значительное количество бесперспективных для итогового пути ячеек. Более наглядно данный эффект проявляется на конфигурациях с однонаправленной реализацией поиска. В данных вариантах центр пространственного развития поискового фронта имеет явное смещение от стартового узла в сторону противоположную вершине поиска, так как между исходным узлом и узлом назначения имеется препятствие. Данный эффект прослеживается и при использовании алгоритма Дейкстры (рис. 3).

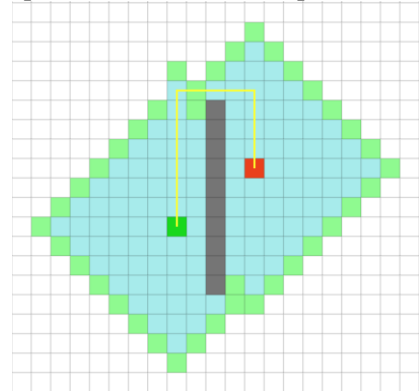
 a

Длина пути – 15 ед., количество операций:
812, время выполнения алгоритма: 0,6 мс



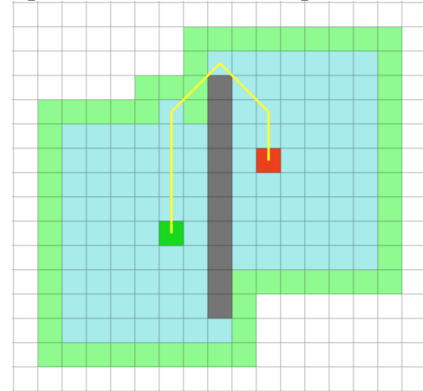
6

Длина пути – 12,66 ед., количество операций:
856, время выполнения алгоритма: 1,4 мс



6

Длина пути – 15 ед., количество операций:
284, время выполнения алгоритма: 0,2 мс



2

Длина пути – 12,66 ед., количество операций:
277, время выполнения алгоритма: 0,4 мс

Рис. 1. Визуализация результатов экспериментов по использованию алгоритма поиска в ширину в средах с препятствиями:

a – однонаправленный поиск, прямой проход ячеек; b – однонаправленный поиск, смешанный проход ячеек; v – двунаправленный поиск, прямой проход ячеек; z – двунаправленный поиск, смешанный проход ячеек

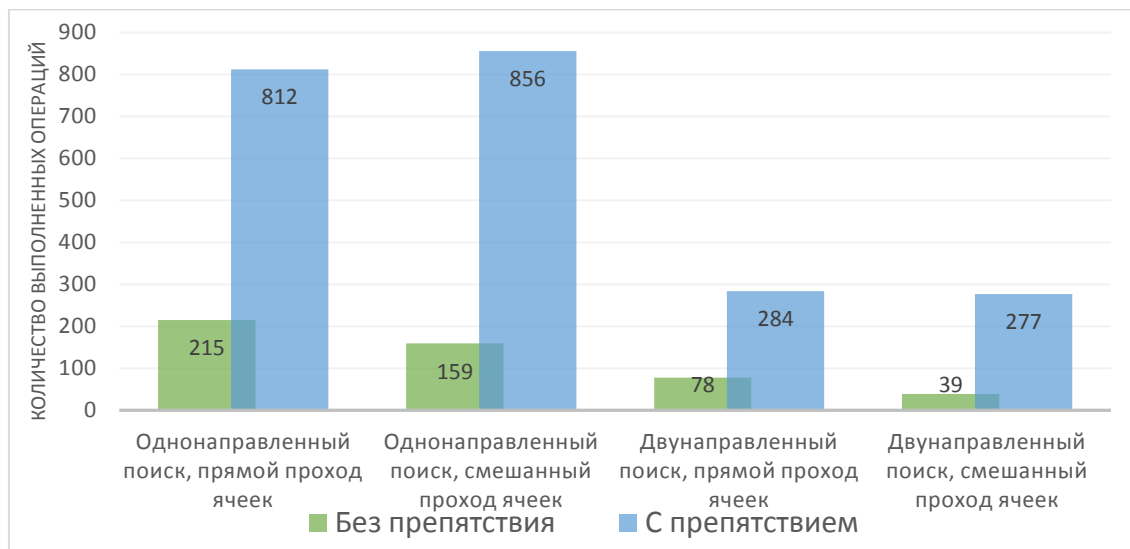
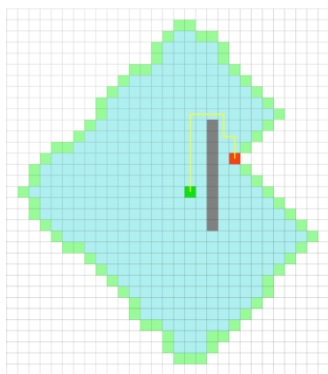
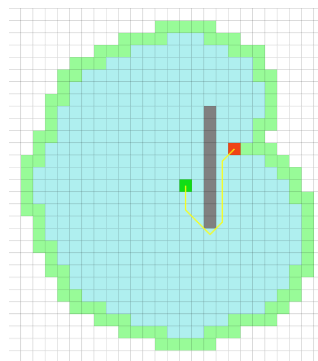


Рис. 2. Результаты экспериментов по использованию алгоритма поиска в ширину в различных средах с наличием и отсутствием препятствий



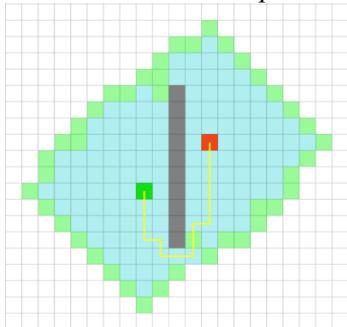
а

Длина пути – 15 ед., количество операций: 816, время выполнения алгоритма: 0,6 мс



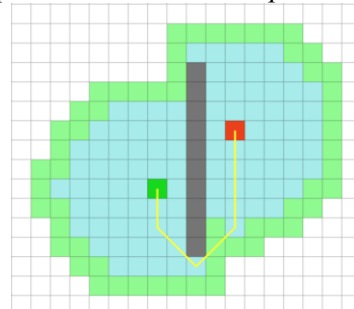
б

Длина пути – 12,66 ед., количество операций: 867, время выполнения алгоритма: 1,1 мс



в

Длина пути – 15 ед., количество операций: 300, время выполнения алгоритма: 0,4 мс



г

Длина пути – 12,66 ед., количество операций: 257, время выполнения алгоритма: 0,3 мс

Рис. 3. Визуализация результатов экспериментов по использованию алгоритма Дейкстры в средах с препятствиями:

а – односторонний поиск, прямой проход ячеек; б – односторонний поиск, смешанный проход ячеек; в – двусторонний поиск, прямой проход ячеек; г – двусторонний поиск, смешанный проход ячеек

По аналогии с поиском в ширину обобщим полученные результаты в виде диаграммы, сравним беспрепятственный поиск и поиск с наличием препятствий двух алгоритмов (рис. 4, табл. 1).



Рис. 4. Сравнение результатов экспериментов с алгоритмами в различной конфигурации поиска по показателю «Количество выполняемых операций»

Таблица 1

Сравнение асимптотической сложности алгоритмов поиска в ширину и Дейкстры по результатам проведенных экспериментов, показатель «Количество выполняемых операций»

Конфигурация поиска	Алгоритм поиска в ширину		Алгоритм Дейкстры		Сравнительный результат использования алгоритма Дейкстры относительно поиска в ширину		Увеличение количества операций при появлении препятствий, кратность	
	без препятствий	с препятствиями	без препятствий	с препятствиями	без препятствий	с препятствиями	Поиск в ширину	Дейкстры
Однонаправленный прямой	215	812	232	816	+7,9 %	+0,5 %	3,78	3,52
Однонаправленный смешанный	159	856	205	867	+28,9 %	+1,3 %	5,38	4,23
Двунаправленный прямой	78	284	86	300	+10,3 %	+5,6 %	3,64	3,49
Двунаправленный смешанный	57	277	59	257	+3,5 %	−7,2 %	7,1	4,36

Наиболее контрастная разница наблюдается именно в сравнении условий поиска, а не используемых алгоритмов. Можно уверенно заключить, что препятствия значительно увеличивают вычислительную сложность поиска для всех конфигураций, особенно в случае двунаправленного поиска со смешанным проходом ячеек.

Оба алгоритма показывают практически одинаковое покрытие исследуемой области в рамках соответствующих конфигураций эксперимента, однако в условиях наличия препятствий алгоритм Дейкстры требует выполнения немного большего количества операций, особенно в конфигурации с однонаправленным поиском. В условиях с наличием препятствий, напротив, алгоритм Дейкстры немного более эффективен, особенно для двунаправленного поиска со смешанным проходом ячеек. Тем не менее очевидно, что разница между используемыми алгоритмами в данном контексте минимальна.

В первую очередь это обусловлено отсутствием эвристики при выполнении поиска. Фактически поиск данными алгоритмами осуществляется вслепую, что вынуждает в обоих случаях проводить исследование областей, явно не имеющих потенциала для трассирования наиболее благоприятного пути (см. рис. 1, 3, 4).

Для определения степени влияния эвристики на поиск пути в средах с препятствиями проведем серию экспериментов с алгоритмом поиска A*. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.

Сравним полученные результаты, обобщив данные в рамках диаграммы, представленной на рис. 6 и в табл. 2.

Сравнение различных эвристик поиска позволяет заключить, что при смешанном проходе ячеек без препятствий эвристики манхэттенского и евклидова расстояния показывают примерно одинаковые результаты по количеству выполняемых операций и имеют небольшое преимущество перед расстоянием Чебышева. При смешанном проходе ячеек евклидово расстояние показывает наилучшие результаты и является наиболее предпочтительной функцией. Наличие препятствий немного меняет картину предпочтений эвристической функции. В этом случае при смешанном и прямом проходах наилучшим вариантом функции является манхэттенское расстояние. Таким образом, наименее эффективной метрикой является расстояние Чебышева.

СМЕШАННЫЙ (ДИАГОНАЛЬНО-ПРЯМОЙ) ПРОХОД ЯЧЕЕК

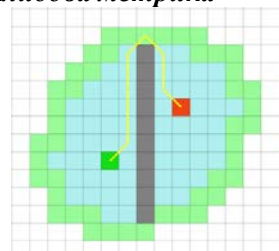
Евклидова метрика

Манхэттенское расстояние

Расстояние Чебышева

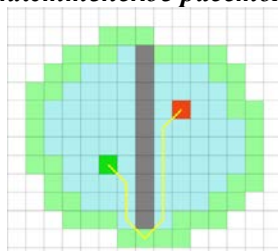
Двухнаправленный поиск

а



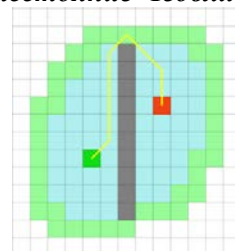
Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
175, время выполнения
алгоритма: 0,5 мс

б



Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
182, время выполнения
алгоритма: 0,4 мс

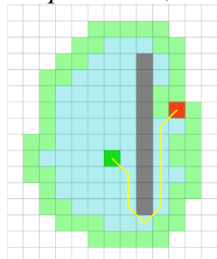
в



Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
167, время выполнения
алгоритма: 0,5 мс

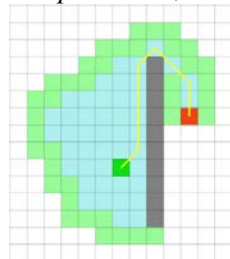
Однонаправленный поиск

г



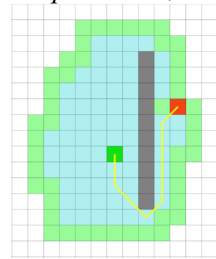
Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
177, время выполнения
алгоритма: 0,5 мс

д



Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
132, время выполнения
алгоритма: 0,3 мс

е



Длина пути – 12,66 ед.,
количество операций:
190, время выполнения
алгоритма: 2,4 мс

ПРЯМОЙ ПРОХОД ЯЧЕЕК

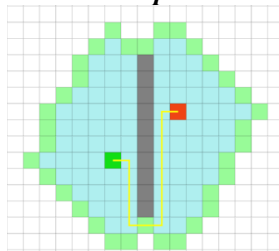
Евклидова метрика

Манхэттенское расстояние

Расстояние Чебышева

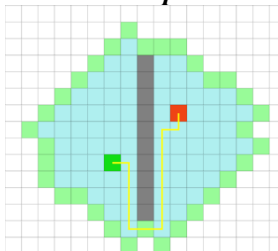
Двухнаправленный поиск

ж



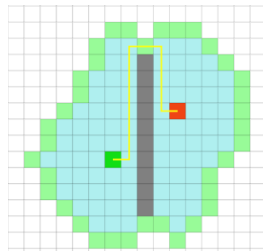
Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 218,
время выполнения алго-
ритма: 0,5 мс

з



Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 200,
время выполнения алго-
ритма: 0,4 мс

и



Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 222,
время выполнения алго-
ритма: 0,5 мс

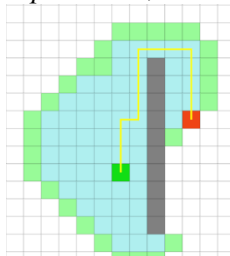
Однонаправленный поиск

к



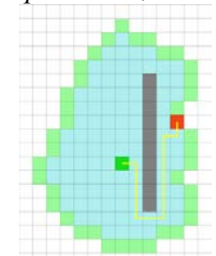
Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 213,
время выполнения алго-
ритма: 0,6 мс

л



Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 153,
время выполнения алго-
ритма: 0,3 мс

м



Длина пути – 15 ед., ко-
личество операций: 236,
время выполнения алго-
ритма: 0,4 мс

Рис. 5. Визуализация результата поиска пути алгоритмом А* в средах с препятствиями:
зеленая и красная ячейки – соответственно стартовый и целевой узлы; ячейки светло-зеленого цвета
– рассматриваемые в рамках текущей итерации; ячейки голубого цвета – множество посещенных
вершин; ячейки серого цвета – препятствия.

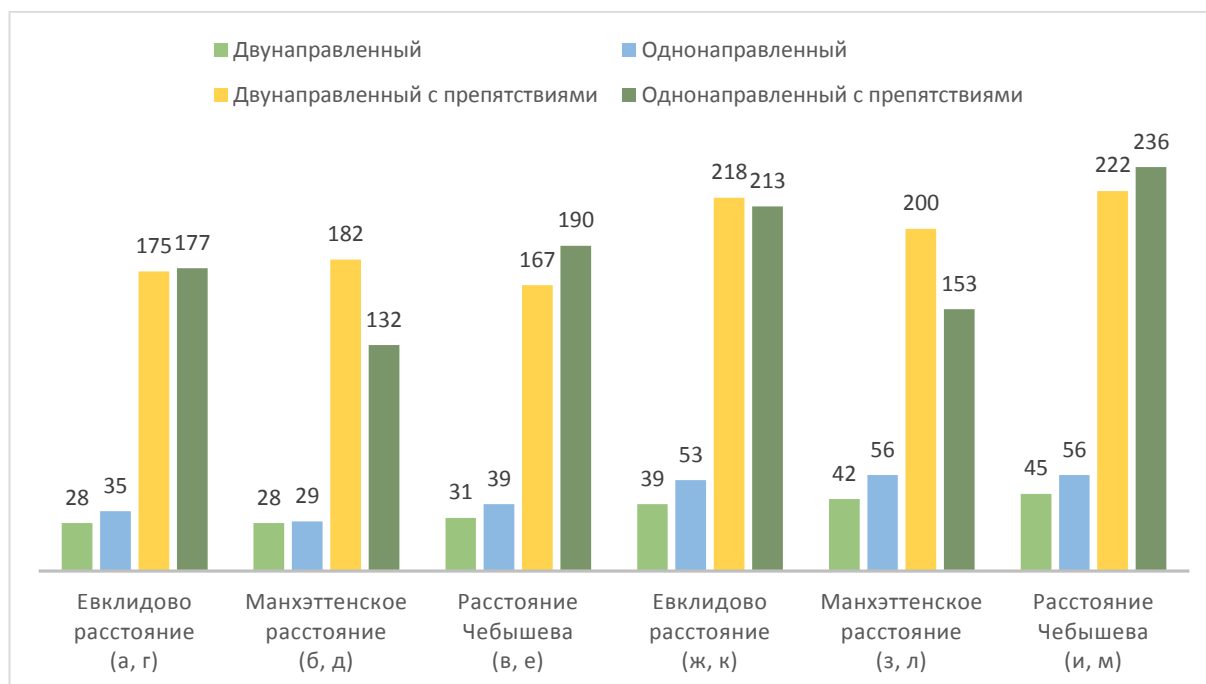


Рис. 6. Сравнение результатов экспериментов с алгоритмом А* в различной конфигурации поиска, в условиях отсутствия и наличия препятствий, по показателю «Количество выполняемых операций»:

а–е – смешанный проход ячеек; *ж–м* – прямой проход ячеек

Таблица 2

Сравнение асимптотической сложности алгоритмов А* по результатам проведенных экспериментов, показатель «Количество выполняемых операций»

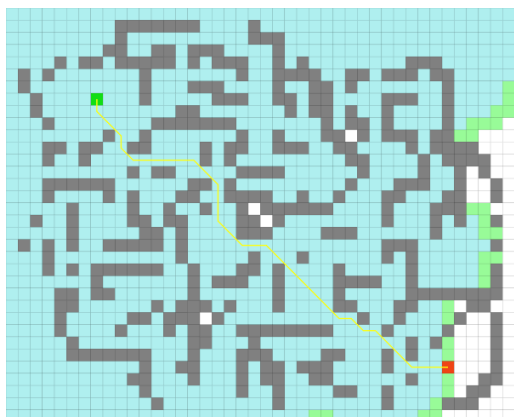
Эвристика (Е – евклидово расстояние, М – манхэттенское расстояние, Ч – расстояние Чебышева)	Проход ячеек (С – смешанный, П – прямой)	Направленность поиска (О – однонаправленный, Д – двунаправленный)	Наличие препятствий в среде поиска		Влияние препятствий (увеличение количества выполняемых операций в среде с наличием препятствий относительно свободной среды, кратность)
			без препятствий	с препятствиями	
Е	С	Д	28	175	6,25
М	С	Д	28	182	6,5
Ч	С	Д	31	167	5,39
Е	С	О	35	177	5,06
М	С	О	29	132	4,55
Ч	С	О	39	190	4,87
Е	П	Д	39	218	5,59
М	П	Д	42	200	4,76
Ч	П	Д	45	222	4,93
Е	П	О	53	213	4,02
М	П	О	56	153	2,73
Ч	П	О	56	236	4,21

Результаты эксперимента выявили большую эффективность смешанного прохода ячеек в сравнении с прямым, так как всегда первый требует меньшего количества выполняемых операций независимо от используемой метрики, направленности поиска, наличия или отсутствия препятствий в среде поиска. Аналогичный вывод можно сделать и в отношении двунаправленного поиска, который показал значительно большую эффективность при всех конфигурациях эксперимента.

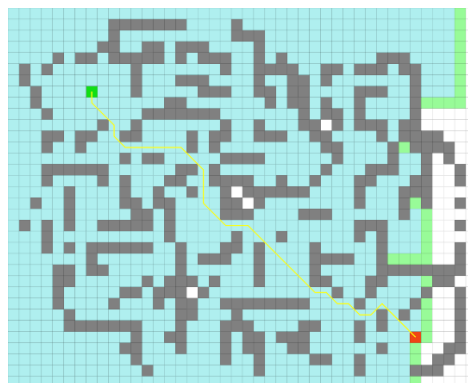
Выводы

В качестве общего вывода можно заключить, что наличие препятствий значительно усложняет поиск пути, кратно увеличивая количество выполняемых операций.

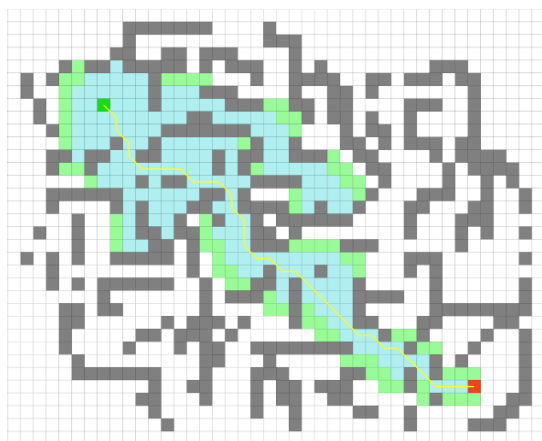
Стоит отметить, что при рассмотрении больших сред со сложной структурой препятствий получаемые результаты могут иметь более контрастные отличия и значительно нагляднее отражать эффективность того или иного алгоритма или метрики в рамках различных условий поиска (рис. 7).



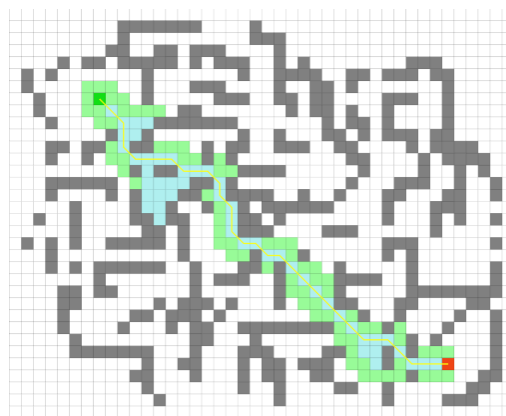
Алгоритм Дейкстры. Однонаправленный поиск, диагональный проход ячеек. Длина пути – 41,04 ед., количество операций: 2140, время выполнения алгоритма: 3,3 мс



Поиск в ширину. Однонаправленный поиск, диагональный проход ячеек. Длина пути – 41,87 ед., количество операций: 2028, время выполнения алгоритма: 1,7 мс



Алгоритм A*. Евклидово расстояние, однонаправленный поиск, диагональный проход ячеек. Длина пути – 41,04 ед., количество операций: 440, время выполнения алгоритма: 1,2 мс



Алгоритм A*. Манхэттенское расстояние, однонаправленный поиск, диагональный проход ячеек. Длина пути – 41,04 ед., количество операций: 178, время выполнения алгоритма: 1,5 мс

Рис. 7. Визуализация результата поиска различными алгоритмами в средах с препятствиями: зеленая и красная ячейки – соответственно, стартовый и целевой узлы; ячейки светло-зеленого цвета – рассматриваемые в рамках текущей итерации; ячейки голубого цвета – множество посещенных вершин; ячейки серого цвета – препятствия

Таким образом, алгоритм A* показывает себя лучше, чем алгоритм Дейкстры и поиск в ширину, поскольку требует значительно меньше операций и выполняется быстрее. В контексте проведенных экспериментов алгоритм A* с евклидовым расстоянием является самым быстрым, а A* с манхэттенским расстоянием требует наименьшего количества операций.

Список литературы

- 1 **Erdinç, A. İ.** Automatic Pipeline Route Design with Multi-Criteria Evaluation Based on Least-Cost Path Analysis and Line-Based Cartographic Simplification: A Case Study of the Mus Project in Turkey / Ali İhsan Erdinç Örsan Ünal, Cevdet Coşkun Aydın // International Journal of Geo-Information (IJGI). – 2019. – Vol. 8 (4), No. 173. – DOI 10.3390/ijgi8040173.
- 2 **Kang, J. Y.** Optimisation of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and Laplacian smoothing / J. Y. Kang, B. Lee // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2017. – Vol. 9. – DOI 10.3390/ijgi8040173.
- 3 **Scaparra, M. P.** Corridor location: the multi-gateway shortest path / M. P. Scaparra, R. L. Church, F. A. Medrano // Journal of Geographical Systems. – 2014. – Vol. 16, No. 3. – P. 287–309. – DOI 10.1007/s10109-014-0197-8.
- 4 **Yu, C.** Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning / C. Yu, J. Lee, M. Munro-Stasiuk // International Journal of Geographical Information Science. – 2003. – Vol. 17. – DOI 10.1080/1365881031000072645.
- 5 Path selection by topographic analysis: vector re-classification versus raster fuzzification as spatial multi-criteria using cost-path / A. A. Jamali, A. Esmailian, S. Mokhtarisabet, S. He // Spatial Information Research. – 2023. – Vol. 31. – DOI 10.1007/s41324-023-00539-9.
- 6 **Stefano, B.** Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts / B. Stefano, G. Davide, O. Francesco // Environmental Impact Assessment Review. – 2011. – Vol. 31, No. 3. – P. 234–239. – DOI 10.1016/j.eiar.2010.10.003.
- 7 GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization / C. Monteiro, I. Ramírez-Rosado, V. Miranda [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20. – P. 934–942. – DOI 10.1109/TPWRD.2004.839724.
- 8 **Antikainen, H.** Comparison of different strategies for determining raster-based least-cost paths with a minimum amount of distortion / H. Antikainen // Transactions in GIS. – 2013. – Vol. 17. – DOI 10.1111/j.1467-9671.2012.01355.x.
- 9 **Tomlin, D. C.** Propagating radial waves of travel cost in a grid / Dana C. Tomlin // International Journal of Geographical Information Science. – 2010. – Vol. 24, Iss. 9. – P. 1391–1413.

References

- 1 **Erdinç, A. İ.** Automatic Pipeline Route Design with Multi-Criteria Evaluation Based on Least-Cost Path Analysis and Line-Based Cartographic Simplification : A Case Study of the Mus Project in Turkey / Ali İhsan Erdinç Örsan Ünal, Cevdet Coşkun Aydın // International Journal of Geo-Information (IJGI). – 2019. – Vol. 8 (4), No. 173. – DOI 10.3390/ijgi8040173.
- 2 **Kang, J. Y.** Optimisation of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and Laplacian smoothing / J. Y. Kang, B. Lee // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2017. – Vol. 9. – DOI 10.3390/ijgi8040173.
- 3 **Scaparra, M. P.** Corridor location: the multi-gateway shortest path / M. P. Scaparra, R. L. Church, F. A. Medrano // Journal of Geographical Systems. – 2014. – Vol. 16, No. 3. – P. 287–309. – DOI 10.1007/s10109-014-0197-8.
- 4 **Yu, C.** Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning / C. Yu, J. Lee, M. Munro-Stasiuk // International Journal of Geographical Information Science. – 2003. – Vol. 17. – DOI 10.1080/1365881031000072645.
- 5 Path selection by topographic analysis: vector re-classification versus raster fuzzification as spatial multi-criteria using cost-path / A. A. Jamali, A. Esmailian, S. Mokhtarisabet, S. He // Spatial Information Research. – 2023. – Vol. 31. – DOI 10.1007/s41324-023-00539-9.
- 6 **Stefano, B.** Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts / B. Stefano, G. Davide, O. Francesco // Environmental Impact Assessment Review. – 2011. – Vol. 31, No. 3. – P. 234–239. – DOI 10.1016/j.eiar.2010.10.003.
- 7 GIS Spatial Analysis Applied to Electric Line Routing Optimization / C. Monteiro, I. Ramírez-Rosado, V. Miranda [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20. – P. 934–942. – DOI 10.1109/TPWRD.2004.839724.
- 8 **Antikainen, H.** Comparison of different strategies for determining raster-based least-cost paths with a minimum amount of distortion / H. Antikainen // Transactions in GIS. – 2013. – Vol. 17. – DOI 10.1111/j.1467-9671.2012.01355.x.
- 9 **Tomlin, D. C.** Propagating radial waves of travel cost in a grid / Dana C. Tomlin // International Journal of Geographical Information Science. – 2010. – Vol. 24, Iss. 9. – P. 1391–1413.

– DOI 10.1080/13658811003779152.

10 Федеральный закон от 14.03.1995 № 33-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «Об особо охраняемых природных территориях» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025). Статья 2. Категории особо охраняемых природных территорий, особенности их создания и развития // КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6072/ce98ed9bc2fc35acee2232585948a2b4bc927850 (дата обращения: 26.03.2025).

– DOI 10.1080/13658811003779152.

10 Federal Law No. 33-FZ of 03/14/1995 (as amended on 08/08/2024) “On Specially Protected Natural Territories” (as amended and supplemented, effective from 03/01/2025). Article 2. Categories of specially protected natural territories, peculiarities of their creation and development // ConsultantPlus. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6072/ce98ed9bc2fc35acee2232585948a2b4bc927850 (date of access: 03/26/2025).

D. V. Kuzmin

THE USE OF VARIOUS ALGORITHMS FOR FINDING PATHS IN GRAPHS TO SOLVE PROBLEMS OF SPATIAL DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Abstract. The question of the applicability of the Dijkstra algorithm, A* and Breadth-first search for solving pathfinding problems in environments with obstacles is considered. These algorithms can be used to solve problems of spatial development of linear objects of land transport infrastructure.

A series of simple experiments were conducted with the algorithms in order to quantify their asymptotic complexity, i.e. the number of operations performed and the execution time of the algorithm in conditions of pathfinding in environments with obstacles. The series of experiments has a different configuration, determined by the direction of the search (unidirectional and bidirectional) and the method of cell passage (direct and mixed) and a variant of the search algorithm. When considering the A* algorithm, various metrics such as Chebyshev, Manhattan, and Euclidean distances were used as an additional parameter configuring the algorithm's operation.

Keywords: pathfinding algorithms, Dijkstra's algorithm, A* algorithm, Breadth-first search algorithm, tracing, spatial development of transport infrastructure, transport systems, graph theory.

For citation: Kuzmin, D. V. The use of various algorithms for finding paths in graphs to solve problems of spatial development of transport infrastructure / D. V. Kuzmin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 53–63. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_53.

Сведения об авторах

Кузьмин Дмитрий Владимирович
Российский университет транспорта
(РУТ МИИТ),
кафедра «Логистика и управление
транспортными системами»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kuzminmiit@yandex.ru

Information about the authors

Kuzmin Dmitry Vladimirovich
The Russian University of Transport (RUT MIIT),
Chair “Logistics and Management
of Transport Systems”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kuzminmiit@yandex.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.891 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_64

*П. Г. Иваночкин, М. М. Четверик, Е. П. Больших***ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТИФРИКЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ПТФЭ ***

Аннотация. Исследованы механические характеристики антифрикционного полимерного композиционного покрытия на основе ткани с волокном ПТФЭ. Ткань из полимерных волокон пропитывается и приклеивается к субстрату (подложке) термостойким матричным связующим холодного отверждения на основе фенилона с введенными в матричную основу модификаторами (мелкодисперсный порошок меди и масло). Механические свойства покрытий были получены в рамках микроиндентирования с помощью системы анализа *NanoTest 600* фирмы «*Micro materials Ltd*». Определялись механические характеристики экспериментальных образцов: микротвёрдость, модуль упругости, а также их вязкоупругие свойства. Показано, что использование метода инструментального индентирования может быть успешно применено для оценки механических характеристик рассматриваемого типа покрытий. Предложена методика получения кривой ползучести для оценки вязкоупругих характеристик покрытия методом непрерывного индентирования. Определен оптимальный состав модификаторов, обеспечивающих наиболее высокие твердость и модуль упругости композита.

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, ткань с волокном ПТФЭ, связующее холодного отверждения, модификаторы, механические характеристики, микротвёрдость, модуль упругости, вязкоупругие свойства.

Для цитирования: Иваночкин, П. Г. Исследование механических характеристик антифрикционного полимерного композиционного покрытия, содержащего ПТФЭ / П. Г. Иваночкин, М. М. Четверик, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025 – № 2. – С. 64–73. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_64.

Введение

В работах [1–3] была рассмотрена возможность применения нового матричного связующего для антифрикционного полимерного композиционного покрытия, способного работать в тяжелонагруженных узлах трения. В настоящей работе в качестве объекта исследования выступали антифрикционные покрытия на различных типах подложек. Отметим, что получаемые антифрикционные самосмазывающиеся покрытия являются гибридными композитами, в составе которых имеются антифрикционные нити из политетрафторэтилена (ПТФЭ), прочные полиимидные нити, которые являются основой тканого материала. Такой материал пропитывается матричным связующим и приклеивается к субстрату (подложке) [4]. Использование такого типа антифрикционных покрытий позволяет обеспечить эффективную работу узлов трения и способствует повышению эксплуатационного ресурса и минимальных потерь на трение. Отметим, что наиболее востребованным методом создания полимерных композиционных материалов, обладающих улучшенными характеристиками, является модификация полимерной матрицы различными видами наполнителей и добавок. Применение же наноразмерных частиц способствует формированию новых соединений в поверхностном слое, отличающихся повышенной износостойкостью, что особенно важно для экстремально высоких нагрузок.

С целью улучшить триботехнические свойства рассматриваемых покрытий в матричную основу вводились модификаторы (мелкодисперсный порошок меди и масло). Варьирование компонентов матричного связующего находилось в интервалах, представленных в матрице симплекс-решётчатого плана работы [1], а образцы именовались по первым буквам материала подложки (St – сталь, Lt – латунь), далее следовали значения объемных долей матричного связующего и модификаторов – масло, мелкодисперсный порошок меди.

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

Одними из важнейших характеристик материалов, определяющих их эксплуатационную долговечность и являющихся косвенными показателями их качества, являются их механические свойства. Обобщенной характеристикой механических свойств материалов является твердость. Твердость материала характеризует свойство поверхностного слоя материала сопротивляться внедрению другого, более твердого тела (индентора), при его сосредоточенном воздействии на поверхность материала [5]. Целью настоящей работы являлось определение механических характеристик экспериментальных образцов: микротвёрдость, модуль упругости, упругое восстановление, коэффициенты сопротивления упругой и пластической деформации, а также определение их вязкоупругих свойств.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовались образцы в виде пластинок размером $10 \times 10 \times 3$ мм, представляющие собой металлическое основание (подложку) с нанесенным на одну из сторон покрытием толщиной 1 мм. Использовались стальные (СТ45 – ГОСТ 1050-74) и латунные (Л63 – ГОСТ 15527-70) полоски толщиной 2 мм. Подбор материалов субстрата (подложек) выполнялся из условия их универсальности в области машиностроения и возможности оценки эффективного использования разработанного покрытия на различных металлических подложках [6]. Экспериментальное изучение механических характеристик покрытий на микроуровне проводилось с помощью системы анализа механических свойств материалов *NanoTest 600* фирмы «*Micro materials Ltd*» при максимальной нагрузке $P = 0,5 \div 20$ Н с помощью метода инструментального (непрерывного) индентирования [7]. Непрерывное индентирование представляет собой процесс внедрения индентора в исследуемый материал с непрерывной записью данных изменения нагрузки и глубины проникновения. В случае исследования полимерных покрытий применяются инденторы сферической формы. Измерения проводились сферическим индентором Al_2O_3 диаметром $D_{\text{ind}} = 6,35$ мм. При проведении эксперимента осуществляется контроль глубины проникновения индентора, она должна составлять не более 10–12 % от толщины покрытия. Такое ограничение необходимо, чтобы исключить возможность искажения характеристики покрытия вследствие влияния деформации подложки. Обработка полученных данных осуществляется автоматически, после чего строится график зависимости глубины проникновения индентора от приложенной нагрузки. По полученным экспериментальным данным с помощью сферического анализа кривых, а также метода Оливера – Фарра [8–9] рассчитываются физико-механические характеристики покрытия: микротвердость, приведенный модуль, упругое восстановление, коэффициенты сопротивления упругой и пластической деформации.

Тестовые измерения механических характеристик образца показали, что использование наномаятника не удовлетворяет условиям эксперимента, поскольку необходимо приложение большей нагрузки к индентору для продавливания образца, что влечет за собой увеличение глубины индентирования. В этой связи принято решение о проведении измерений на микромаятнике, что в свою очередь потребовало внесения конструктивных изменений в оборудование, а именно, изготовление переходника для закрепления индентора. На рис. 1 приведен чертеж разработанного переходника.

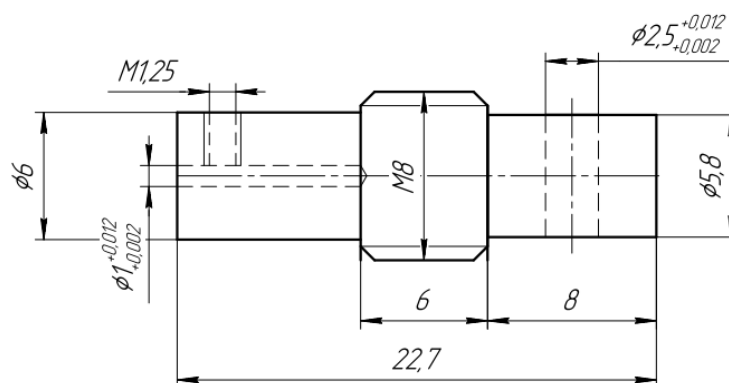


Рис. 1. Чертеж переходника для закрепления индентора на микромаятнике

Установка переходника повлекла за собой изменение конфигурации оборудования, что потребовало полной перенастройки и калибровки прибора. После проведения всех необходимых настроек были сделаны тестовые испытания на калибровочном образце из кварца для подтверждения корректности работы оборудования. Были получены искомые значения механических характеристик кварца в рамках допустимых погрешностей, что свидетельствует о надлежащей работе оборудования.

На следующем этапе проведен ряд тестовых испытаний с образцом St.86.7.7 в диапазоне нагрузок от 1 до 5 Н с целью исследования поведения материала, определения оптимальной величины усилия и контроля глубины вдавливания индентора. На рис. 2 приведен график кривых индентирования при различной приложенной нагрузке.

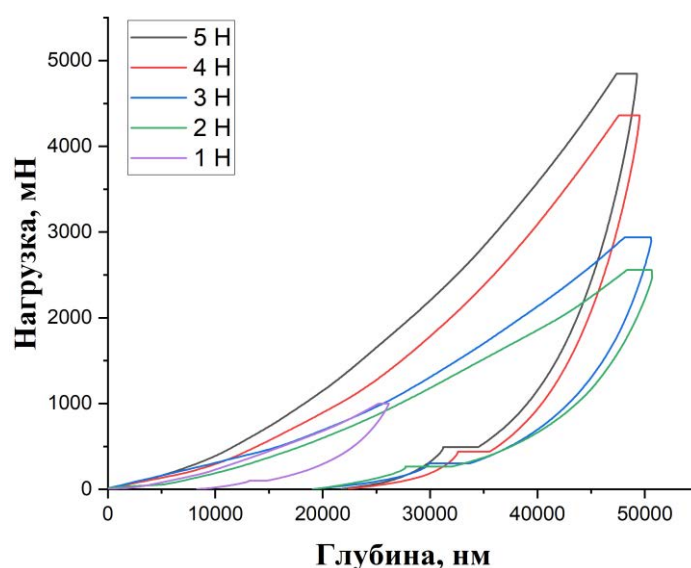


Рис. 2. Кривые индентирования для образца St.86.7.7 в диапазоне нагрузок от 1 до 5 Н

Полученные результаты позволили определить оптимальный диапазон усилий для проведения испытаний, а именно, от 1 до 2 Н. Затем для образца St.86.7.7 проделан ряд измерений при нагрузке 1 Н и различной скорости нагружения. Такой эксперимент позволяет определить порог скорости нагружения, при котором результаты незначительно отклоняются друг от друга, а на рис. 3 приведены кривые таких испытаний. На основе полученных данных выбрана скорость нагружения для проведения измерений, ее величина равна 50 мН/с.

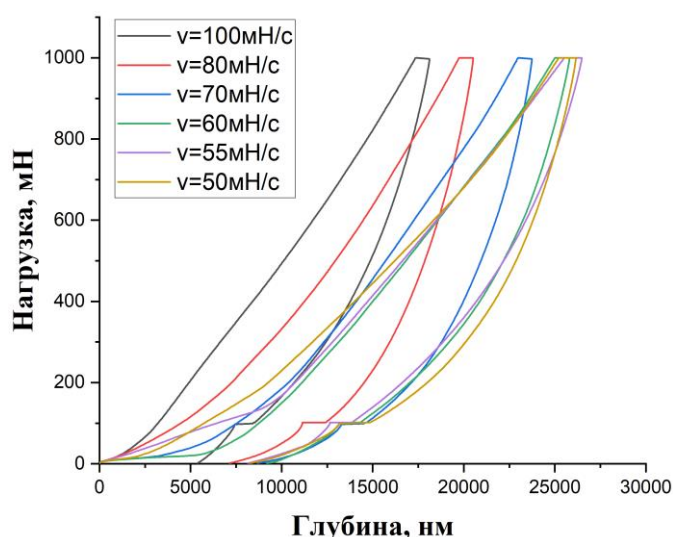


Рис. 3. Кривые индентирования для образца St.86.7.7 при нагрузке 1 Н и различных скоростях нагружения

Определение механических характеристик, исследуемых образцов заключается в проведении цикла «нагрузка – разгрузка» в 10 различных случайных точках поверхности образца. С учетом результатов тестовых испытаний максимальное усилие, прикладываемое к индентору, выбиралось равным 1 Н, скорость нарастания и убывания нагрузки – 0.05 Н/с. В процессе испытаний накладывается ограничение на максимальную глубину проникновения индентора, она не должна превышать 10 % от толщины исследуемого покрытия.

С определенными величиной нагрузки и скоростью нагружения проведены предварительные испытания образцов St.92.7.1, L.86.7.7 и L.92.7.1. Полученные кривые индентирования приведены на рис. 4.

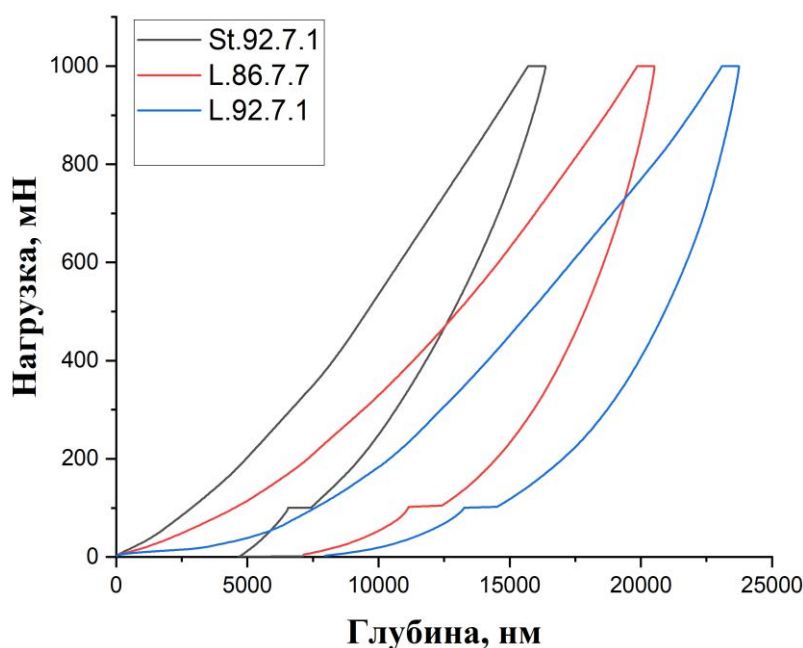


Рис. 4. Кривые индентирования для образцов St.92.7.1, L.86.7.7 и L.92.7.1 при нагрузке 1 Н и скорости нагружения 50 мН/с

Определение вязкоупругих свойств экспериментальных образцов также проводилось с помощью метода непрерывного индентирования. Однако режим индентирования в этих исследованиях включал дополнительную выдержку индентора при постоянном значении нагрузки $P_{\max} = 1\text{ Н}$. Время, при котором нагрузка не изменялась и составляла $P_{\max} = 1\text{ Н}$, обозначалось t_{hold} (с), в рамках эксперимента были приняты значения $t_{\text{hold}} = [0; 10; 30; 90; 180]$. Нагружение и разгрузка осуществлялись за одно и то же время t_l (с). Лабораторный эксперимент по определению вязкоупругих свойств композита состоял из совокупности 5 серий испытаний.

Полученные результаты подвергались статистической обработке, строилась зависимость глубины погружения от величины действующей нагрузки и определялась зависимость глубины погружения за период времени, равный времени выдержки.

Полученные данные, а именно, диаграммы индентирования $P = P(h)$, $h_{\text{срер}} = h(t)$ являлись входными данными в теоретической модели стандартного вязкоупругого тела. Восстановление вязкоупругих характеристик покрытия производилось в рамках трехзвенной модели стандартного вязкоупругого тела [10].

$$G(t) = G_{\infty} + G_l \cdot e^{-t/\tau_{\sigma}},$$

где $G(t)$ – функция релаксации, G_0 , G_{∞} – мгновенный и длительный модуль соответственно, τ_{σ} – время релаксации.

Нужно отметить, что решение прямой задачи о внедрении штампа в вязкоупругое основание было получено для изотропного приближения [10] неоднородного материала, учет гетерогенности материала покрытия можно осуществить в рамках модели Био [11, 12]. Построение решения обратной задачи было основано на соответствующем решении прямой задачи для изотропной однородной среды [10], в результате чего восстанавливались вязкоупругие характеристики покрытия. С этой целью использовался нелинейный метод наименьших квадратов, реализованный в *Matlab* при использовании комбинации генетического алгоритма и метода Нелдера – Мида [10].

Диаграммы индентирования, иллюстрирующие однородность получаемого материала покрытия образца St.92.7.1, приведены на рис. 5, а восстановленные вязкоупругие характеристики и полученные по их результатам кривые ползучести представлены на рис. 6. Скорость нагружения и разгрузки принималась равной 50 мН/с, время выдержки индентора при постоянной нагрузке

$P = P_{max}$ составляло 5 с, безразмерная величина $h^* = h \cdot 10^3$.

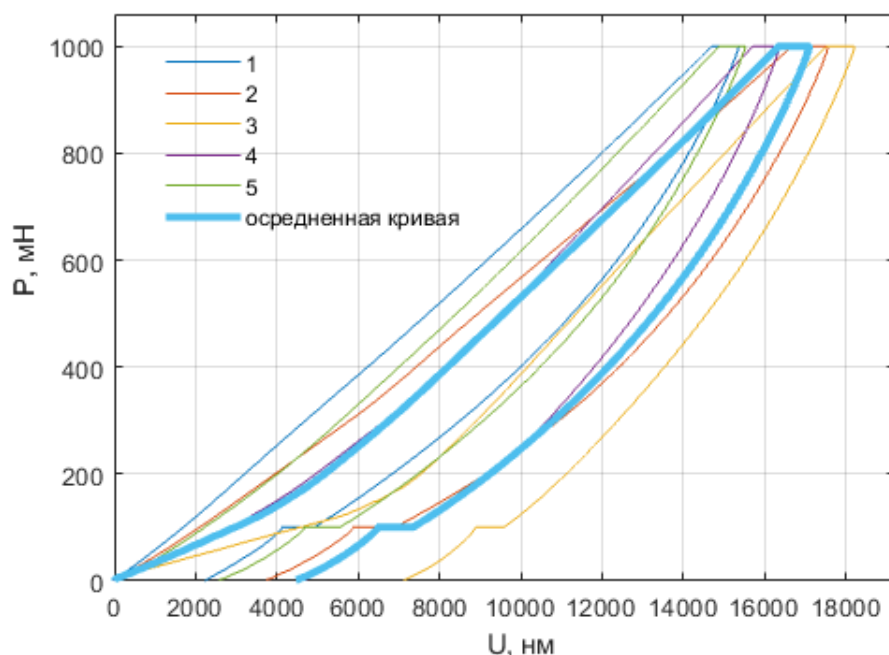


Рис. 5. Графики зависимости глубины проникновения индентора от нагрузки для образца St.92.7.1 в течение времени его выдержки при постоянной максимальной нагрузке

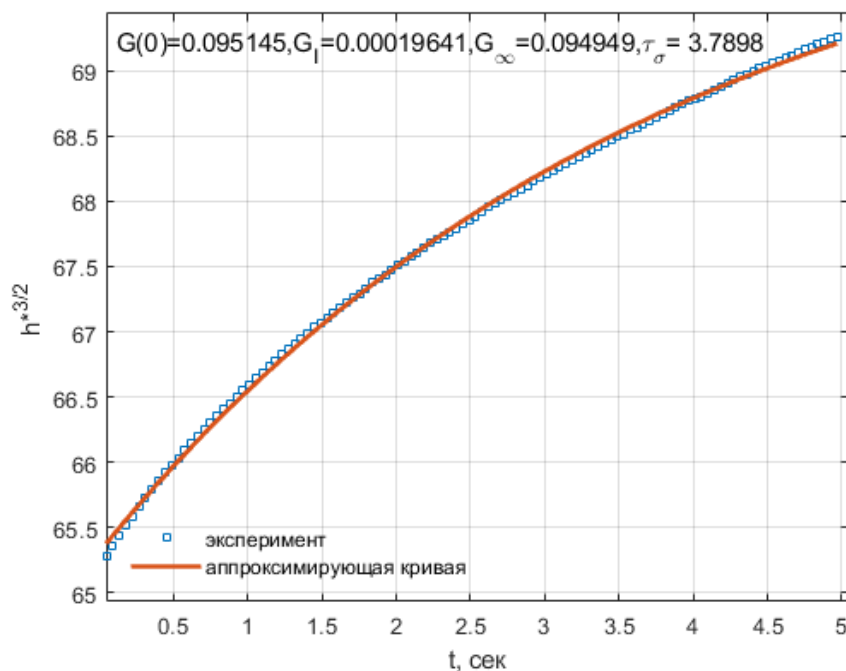


Рис. 6. Экспериментальная и теоретическая кривые ползучести для образца St.92.7.1

Результаты и их обсуждение

Состав матричного связующего является трехкомпонентной системой, части которой не изменяются независимо друг от друга, составляя 100 %. Основой разработки оптимального соотношения компонент системы является использование симплекс-решетчатых планов типа «состав – свойство» (см. рис. 7).

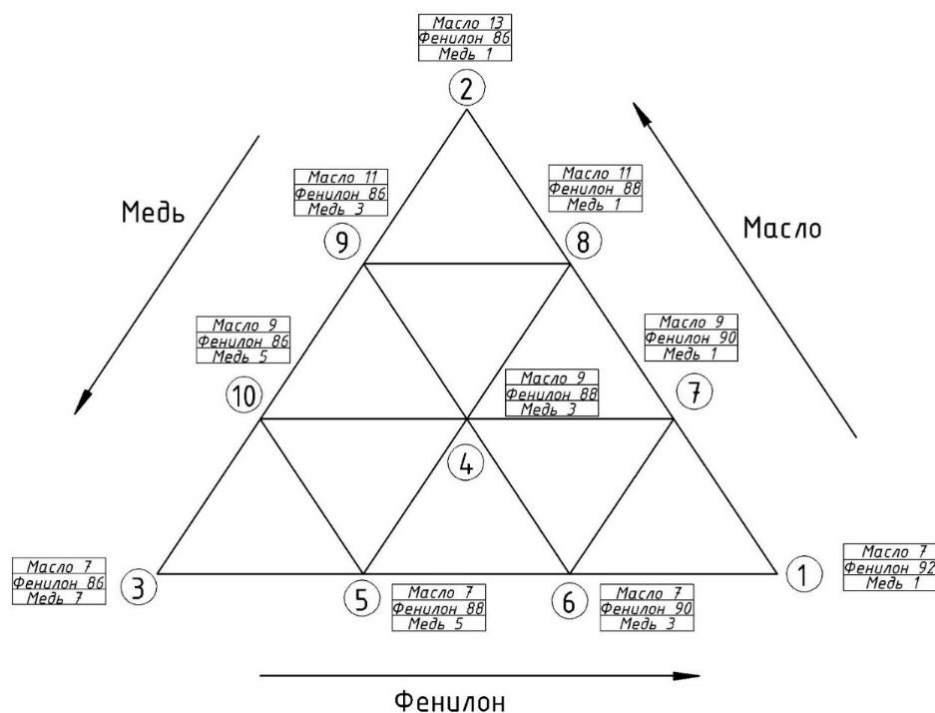


Рис. 7. Графическая интерпретация симплекс-решётчатого плана

Определение механических характеристик разработанного антифрикционного композиционного покрытия с различным составом матричного связующего выполнялось по результатам индентирования образцов, изготовленных в соответствии с матрицей плана. На рис. 8 и 9 показаны симплекс-диаграммы исследования твёрдости и модуля упругости покрытия на стальном субстрате.

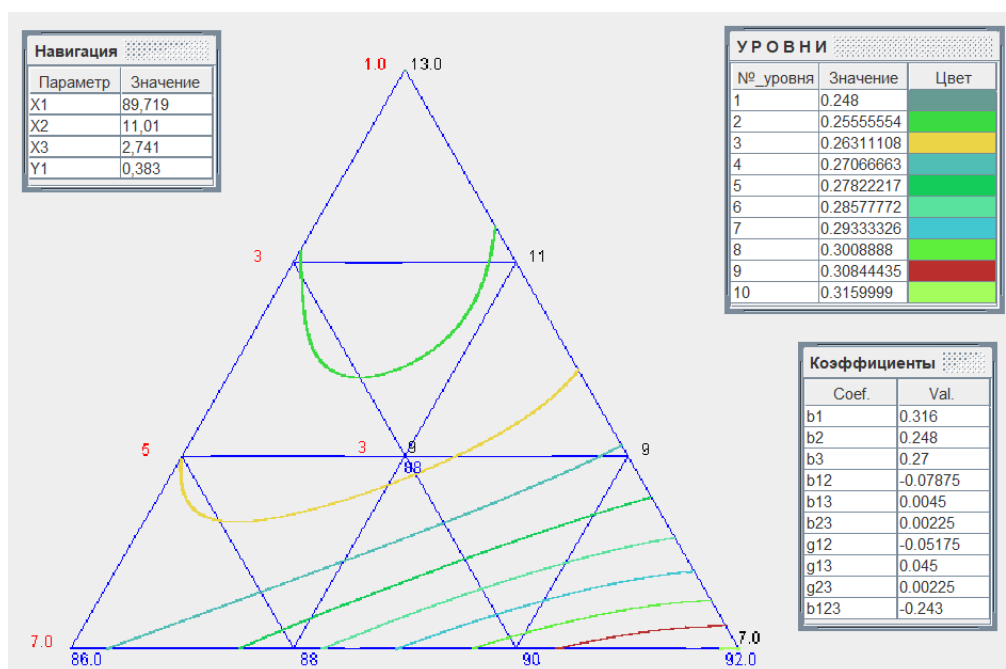


Рис. 8. Исследование твёрдости покрытия на стальном субстрате

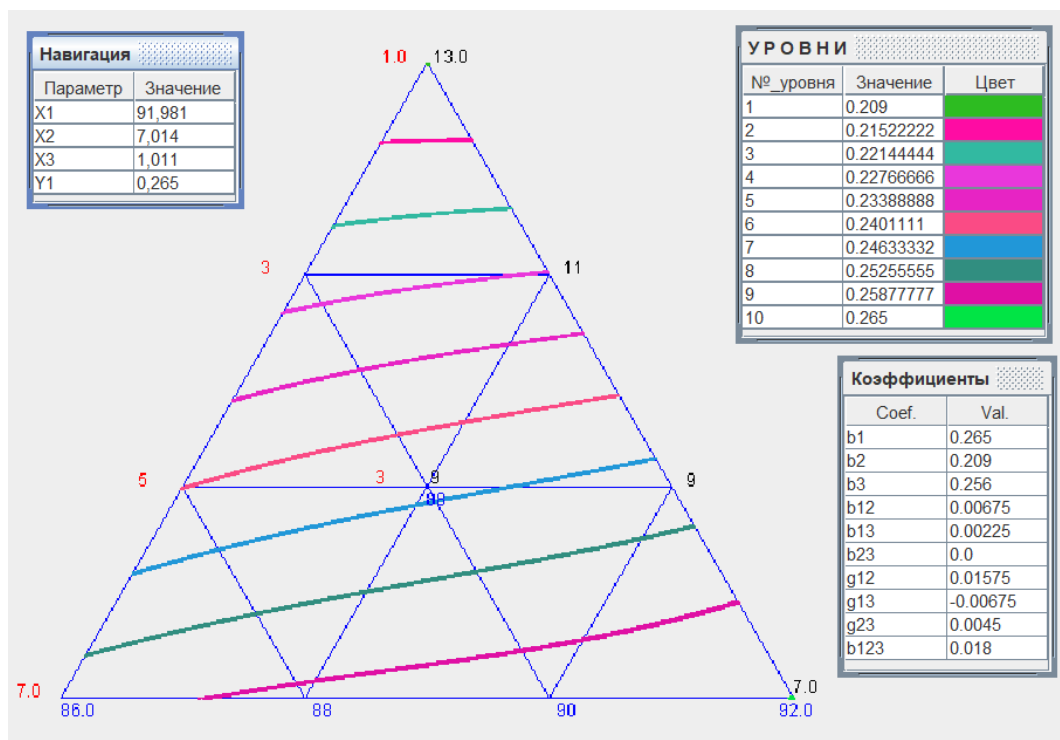


Рис. 9. Исследование модуля упругости покрытия на стальном субстрате

Анализ симплекс-диаграмм свидетельствует, что механические характеристики композиционного покрытия на стальном субстрате имеют тенденцию на увеличение показателей жёсткости и упругости в направлении точки 1 плана (92 % фенилона, 7 % масла и 1 % меди). Аналогичный результат получен и для латунной подложки (рис. 10 и 11).

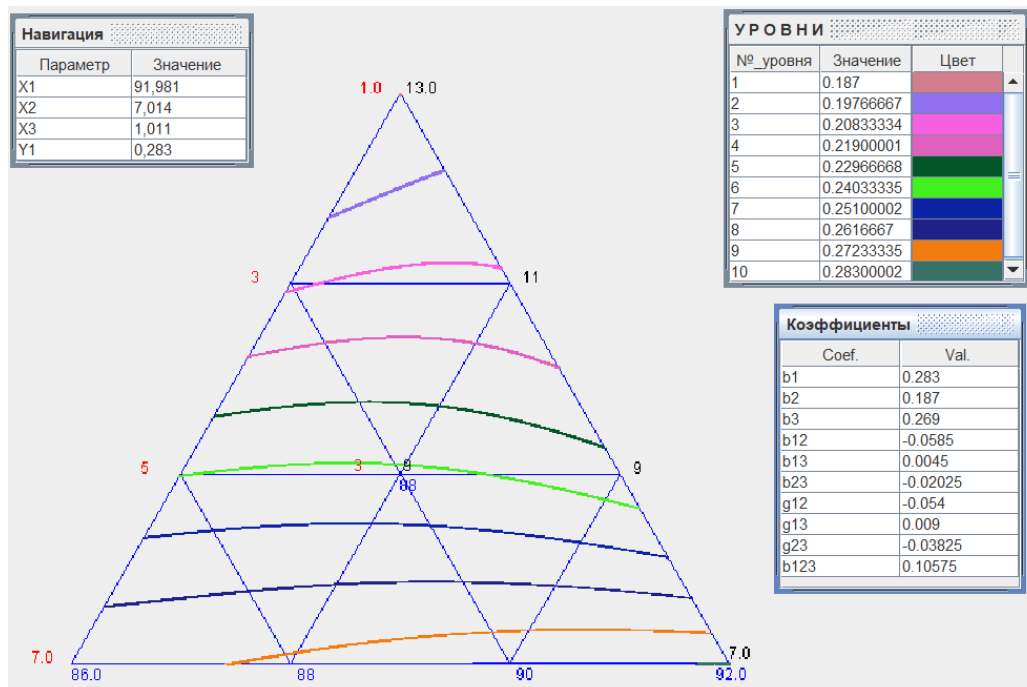


Рис. 10. Исследование твёрдости покрытия на латунном субстрате

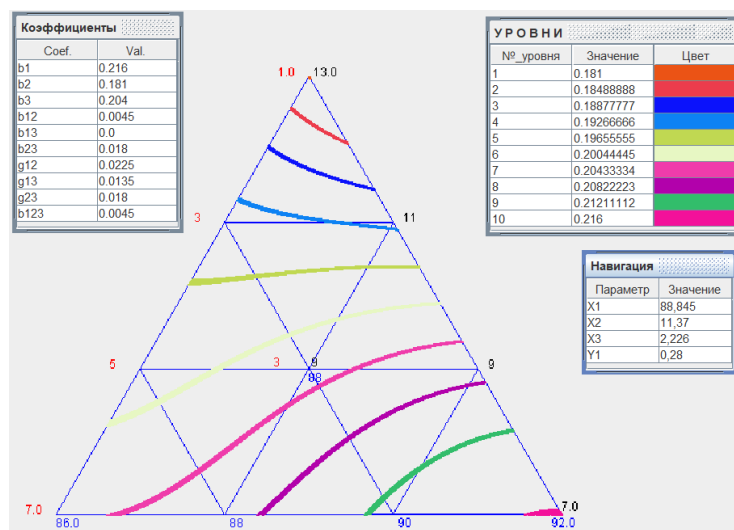


Рис. 11. Исследование модуля упругости покрытия на латунном субстрате

В таблице представлены восстановленные на основании экспериментальных данных параметры модели вязкоупругого поведения покрытий, отобранных на основании симплекс-решётчатых планов типа «состав – свойство».

Параметры модели вязкоупругого поведения отобранных покрытий

Образец	G_0 , МПа	G_∞ , МПа	τ , с
L.92.7.1	57,965	57,845	3,88
St.92.7.1	95,145	94,949	3,79

Выводы

Показано, что использование метода инструментального индентирования может быть успешно применено для оценки механических характеристик рассматриваемого типа покрытий.

Обосновано использование микромятника системы анализа механических свойств материалов NanoTest 600 фирмы «Micro materials Ltd» для определения твердости и модуля упругости антифрикционного полимерного композиционного покрытия, содержащего ПТФЭ. Изготовлен переходник для закрепления индентора на микромятнике. Проведены тестовые испытания на калибровочном образце из кварца. Определен оптимальный диапазон усилий для проведения испытаний, выбрана скорость нагружения.

Для определения вязкоупругих характеристик покрытия методом непрерывного индентирования предложена методика получения кривой ползучести. Вязкоупругие свойства исследуемого материала описываются трехзвенной моделью стандартного вязкоупругого тела

Определен оптимальный состав модификаторов (мелкодисперсного порошка меди и масла) обеспечивающих наиболее высокие твердость и модуль упругости композита.

Сделан вывод о влиянии подложки на механические характеристики покрытия. Показано, что использование в качестве субстрата стали обеспечивает более высокие механические характеристики покрытия.

Список литературы

- 1 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.
- 2 Иваночкин, П. Г. Анализ состояния поверхности металлического контртела при взаимодействии с антифрикционным покрытием, содержащим ПТФЭ / П. Г. Иваночкин, Е. Д. Аникина,

References

- 1 Manturov, D. S. Matrix binder for antifriction polymer composite coating / D. S. Manturov, I. V. Bolshikh, E. P. Bolshikh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 3 (95). – P. 36–42. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_36.
- 2 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

Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8.

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

4 **Кохановский, В. А.** Металлополимерные трибосистемы с фторопластсодержащими покрытиями : монография / В. А. Кохановский ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2024. – 223 с. – ISBN 978-5-907815-01-8.

5 **ГОСТ Р 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002) ГСИ.** Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 24 с.

6 **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.

7 Методические и метрологические аспекты измерения механических свойств материалов методом инструментального индентирования / А. И. Потапов, К. В. Гоголинский, В. А. Сясько [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 8. – С. 16–21. – DOI 10.14489/td.2016.08.pp.016-021.

8 **Oliver, W. C.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7, No. 6. – P. 1564–1583.

9 **Головин, Ю. И.** Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикророботах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) / Ю. И. Головин // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 12. – С. 2113–2142. – ISSN 0367-3294.

10 Исследование вязкоупругих свойств композиционных материалов на основе метода индентирования / В. И. Колесников, О. А. Беляк, Т. В. Суворова [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (92). – С. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_25.

11 **Суворова, Т. В.** Математическое моделирование деформации основания железнодорожного пути при встречном движении поездов / Т. В. Суворова, О. А. Беляк, С. А. Усошин // Вестник Ростовского государственного университета путей

Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 4 (96). – P. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8.

3 Investigation of the adhesive strength of anti-friction phenylene-based coatings / I. V. Bolshikh, A. M. Ananko, Ya. K. Sklifus, E. D. Anikina [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 4 (96). – P. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_20.

4 **Kokhanovsky, V. A.** Metal-polymer tribosystems with fluoroplastic-containing coatings : monograph / V. A. Kokhanovsky ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don : RSTU, 2024. – 223 p.

5 **GOST R 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002) GSI.** Metals and alloys. Measurement of hardness and other characteristics of materials by instrumental indentation. Part 1. Test method. – Moscow : Standartinform, 2013. – 24 p.

6 **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.

7 Methodological and metrological aspects of measuring mechanical properties of materials by instrumental indentation / A. I. Potapov, K. V. Gogolinsky, V. A. Syasko [et al.] // Kontrol'. Diagnostika. – 2016. – No. 8. – P. 16–21. – DOI 10.14489/td.2016.08.pp.016-021.

8 **Oliver, W. C.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7, No. 6. – P. 1564–1583.

9 **Golovin, Yu. I.** Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers, and films (review) / Yu. I. Golovin // Physics of the Solid State. – 2008. – Vol. 50, No. 12. – P. 2113–2142. – ISSN 0367-3294.

10 Study of viscoelastic properties of composite materials on the basis of indentation method / V. I. Kolesnikov, O. A. Belyak, T. V. Suvorova [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 4 (92). – P. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_25.

11 **Suvorova, T. V.** Mathematical modeling of deformation of the railway track base during oncoming train traffic / T. V. Suvorova, O. A. Belyak, S. A. Usoshin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. –

сообщения. – 2011. – № 4. – С. 155–161. – ISSN 0201-727X.

12 **Беляк, О. А.** Влияние микроструктуры основания на силы трения при движении плоского штампа / О. А. Беляк, Т. В. Суворова // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2018. – № 3. – С. 25–31. – DOI 10.31429/vestnik-15-3-25-31.

2011. – No. 4. – P. 155–161. – ISSN 0201-727X.

12 **Belyak, O. A.** Influence of the foundation microstructure on frictional force during the motion of a flat punch / O. A. Belyak, T. V. Suvorova / Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation – 2018. – No. 3. – P. 25–31. – DOI 10.31429/vestnik-15-3-25-31.

P. G. Ivanochkin, M. M. Chetverik, E. P. Bolshikh

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AN ANTIFRICTION POLYMER COMPOSITE COATING CONTAINING PTFE

Abstract. The mechanical characteristics of an antifriction polymer composite coating based on fabric with PTFE fiber are studied. The fabric of polymer fibers is impregnated and glued to the substrate (base) with a heat-resistant matrix binder of cold curing based on phenylone with modifiers introduced into the matrix (fine copper powder and oil). The mechanical properties of the coatings were obtained by microindentation using the NanoTest 600 analysis system from Micro materials Ltd. The mechanical characteristics of the experimental samples were determined: microhardness, elastic modulus, as well as their viscoelastic properties. It is shown that the use of the instrumental indentation method can be successfully applied to assess the mechanical characteristics of the considered type of coatings. A technique for obtaining a creep curve for assessing the viscoelastic characteristics of the coating using the continuous indentation method is proposed. The optimal composition of modifiers providing the highest hardness and elastic modulus of the composite is determined.

Keywords: antifriction coating, fabric with PTFE fiber, cold-curing binder, modifiers, mechanical characteristics, microhardness, elastic modulus, viscoelastic properties.

For citation: Ivanochkin, P. G. Investigation of the mechanical characteristics of an anti-friction polymer composite coating containing PTFE / P. G. Ivanochkin, M. M. Chetverik, E. P. Bolshikh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 64–73. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_64.

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

Четверик Максим Максимович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), студент, e-mail: chetverikm@mail.ru

Больших Елизавета Павловна

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

Information about the authors

Ivanochkin Pavel Grigoryevich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Theoretical Mechanics”, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru

Chetverik Maksim Maksimovich

Rostov State Transport University (RSTU), Student, e-mail: chetverikm@mail.ru

Bolshikh Elizaveta Pavlovna

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

Е. И. Кедрова, П. В. Матвеев, А. Е. Шашурин

МОДЕЛЬ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЛЬГАНГОВ

Аннотация. Рассмотрены рольганговые механизмы, применяемые для подачи заготовок различной конфигурации в зону обработки различных типов технологических машин, в частности, таких, как кузнечно-прессовое оборудование, металлорежущее и деревообрабатывающее станичное оборудование. Это оборудование создает на рабочих местах производственного персонала повышенные уровни шума и вибрации. Колебательные системы рольгангов для различных технологических машин имеют идентичную компоновку и включают: подающие валки, представляющие собой цилиндрические элементы, несущую систему, представляющую собой сварную конструкцию из швеллеров. Установлено, что различия заключаются фактически в геометрических размерах и количестве элементов, входящих в общую колебательную систему. Вследствие идентичности колебательной системы моделирование процессов виброакустической динамики, на основе которой и определяются уровни вибраций звукового давления, звуковой мощности, выполняется на основе единого методического подхода.

Ключевые слова: рольганг, вибрационная мощность, колебательная система, скорости колебаний, уровни звукового давления, акустические характеристики.

Для цитирования: Кедрова, Е. И. Модель виброакустической характеристики рольгангов / Е. И. Кедрова, П. В. Матвеев, А. Е. Шашурин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 74–80. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_74.

Введение

Приводные роликовые конвейеры часто используются в промышленности для упрощения и автоматизации процессов. Они могут быть установлены на конвейерах и транспортерах, где помогают перемещать грузы. Благодаря своей гибкости и надежности рольганговые механизмы значительно увеличивают эффективность работы в промышленных предприятиях.

Колебательная система рольгангов (рис. 1) включает следующие источники излучения звуковой энергии:

- рама рольганга, представляющая собой систему стержневых элементов;
- подшипниковые узлы валков, которые монтируются в горизонтальных элементах рамы;
- цепную передачу, включающую звездочки и непосредственно саму цепь.

Шум цепных передач обусловлен работой находящихся в зацеплении зубчатых колес и подшипников. Уровни шума цепных передач могут варьироваться в зависимости от различных факторов, таких как конструкция передачи, материалы, используемые для изготовления зубчатых колес и частота вращения. Обычно шум от цепных передач можно разделить на следующие уровни:

- низкий уровень шума – это наиболее желаемый уровень шума для цепных передач, он обычно достигается при использовании высококачественных материалов, точной обработке зубчатых колес и регулярном обслуживании цепной передачи. При таком уровне шума цепная передача обычно считается эффективной и надежной;

- умеренный уровень шума – этот уровень шума может быть свойственен цепным передачам, в которых используются стандартные материалы и технологии производства;

- высокий уровень шума – уровень шума, который может быть вызван неправильной установкой, износом или повреждением цепной передачи. При таком уровне шума передача может работать неэффективно и ненадежно, следовательно, может потребоваться ее замена или ремонт.

Уровни шума цепных передач приведены в работе [1], однако эти данные являются экспериментальными. Теоретические исследования шумообразования в элементах цепных передач рассмотрены в работе [2].

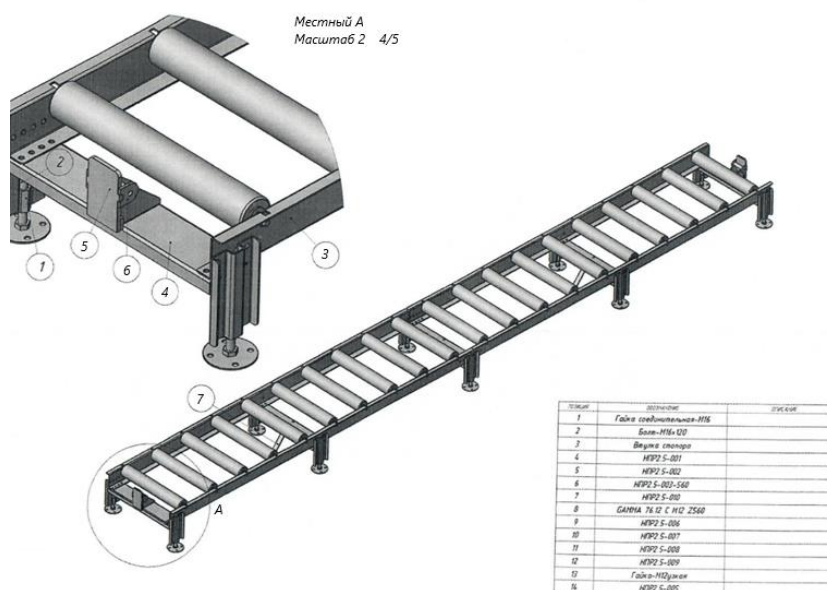


Рис. 1. Компонировка рамы рольгангов:

1 – гайка соединительная ; 2 – болт ; 3 – балка роликовая продольная ;
4 – балка поперечная ; 5 – стопор рольганга ; 6 – втулка стопора ; 7 – стойка балки

Расчет уровней звукового давления системы

Силовое воздействие, определяющее возбуждение вибраций в несущей системе рольгангов, создается цепной передачей.

Аналитическая зависимость силового воздействия по данным работ [4, 6] приведена к виду

$$F(t) = F_0 \sin\left(5 \cdot 10^{-4} \frac{\pi n z^*}{60} t\right) = \frac{2TK}{DS} \sin(5,2 \cdot 10^{-2} n z^* t), \quad (1)$$

где F_0 – амплитуда силового воздействия; Н; T – крутящий момент на звездочке, Нм; K – коэффициент, определяющий условия эксплуатации [6]; S – площадь опорной поверхности шарнира, м²; D – диаметр делительной окружности звездочки, м; n – частота вращения, об/мин; z^* – число зубьев звездочки.

Собственные частоты колебаний звездочки с учетом исследований [3, 4] определяются по формуле

$$f_k = 3 \cdot 10^{-3} \frac{kh}{D^2} \text{ Гц}, \quad (2)$$

где k – коэффициент, определяющий собственные частоты колебаний; h – толщина звездочки, м.

С учетом вышеуказанных работ зависимости, определяющие звуковое давление (P), уровни звукового давления (L_p), звуковую мощность (N), уровни звуковой мощности (L_N) приведены к следующему виду:

$$P = \frac{D^2 f_k v_k}{2}; L_p = 20 \lg\left(\frac{D^2 f_k v_k}{2 \cdot 10^{-5} r}\right) = 40 \lg D + 20 \lg \frac{f_k v_k}{r} + 94 \text{ дБ};$$

$$N = 1,36 \cdot 10^{-2} D^4 (f_k v_k)^2; L_N = 40 \lg \frac{1,36 \cdot 10^{-2} D^4 (f_k v_k)^2}{10^{-2}} = 40 \lg D + 20 \lg f_k v_k + 100, \quad (3)$$

где v_k – скорость колебаний звездочки; r – радиус делительной окружности.

Звездочка цепной передачи представляет собой фактически круглую пластину, закрепленную в центре. Скорости её колебаний с учетом данных работы [5] рассчитываются по формуле

$$V_3 = \frac{1,5 \cdot 10^{-2} TK (hk)^2 n z^* D \eta}{2,7 \cdot 10^{10} (hk)^3 \eta^2 + m^2 D^{-2} S [9 \cdot 10^6 (hk)^2 - 2,5 \cdot 10^{-3} (n z^*)^2 D^4]^2},$$

где η – коэффициент потерь колебательной энергии; m – модуль зацепления.

Участки цепи между двумя звездочками рассматриваются как системы с распределенной массой на двух шарнирных опорах. Собственные частоты колебаний такой системы (как стального элемента) определяются по формуле

$$f_k = 7 \cdot 10^{-3} \frac{k}{l} \sqrt{\frac{J}{F}},$$

где l – длина участка цепи, м; J – момент инерции, м^4 ; F – площадь поперечного сечения, м^2 .

Для звукового давления (P), уровней звукового давления (L_p), звуковой мощности (N), уровней звуковой мощности (L_N) получены следующие зависимости:

$$P = 0,17 v_k \left(\frac{k S_n}{l r} \right)^{0,5} \left(\frac{J}{F} \right)^{0,25}; \quad L_p = 20 \lg \frac{8 \cdot 10^{-2} v_k \left(\frac{k S_n}{l r} \right)^{0,5} \left(\frac{J}{F} \right)^{0,25}}{10^{-5}};$$

$$N = 84 v_k^2 S_n \frac{k}{l} \sqrt{\frac{J}{F}}; \quad L_N = 10 \lg \frac{84 v_k^2 S_n \frac{k}{l} \sqrt{\frac{J}{F}}}{10^{-12}}, \quad (4)$$

где v_k – скорости колебаний на собственных частотах, м/с; S_n – площадь участка цепи между звездочками, м^2 .

Системы уравнений для расчета вклада источников в шумообразование

Несущая система рольгангов представляет собой энергетически замкнутую конструкцию стержневых элементов, представляющих собой швеллера различных геометрических размеров. Согласно рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 – передний элемент (со стороны цепной передачи); 2 – задний горизонтальный элемент; 3 – вертикальные стойки; 4 – горизонтальные элементы, расположенные перпендикулярно элементам 1 и 2.

Тогда система уравнений для расчета энергетических потоков примет вид:

$$\begin{aligned} (\delta_1 S_1 + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{1,2} l_{1,2} + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{1,4} l_{1,4}) q_1 &= \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,1} l_{1,3} q_3 + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4} q_4 + \sum_{i=1}^{K_2} N_1; \\ (\delta_2 S_2 + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{2,3} l_{2,3} + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4}) q_2 &= \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,2} l_{3,2} q_3 + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,2} l_{4,2} q_4 + \sum_{i=1}^{K_2} N_2; \\ (\delta_3 S_3 + \alpha_2 l) q_3 &= \alpha_1 l q_1 + \alpha_3 l q_2; \\ (\delta_4 S_4 + \alpha_2 l) q_4 &= \alpha_1 l q_1 + \alpha_3 l q_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где q_i – энергетические потоки в элементах несущей системы, Вт; l – длина линии контакта между элементами несущей системы, м; α_i – коэффициенты вибропередач между элементами несущей системы; δ_i – коэффициент поглощения в элементах конструкции, $\frac{1}{\text{м}}$; S_i – площадь соответствующего элемента, м^2 ; K_1 – количество элементов 3 и 4; K_2 – количество подшипниковых узлов, расположенных в элементах 1 и 2.

Для удобства расчетов (по методу Крамера) система представлена в матричной форме

$$\begin{vmatrix} K_1 & 0 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,1} l_{1,3} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4} \\ 0 & K_2 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,2} l_{3,2} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,2} l_{4,2} \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & K_3 & 0 \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & 0 & K_4 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{K_2} N_1 \\ \sum_{i=1}^{K_2} N_2 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где $K_1 = \delta_1 S_1 + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{1,2} l_{1,2} + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{1,4} l_{1,4}$; $K_2 = \delta_2 S_2 + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{2,3} l_{2,3} + \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4}$; $K_3 = \delta_3 S_3 + \alpha_2 l$; $K_4 = \delta_4 S_4 + \alpha_2 l$.

Решение данной системы относительно энергетических потоков определяется зависимостями:

$$q_1 = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{K_2} N_1 & 0 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,1} l_{1,3} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4} \\ \sum_{i=1}^{K_2} N_2 & K_2 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,2} l_{3,2} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,2} l_{4,2} \\ 0 & \alpha_3 l & K_3 & 0 \\ 0 & \alpha_3 l & 0 & K_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} K_1 & 0 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,1} l_{1,3} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4} \\ 0 & K_2 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,2} l_{3,2} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,2} l_{4,2} \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & K_3 & 0 \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & 0 & K_4 \end{vmatrix}}; \quad (7)$$

$$q_2 = \frac{\begin{vmatrix} K_1 & \sum_{i=1}^{K_2} N_1 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,1} l_{1,3} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4} \\ 0 & \sum_{i=1}^{K_2} N_2 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,2} l_{3,2} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,2} l_{4,2} \\ \alpha_1 l & 0 & K_3 & 0 \\ \alpha_1 l & 0 & 0 & K_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} K_1 & 0 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,1} l_{1,3} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4} \\ 0 & K_2 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,2} l_{3,2} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,2} l_{4,2} \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & K_3 & 0 \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & 0 & K_4 \end{vmatrix}}; \quad (8)$$

$$q_3 = \frac{\begin{vmatrix} K_1 & 0 & \sum_{i=1}^{K_2} N_1 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4} \\ 0 & K_2 & \sum_{i=1}^{K_2} N_2 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,2} l_{4,2} \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & 0 & 0 \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & 0 & K_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} K_1 & 0 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,1} l_{1,3} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4} \\ 0 & K_2 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,2} l_{3,2} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,2} l_{4,2} \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & K_3 & 0 \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & 0 & K_4 \end{vmatrix}}; \quad (9)$$

$$q_4 = \frac{\begin{vmatrix} K_1 & 0 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,1} l_{1,3} & \sum_{i=1}^{K_2} N_1 \\ 0 & K_2 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,2} l_{3,2} & \sum_{i=1}^{K_2} N_2 \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & K_3 & 0 \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & 0 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} K_1 & 0 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,1} l_{1,3} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,1} l_{1,4} \\ 0 & K_2 & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{3,2} l_{3,2} & \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_{4,2} l_{4,2} \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & K_3 & 0 \\ \alpha_1 l & \alpha_3 l & 0 & K_4 \end{vmatrix}}. \quad (10)$$

Выражения для потоков энергии, вибропоглощения определяются зависимостями [2]:

$$q_i = 2C_{иi} m_{0i} v_k^2; \quad C_{иi}^2 = 2\pi f_k \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}}; \quad \delta = \frac{\pi \eta f_k}{2C_{иi}}, \quad (11)$$

где $C_{иi}$ – скорость распространения изгибной волны, м/с; m_0 – распределенная масса элемента, кг/м; η – коэффициент потерь колебательной энергии.

Для элементов, различия толщины которых не превышают 20–25 %, величина α принята равной 0,32.

Тогда скорости колебаний соответствующих элементов определяются по формуле

$$v_k = \sqrt{\frac{q_i}{2C_{иi} m_{0i}}}. \quad (12)$$

Учитывая, что элементы несущей системы изготавливаются из стального проката, то зависимости (11) примут вид

$$q_i = 4 \times 10^{12} \left(\frac{k}{l_i}\right)^2 J v_k^2; \quad C_{иi}^2 = 2,5 \times 10^8 \left(\frac{k}{l_i}\right)^2 \frac{J}{F}; \quad \delta_i = 1,6\eta \left(\frac{k}{l_i}\right),$$

где l_i – длина соответствующего элемента, м.

Вводимая от подшипниковых узлов вибрационная мощность определяется на основе реакции в подшипниковых узлах. Звездочка располагается относительно подшипниковых узлов консольно, поэтому расчет основан на схеме, приведенной на рис. 2.

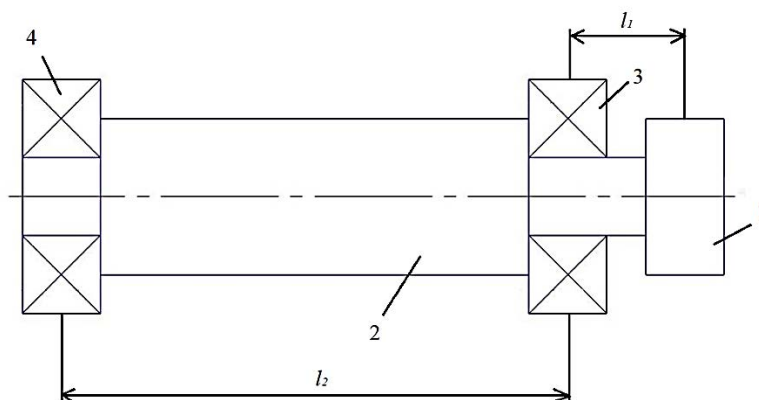


Рис. 2. Расчетная схема вводимой вибрационной мощности:

1 – звездочка, 2 – валок, 3 и 4 – подшипниковые узлы

Вводимая вибрационная мощность определяется как

$$N = R(t) \frac{dR(t)}{dt},$$

где $R(t)$ – реакция в подшипнике, Н.

Согласно компоновке (рис. 3):

$$R_3(t) = \frac{P(t)(\lambda+1)}{\lambda}; \quad R_4(t) = \frac{P(t)}{\lambda},$$

где $\lambda = \frac{l_2}{l_1}$.

В этом случае

$$N_1 = \frac{P^2 n z^* (\lambda+1)^2 \sin \frac{\pi n z^*}{30} t \cdot 0,025}{i_3 \lambda^2};$$

$$N_2 = \frac{0,025 P^2 n z^* \sin \frac{\pi n z^*}{30} t}{i_4 \lambda^2},$$

где i_3 и i_4 – жесткости соответствующих подшипниковых узлов, Н/м.

Скорости колебаний определяются из дифференциального уравнения

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2,6 \frac{J}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 y = \frac{5 \cdot 10^{-3} TK}{DSFI} \sin(5,2 \cdot 10^{-3} n z^* t).$$

Решение данного уравнения в виде действительной части скорости колебаний:

$$\text{Re} \{v_k\} = \frac{10^{-4} TK n z^*}{DSFI} + \sum_{k=1}^{k^*} \frac{\left[10^9 \frac{J}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - 10^{-3} (n z^*)^2 \right] \cos 5,2 \cdot 10^{-2} n z^* t}{\left[10^9 \frac{J}{F} \left(\frac{k}{l} \right)^4 - 10^{-3} (n z^*)^2 \right]^2 + 10^{18} \left(\frac{J}{F} \eta \right)^2 \left(\frac{k}{l} \right)^8},$$

где k^* – количество собственных частот, попадающих в нормируемый диапазон.

Заключение

Таким образом, полученные теоретические зависимости позволяют определить октавные уровни звукового давления, создаваемые одновременным звуковым излучением всей системы источников, а также определить количественный вклад каждого источника в формирование акустических характеристик рольганга. Эти данные фактически и определяют технические решения по доведению уровней звукового давления до предельно допустимых величин. Количественный вклад каждого источника в формирование акустических характеристик рольганга позволяет определить, какой источник является основным по генерации звука и какие дополнительные источники вносят наибольший вклад в формирование характеристик рольганга. Эти данные помогают инженерам и проектировщикам выбрать и настроить

ить соответствующее оборудование, а также провести необходимые корректировки для достижения требуемых уровней звукового давления.

Список литературы

- 1 **Устиновский, Е. П.** Проектирование цепных передач с применением ЭВМ : учебное пособие / Е. П. Устиновский, Е. В. Вайчулис, А. В. Ковнацкий ; под ред. Е. П. Устиновского. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 132 с.
- 2 **Кедрова, Е. И.** Модель виброакустической динамики подающих валков приводных роликовых конвейеров / Е. И. Кедрова // Noise Theory and Practice. – 2024. – Том 10, № 1 (36). – С. 38–45. – EDN UFCRCG.
- 3 **Никифоров, А. С.** Акустическое проектирование судовых конструкций : справочник / А. С. Никифоров. – Ленинград : Судостроение, 1990. – 200 с.
- 4 **Чукарин, А. Н.** Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки / А. Н. Чукарин. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2005. – 152 с. – EDN QNAZWX.
- 5 **Кирпичников, В. Ю.** Вибрация и шумоизлучение обтекаемых корпусных конструкций при резонансных и автоколебательных процессах / В. Ю. Кирпичников. – Санкт-Петербург : ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2022. – 262 с. – ISBN 978-5-903002-54-2.
- 6 **Тюняев, А. В.** Детали машин : учебник / А. В. Тюняев, В. П. Звездаков, В. А. Вагнер. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 736 с. – ISBN 978-5-8114-1461-1.
- 7 **Чукарин, А. Н.** Исследования эффективных коэффициентов потерь энергии колебаний в стержневых конструкциях / А. Н. Чукарин, А. П. Сычев, С. Ф. Подуст // Вестник машиностроения. – 2015. – № 7. – С. 35–37. – EDN WFAOQH.
- 8 **Безопасность технологических процессов и производств : учебник / С. С. Борцова, Л. Ф. Дроздова, Н. И. Иванов [и др.].** – Москва : Логос, 2016. – 608 с. – ISBN 978-5-98704-844-3.
- 9 **Иванов, Н. И.** Защита от шума и вибрации : учебное пособие / Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Печатный цех, 2019. – 282 с. – ISBN 978-5-6042448-3-8.
- 10 **Шашурин, А. Е.** Проблемы современной инженерной акустики / А. Е. Шашурин, С. С. Борцова, В. К. Васильева // Защита от повышенного шума и вибрации : сборник трудов

References

- 1 **Ustinovsky, E. P.** Design of chain drives using a computer : a tutorial / E. P. Ustinovsky, E. V. Vaichulis, A. V. Kovnatsky ; edited by E. P. Ustinovsky. – Chelyabinsk : Publishing center of SUSU, 2017. – 132 p.
- 2 **Kedrova, E. I.** Model of vibroacoustic dynamics of feed rolls of driven roller conveyors / E. I. Kedrova // Noise Theory and Practice. – 2024. – Vol. 10, No. 1 (36). – P. 38–45. – EDN UFCRCG.
- 3 **Nikiforov, A. S.** Acoustic design of ship structures : a reference book / A. S. Nikiforov. – Leningrad : Sudostroenie, 1990. – 200 p.
- 4 **Chukarin, A. N.** Theory and methods of acoustic calculations for design of technological machines for mechanical processing. обработка / A. N. Chukarin. – Rostov-on-Don : DSTU Publishing Center, 2005. – 152 p. – EDN QNAZWX.
- 5 **Kirpichnikov, B. Yu.** Vibration and noise emission of streamlined hull structures during resonant and self-oscillating processes / B. Yu. Kirpichnikov. – Saint Petersburg : FSUE "Krylov State Research Center", 2022. – 262 p. – ISBN 978-5-903002-54-2.
- 6 **Tyunyayev, A. V.** Machine parts : textbook / A. V. Tyunyaev, V. P. Zvezdakov, V. A. Wagner. – 2nd ed., corrected. and add. – Saint Petersburg : Lan, 2022. – 736 p. – ISBN 978-5-8114-1461-1.
- 7 **Chukarin, A. N.** Research of effective coefficients of vibration energy losses in rod structures / A. N. Chukarin, A. P. Sychev, S. F. Podust // Bulletin of mechanical engineering. – 2015. – No. 7. – P. 35–37. – EDN WFAOQH.
- 8 **Safety of technological processes and production : textbook / S. S. Bortsova, L. F. Drozdova, N. I. Ivanov [et al.].** – Moscow : Logos, 2016. – 608 p. – ISBN 978-5-98704-844-3.
- 9 **Ivanov, N. I.** Noise and vibration protection : a tutorial / N. I. Ivanov, A. E. Shashurin. – 2nd ed., revised and enlarged. – Saint Petersburg : Printing shop. 2019. – 282 p. – ISBN 978-5-6042448-3-8.
- 10 **Shashurin, A. E.** Problems of modern engineering acoustics / A. E. Shashurin, S. S. Bortsova, V. K. Vasilyeva // Protection from increased noise and vibration : collection of works of the All-Rus-

Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 23–25 марта 2021 г. / под редакцией Н. И. Иванова. – Санкт-Петербург : Институт акустических конструкций, 2021. – С. 11–15. – EDN GZHPTE.

sian scientific and practical conference with international participation, Saint Petersburg, March 23–25, 2021 / edited by N. I. Ivanov. – Saint Petersburg : Institute of Acoustic Structures, 2021. – P. 11–15. – EDN GZHPTE.

E. I. Kedrova, P. V. Matveev, A. E. Shashurin

A MODEL OF VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF ROLLER CONVEYORS

Abstract. The article considers roller table mechanisms widely used for feeding blanks of various configurations to the processing zone of various types of technological machines, in particular, such as forging and pressing equipment, metal-cutting and woodworking machine tools. This equipment creates increased levels of noise and vibration at the workplaces of production personnel. The oscillating systems of roller tables for various technological machines have an identical layout and include: feed rolls, which are cylindrical elements, a supporting system, which is a welded structure made of channels. It was found that the differences actually consist in the geometric dimensions and the number of elements included in the common oscillating system. Due to the identity of the oscillatory system, the modeling of vibroacoustic dynamics processes, on the basis of which the vibration levels of sound pressure and sound power are determined, is performed on the basis of a single methodological approach.

Keywords: roller conveyor, vibration power, oscillatory system, vibration speed, sound pressure levels, acoustic characteristics.

For citation: Kedrova, E. I. A model of vibroacoustic characteristics of roller conveyors / E. I. Kedrova, P. V. Matveev, A. E. Shashurin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 74–80. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_2_74.

Сведения об авторах

Кедрова Екатерина Игоревна

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова,
преподаватель,
e-mail: kedrova_ei@voenmeh.ru

Матвеев Петр Владимирович

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова,
декан Естественного факультета,
заведующий кафедрой «Электротехника»,
e-mail: matveev_pv@voenmeh.ru

Шашурин Александр Евгеньевич

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова,
ректор,
e-mail: 7596890@mail.ru

Information about the authors

Kedrova Ekaterina Igorevna

Baltic State Technical University
"VOENMEKH" named after D. F. Ustinov,
Lecturer,
e-mail: kedrova_ei@voenmeh.ru

Matveev Petr Vladimirovich,

Baltic State Technical University
"VOENMEKH" named after D. F. Ustinov,
Dean of the Faculty of Natural Sciences,
Head of the Chair of Electrical Engineering,
e-mail: matveev_pv@voenmeh.ru

Shashurin Aleksandr Evgenievich,

Baltic State Technical University
"VOENMEKH" named after D. F. Ustinov,
Rector,
e-mail: 7596890@mail.ru

В. А. Крутова, Г. В. Кадубовская, Д. С. Фролова

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ НА ПРИМЕРЕ РАМЫ МОСТОВОГО КРАНА ТЯЖЕЛОЙ СЕРИИ

Аннотация. Коэффициенты потерь колебательной энергии играют важную роль в анализе виброакустических характеристик, возникающих в мостовых кранах. Эти коэффициенты позволяют оценить скорость затухания колебаний в различных элементах конструкции, что, в свою очередь, влияет на долговечность и надежность оборудования.

Использование динамометрического молотка для возбуждения колебаний является стандартной практикой, так как этот метод позволяет точно контролировать амплитуду и частоту возбуждаемых колебаний. Запись процесса затухания на девяти октавных частотах обеспечивает получение детализированных данных о динамических характеристиках системы.

Математическая обработка экспериментальных данных позволяет выявить закономерности и установить регрессионные зависимости для различных элементов конструкции, таких как колеса, оси колесных пар и несущие рамы. Эти зависимости могут быть использованы для более точного моделирования поведения системы при различных условиях эксплуатации.

Таким образом, полученные регрессионные зависимости являются важным инструментом для инженеров при проектировании мостовых кранов, позволяя оптимизировать их конструкцию с учетом вибрационных характеристик и минимизации шума.

Ключевые слова: шум, вибрация, несущие рамы, мостовые краны.

Для цитирования: Крутова, В. А. Исследование коэффициента потерь на примере рамы мостового крана тяжелой серии / В. А. Крутова, Г. В. Кадубовская, Д. С. Фролова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 81–86. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_81.

Введение

В конструкции мостовых кранов применяются преимущественно замкнутые стержневые системы, которые формируют основу несущей рамы. Такой подход к проектированию обеспечивает оптимальное сочетание прочностных характеристик и жесткости всей конструкции. Для достижения максимальной эффективности распределения нагрузок при минимальном весе конструкции разработчики используют комбинацию профильных элементов – швеллеров и двутавровых балок. Это позволяет создать сбалансированную структуру, способную выдерживать эксплуатационные нагрузки с оптимальным расходом материалов.

Кабины мостовых кранов относятся к типу кабин с большой площадью остекления, поэтому их конструкция также должна быть достаточно прочной, чтобы выдерживать различные нагрузки, включая вибрации. Замкнутая стержневая конструкция из уголков обеспечивает необходимую жесткость и устойчивость, а также позволяет эффективно использовать стеклянные панели для обеспечения хорошей видимости оператора мостового крана (см. рисунок).



Компоновка кабины

При анализе акустических характеристик несущих элементов мостовых кранов, представленных в виде линейных источников, используются специальные расчетные зависимости для определения уровней звукового давления:

– при $0,02f_k h_p \cos\beta < 1$:

$$L_{W_p} = 20\lg f_k + 10\lg\beta h_p V_k S_p \cdot \cos\beta + 106; \quad (1)$$

– при $0,02f_k h_p \cos\beta \geq 1$:

$$L_{W_p} = 10 \lg BV_k S_p + 5 \lg f_k h_p \cos\beta + 135, \quad (2)$$

где β – угол излучения;

f_k – собственная частота колебаний источника, Гц;

h_p – высота рельса или элемента рамы мостового крана, м;

V_k – скорость колебаний, м/с;

S_p – площадь поверхности источника, м/с,

Для оценки вибрационных параметров подобных конструкций необходимо провести детальное исследование процесса распространения колебаний в замкнутой системе стержней. Такой подход позволяет получить точные данные о характеристиках вибрации и разработать эффективные меры по снижению шумового воздействия [1, 2].

Основная часть

В реальных материалах наличие внутреннего трения приводит к диссипации энергии в результате колебательных процессов системы. Для комплексной оценки энергетических потерь, включая конструкционные потери акустической системы, используется специальный показатель. Количественной мерой этих потерь служит коэффициент потерь (η), который представляет собой константу, отражающую общее энергорассеяние. При гармонических колебаниях данный параметр тесно связан с коэффициентом затухания энергии (δ), что выражается следующим соотношением:

$$\delta = \frac{1}{2} \omega \eta = \frac{2\pi f \eta}{2} = \pi f \eta, \quad (3)$$

где f – частота колебаний.

Параметр количественно определяет относительные потери энергии в материале за цикл колебаний, демонстрируя долю суммарной энергии, необратимо рассеиваемую за цикл. Это позволяет судить об эффективности энергообмена. Величина связана с ключевыми энергетическими характеристиками системы через конкретные математические соотношения:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = \pi \mathcal{E} \eta; \quad (4)$$

$$\frac{dU}{dt} = \pi U \eta, \quad (5)$$

где \mathcal{E} и U – соответственно полная и потенциальная энергия элемента, входящего в систему.

Для формирования потока в данной системе требуется воздействие внешнего силового фактора, способного вывести стержень из положения равновесия. При этом простое изменение внутренней энергии сопряженных элементов, обусловленное потерями, не способно инициировать такое воздействие. В результате элементы стержневой конструкции будут совершать собственные колебания с учетом имеющихся внутренних потерь. Период затухания этих колебаний, при котором амплитуда уменьшается в «е» раз, можно рассчитать по следующей формуле:

$$t_b = \frac{1}{\pi f \eta}. \quad (6)$$

Исследования показывают: длительность затухания колебаний зависит от частоты и коэффициента потерь. Для обеспечения эффективной изоляции необходимо соблюдение двух условий:

1) время затухания должно существенно превышать период прекращения энергообмена на границах стержней;

2) оно обязано не менее чем в 10 раз превышать время многократного прохождения упругой волны через систему.

Несоблюдение этих условий ведет к чрезмерным энергопотерям и нарушению изоляции.

Важно отметить, что для каждого элемента стержневой конструкции характерно постепенное (поцикловое) снижение энергетического потенциала вследствие внутренних потерь [4, 5]:

Данная последовательность позволяет определить количество энергии, которое было поглощено (или потеряно) системой за определенный временной интервал. Для количественной оценки этой величины используем следующее математическое выражение:

$$U_{\text{пт}} = U\eta + U\eta^2 + \dots + U\eta^n = U\eta \frac{(1-\eta^n)}{1-\eta}, \quad (7)$$

где $U_{\text{пт}}$ – поглощенная энергия;
 U – величина потенциальной энергии рассматриваемого элемента в системе;
 n – число полных циклов прохождения упругой волны на момент наблюдения.

В данном случае правая часть выражения представляет собой сумму конечного числа членов геометрической прогрессии, где знаменатель (η) меньше единицы. При стремлении времени к предельному периоду получаем конечное значение поперечной энергии, которое можно определить с помощью следующей формулы:

$$U_{\text{пт}} = U \frac{\eta}{1-\eta}. \quad (8)$$

Это выражение позволяет вычислить суммарную поперечную энергию системы в установившемся режиме колебаний.

Учитывая, что коэффициент потерь для большинства технических материалов существенно меньше единицы, можно преобразовать исходное выражение следующим образом:

$$U_{\text{пт}} = U\eta \frac{1}{1-\eta} = U\eta(1-\eta)^{-1} = U(\eta + \eta^2 + \eta^3 + \dots). \quad (9)$$

Приближенно, с учетом только первого члена разложения, получаем:

$$U_{\text{пт}} = U\eta. \quad (10)$$

Согласно анализу, наибольшая часть энергетических потерь происходит в течение первого цикла колебаний, что подтверждается приведенным равенством. Этот вывод справедлив для всех элементов системы. При этом суммарная энергия потерь, рассчитанная с помощью предельного перехода, асимптотически приближается к некоторому постоянному значению.

Суммарные потери энергии системы представляют собой сумму потерь отдельных ее элементов. Как следствие, энергетическое соотношение, интегрирующее потери первого основного цикла, может быть записано для любого начального цикла распространения упругой волны, совершающей двойное прохождение по системе

$$A\eta = U_1\eta_1 + U_2\eta_2 + \dots + U_n\eta_n = \sum_n U_n \eta_n. \quad (11)$$

На основании вышеизложенного совокупный коэффициент потерь для всей системы может быть представлен следующим выражением:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{U_1\eta_1}{A} + \frac{U_2\eta_2}{A} + \dots + \frac{U_n\eta_n}{A} = \frac{\sum_n U_n \eta_n}{A}. \quad (12)$$

Это соотношение отражает суммарный эффект от потерь энергии во всех компонентах системы при распространении упругой волны.

Рассмотрим два случая распределения коэффициентов потерь в системе:

1 При равномерном распределении потерь, когда все элементы системы имеют одинаковый коэффициент потерь, общий коэффициент потерь системы будет идентичен коэффициенту потерь любого отдельного элемента.

2 При неравномерном распределении потерь η_i ($i = \overline{1, n}$), когда коэффициенты различаются между собой, общий коэффициент потерь системы $\eta_{\text{общ}}$ будет находиться в пределах:

$$\eta_j < \eta_{\text{общ}} < \eta_i, \quad (13)$$

где $\eta_j < \eta_i$.

Рассмотрим два сценария распределения энергетических параметров в системе:

1 При равномерном распределении потенциальных энергий все выводы, сделанные ранее, остаются справедливыми:

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots U_n. \quad (14)$$

2 При неравномерном распределении потенциальных энергий характер влияния на общий коэффициент потерь системы меняется [8, 9]. Рассмотрим два частных случая:

– при условии, если

$$U_1 > U_2 > U_3,$$
$$\eta_1 < \eta_2 < \eta_3,$$

общий коэффициент потерь будет приближаться к максимальному значению;
– при условии, если

$$U_1 > U_2 > U_3,$$
$$\eta_1 < \eta_2 < \eta_3,$$

общий коэффициент потерь будет располагаться между границами:

$$\eta_1 < \eta_{\text{общ}} < \eta_3.$$

Однако его значение будет находиться ближе к наименьшему числу.

Таким образом, при неравномерном распределении потенциальных энергий влияние на общий коэффициент потерь определяется совместным действием величин каждого элемента системы.

Выводы

Проанализировав полученные результаты, можно сформулировать следующие ключевые выводы:

1 В механических системах первостепенное значение имеет контроль энергетических потерь в компонентах с максимальным запасом энергии. Это позволяет эффективно управлять энергетическим балансом системы.

2 Важно отметить, что суммарный уровень энергетических потерь не определяет специфику распределения энергии внутри системы. Однако присутствие потерь способствует более быстрому достижению энергетического равновесия, при котором прекращается обмен энергией между элементами системы.

3 Исследование влияния коэффициентов перехода на распределение вибраций в замкнутой системе при многократных внешних воздействиях показало эффективность применения метода энергетических коэффициентов перехода. Данный подход обеспечивает возможность получения точных количественных оценок и позволяет глубже понять поведение системы в различных условиях.

Таким образом, результаты работы демонстрируют важность комплексного подхода к анализу энергетических процессов в механических системах с учетом как общих закономерностей, так и специфических особенностей отдельных компонентов.

Разработанные регрессионные модели представляют собой аналитический инструмент, позволяющий более точно проектировать мостовые краны. С их помощью становится возможным:

- прогнозировать параметры механизмов передвижения и подъема груза на этапе проектирования;
- оптимизировать конструкцию с учетом массы комплектующих устройств и их КПД;
- повышать эффективность работы механизмов за счет совершенствования существующих устройств;
- внедрять прогрессивные решения в области приводов и конструктивных элементов;
- минимизировать вибрацию и уровень шума при эксплуатации.

Особое значение эти зависимости приобретают при создании новых конструкций мостовых кранов, так как позволяют:

- рационально подбирать унифицированные комплектующие устройства;
- сокращать сроки проектирования и изготовления оборудования;
- упрощать обслуживание и ремонт техники;
- вырабатывать объективные рекомендации по выбору конструктивных параметров;
- учитывать случайные величины при оценке технико-экономических показателей.

Применение регрессионного анализа в проектировании мостовых кранов открывает широкие возможности для создания более совершенных, надежных и эффективных грузоподъемных механизмов, отвечающих современным требованиям промышленности.

Список литературы

- 1 **Krutova, V.** Vibrations of the closed frame structures in a steady-state condition / V. Krutova, B. Meskhi // Journal Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 4–7. – ISSN 1801-9064.
- 2 **Krutova, V.** Theoretical study of the closed bar system loss factor / V. Krutova, B. Meskhi //

References

- 1 **Krutova, V.** Vibrations of the closed frame structures in a steady-state condition / V. Krutova, B. Meskhi // Journal Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 4–7. – ISSN 1801-9064.
- 2 **Krutova, V.** Theoretical study of the closed bar system loss factor / V. Krutova, B. Meskhi // Journal

Journal Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 8–12. – ISSN 1801-9064.

3 **Пронников, Ю. В.** О расчете составляющей шума в кабинах машинистов подвижного состава, создаваемой вибрацией элементов остекления / Ю. В. Пронников // Транспорт. Безопасность. Логистика : труды Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2010. – С. 8–14.

4 **Крутова, В. А.** О расчете коэффициентов потерь колебательной энергии узлов колесных пар мостовых кранов / В. А. Крутова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 6. – С. 213–217. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-6-213-217.

5 **Спиридонов, В. М.** Применение энергетического метода для расчета уровня звуковой вибрации / В. М. Спиридонов // Борьба с шумом на судах : сборник статей. – Ленинград, 1965. – 108 с.

6 **Пронников, Ю. В.** Моделирование структурной составляющей шума в кабинах машинистов подвижного состава / Ю. В. Пронников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 3. – С. 64–68. – ISSN 0201-727X.

7 **Груничев, Н. С.** Пути снижения шума в кабинах локомотивов на железнодорожном транспорте / Н. С. Груничев, С. А. Аксенов, Т. А. Хоренко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 7. – С. 178–182. – ISSN 0236-1493.

8 **Колесников, И. В.** Звукоизолирующие и звукопоглощающие характеристики кабин локомотивов / И. В. Колесников, Ю. В. Пронников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 2. – С. 13–16. – ISSN 0201-727X.

9 **Бондаренко В. А.** Экспериментальные исследования коэффициентов потерь энергии колебаний узлов колесных пар / В. А. Бондаренко, С. Ф. Подуст // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – Т. 16, № 1 (84). – С. 127–135. – DOI 10.12737/18274.

10 **Ржевкин, С. Н.** Курс лекций по теории звука / С. Н. Ржевкин. – Москва : МГУ, 1960. – 335 с.

11 **Бондаренко, В. А.** Уточнение расчета спектров структурной составляющей шума в кабинах с большой площадью остекления / В. А. Бондаренко, Т. А. Финоченко // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 96–102. – DOI 10.23947/1992-5980-2017-17-3-96-102.

Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 8–12. – ISSN 1801-9064.

3 **Pronnikov, Yu. V.** On the calculation of the noise component in the cabins of drivers of rolling stock created by the vibration of the glazing elements / Yu. V. Pronnikov // Transport. Safety. Logistics : proceedings of the International scientific and practical conference. – Rostov-on-Don, 2010. – P. 8–14.

4 **Krutova, V. A.** On the calculation of the coefficients of vibrational energy loss of wheelset units of overhead cranes / V. A. Krutova // Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences. – 2021. – No. 6. – P. 213–217. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-6-213-217.

5 **Spiridonov, V. M.** Application of the energy method for calculating the level of sound vibration / V. M. Spiridonov // Noise control on ships : a collection of papers. – Leningrad, 1965. – 108 p.

6 **Pronnikov, Yu. V.** Modeling of the structural component of noise in the cabins of drivers of rolling stock / Yu. V. Pronnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2010. – No. 3. – P. 64–68. – ISSN 0201-727X.

7 **Grunichev, N. S.** Ways to reduce noise in locomotive cabins on railway transport / N. S. Grunichev, S. A. Aksenov, T. A. Khorenko // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2014. – No. 7. – P. 178–182. – ISSN 0236-1493.

8 **Kolesnikov, I. V.** Sound-insulating and sound-absorbing characteristics of locomotive cabins / I. V. Kolesnikov, Yu. V. Pronnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2011. – No. 2. – P. 13–16. – ISSN 0201-727X.

9 **Bondarenko, V. A.** Experimental studies of the energy loss coefficients of the wheelset vibrations / V. A. Bondarenko, S. F. Podust // Vestnik of Don State Technical University. – 2016. – Vol. 16, No. 1 (84). – P. 127–135. – DOI 10.12737/18274.

10 **Rzhevkin, S. N.** Course of lectures on the sound theory / S. N. Rzhevkin. – Moscow : MSU, 1960. – 335 p.

11 **Bondarenko, V. A.** Refinement of the calculation of the spectra of the structural component of noise in cabins with a large glazing area / V. A. Bondarenko, T. A. Finochenko // Vestnik of Don State Technical University. – 2017. – Vol. 17, No. 3 (90). – P. 96–102. – DOI 10.23947/1992-5980-2017-17-3-96-102.

V. A. Krutova, G. V. Kadubovskaya, D. S. Frolova

INVESTIGATION OF THE LOSS COEFFICIENT USING THE EXAMPLE OF A HEAVY-DUTY OVERHEAD CRANE FRAME

Abstract. The loss coefficients of vibrational energy play an important role in the analysis of vibroacoustic characteristics occurring in overhead cranes. These coefficients allow us to estimate the rate of vibration attenuation in various structural elements, which, in turn, affects the durability and reliability of the equipment.

Using a dynamometer hammer to excite vibrations is standard practice, as this method allows precise control of the amplitude and frequency of the excited vibrations. Recording the attenuation process at nine octave frequencies provides detailed data on the dynamic characteristics of the system.

Mathematical processing of experimental data makes it possible to identify patterns and establish regression dependencies for various structural elements, such as wheels, wheelset axles, and load-bearing frames. These dependencies can be used to more accurately model the behavior of the system under various operating conditions.

Thus, the regression dependences obtained are an important tool for engineers in the design of overhead cranes, allowing them to optimize their design, taking into account vibration characteristics and minimizing noise.

Keywords: noise, vibration, load-bearing frames, overhead cranes.

For citation: Krutova, V. A. Investigation of the loss coefficient using the example of a heavy-duty overhead crane frame / V. A. Krutova, G. V. Kadubovskaya, D. S. Frolova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 81–86. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_81.

Сведения об авторах

Крутова Вероника Александровна

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кафедра «Механика деформируемого твердого тела», доктор технических наук, доцент, e-mail: krutova_va@voenmeh.ru

Кадубовская Галина Викторовна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Проектирование и технология производства машин», старший преподаватель, e-mail: bgv.rostov1@yandex.ru

Фролова Дарья Сергеевна

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

Information about the authors

Krutova Veronika Aleksandrovna

Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov, Chair “Mechanics of a Deformable Solid”, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: krutova_va@voenmeh.ru

Kadubovskaya Galina Victorovna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Machine Design and Production Technology”, Senior Lecturer, e-mail: bgv.rostov1@yandex.ru

Frolova Darya Sergeevna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Machine Design and Production Technology”, Assistant, e-mail: frolovads@rgups.ru

М. Е. Николаев, В. А. Перфилов, С. С. Коврыжко, Я. Р. Якуткин, А. С. Дудников

ПОЛУАВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНЫЙ АГРЕГАТ

Аннотация. В целях оптимизации технологических операций строительства нефтегазопроводов (погрузки, транспортировки и монтажа) предложена комплексная система с внедрением элементов частичной автоматизации, реализованная в виде полуавтоматизированного погрузочно-транспортного агрегата. Конструктивная схема агрегата базируется на двух манипуляторах последовательной структуры, концы которых оснащены грузозахватными устройствами клещевого типа. Отличительной особенностью конструкции погрузочно-транспортного агрегата является наличие у одного из грузозахватных механизмов кольцевого сварочного аппарата. Частичная автоматизация процесса заключается в том, что сварка монтируемых элементов, возврат манипуляторов в исходное положение по заданным координатам и захват трубопровода из кузова реализуются в автоматическом режиме, что увеличивает производительность предлагаемой конструкции агрегата.

Рассмотрен технологический процесс перемещения укладки и монтажа труб с использованием разработанного авторами механизма. Рассчитана теоретическая зона обслуживания с численным решением в программном комплексе MathCAD. Проведен кинематический анализ механизма с определением скоростей и ускорений исполнительных звеньев. В результате установлен коэффициент производительности предлагаемого полуавтоматизированного погрузочно-транспортного агрегата $K = 2,4$ в сравнении с базовым аналогом трубоукладчика – ЧТЗ/ТР12/ТР20.

Ключевые слова: полуавтоматизированный погрузочно-транспортный агрегат, манипулятор, грузозахватный орган, кинематика, зона обслуживания, степень подвижности.

Для цитирования: Полуавтоматизированный погрузочно-транспортный агрегат / М. Е. Николаев, В. А. Перфилов, С. С. Коврыжко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 87–95. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_87.

Введение

В нефтегазовой отрасли при строительстве трубопроводов ключевыми этапами являются транспортировка, сварка и укладка труб в проектное положение. Для выполнения данных операций требуется следующий перечень оборудования: подъемный кран, трубоукладчики, трубовозы (плетевозы) и сварочные аппараты. При работах в сложных климатических условиях и при отсутствии или частичном отсутствии дорог используется вездеходный трубовоз. Таким образом, в процессе строительства трубопроводов оказывается задействовано большое количество человек. Для минимизации человеческого труда предлагается использовать полуавтоматизированный погрузочно-транспортный агрегат, объединяющий в себе перечисленные операции технологического процесса трубоукладки [4].

Цель исследования заключается в структурном и кинематическом анализе механизма погрузчика для определения скорости и ускорения его выходного звена, а также в определении теоретической зоны обслуживания манипуляционного устройства полуавтоматизированного погрузочно-транспортного агрегата [5, 6].

Основная часть

Полуавтоматизированный погрузочно-транспортный агрегат (рис. 1) установлен на раме 1. Отличие новой конструкции от существующих состоит в том, что погрузчик имеет два манипулятора последовательной структуры состоящих из исполнительных звеньев 2, гидроцилиндров 3, поворотных платформ 4. Следует отметить, что грузозахватные органы манипуляторов выполнены клещевыми, состоят из тяг 5, клещей 6, гидроцилиндра 7, шарнирного крепления 8, причем один из захватов содержит кольцевой сварочный аппарат 9 и рукав для подачи сварочного материала 10.

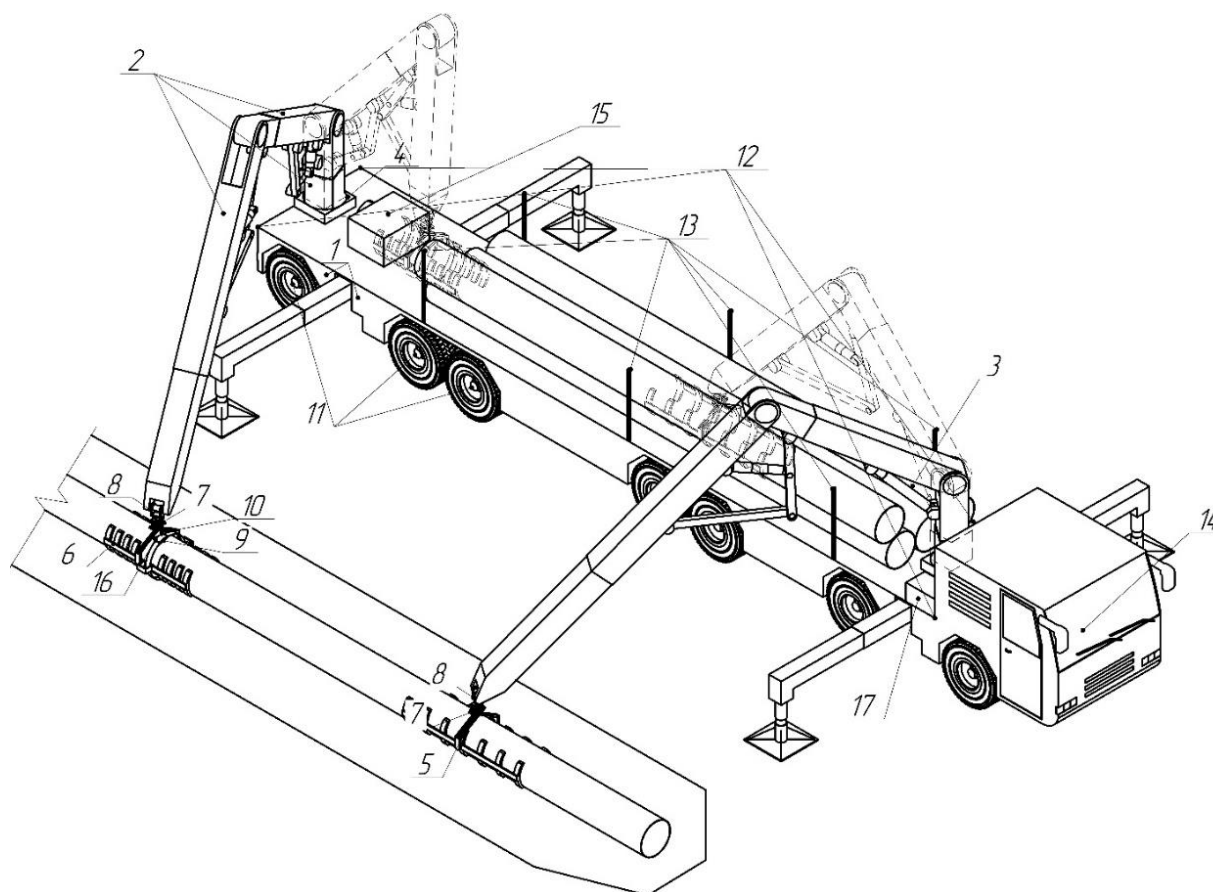


Рис. 1. Общий вид погрузочно-транспортного агрегата:

1 – рама; 2 – исполнительные звенья; 3, 7 – гидроцилиндры; 4 – поворотная платформа; 5 – тяга; 6 – клещи; 8 – шарнирное крепление; 9 – кольцевой сварочный аппарат; 10 – рукав подачи сварочного материала; 11 – шасси; 12 – кузов; 13 – стойки; 14 – блок управления; 15 – датчик контроля положения трубы; 16 – датчик контроля сварочного шва; 17 – гидрораспределитель

Шасси 11 погрузчика имеет колесную формулу 14×14, кузов погрузочно-транспортного агрегата состоит из прямоугольного основания 12 и вертикальных стоек 13. Также погрузчик содержит блок управления 14, датчик контроля положения трубы 15, датчик контроля сварочного шва 16 и гидрораспределитель 17 с электромагнитными клапанами управления.

Работа полуавтоматизированного погрузочно-транспортного агрегата осуществляется в несколько этапов (рис. 2).

Этап I. Прибытие погрузочно-транспортного агрегата на рабочую площадку: управляемый оператором полуавтоматизированный комплекс прибывает на место монтажа трубопровода.

Этап II. Приведение погрузочно-транспортного агрегата в рабочее положение: оператор с помощью пульта управления устанавливает погрузчик выдвиганием опор в рабочее положение [8].

Этап III. Укладка и монтаж трубопровода: оператор с помощью пульта управления приводит в движение манипуляторы последовательной структуры, находящиеся на прямоугольном основании 12, производя необходимое позиционирование грузозахватного органа к захватываемому объекту с помощью поворотной платформы 4, исполнительных звеньев 2 и гидроцилиндров 3. Далее тягами 5 и гидроцилиндрами 7 производится замыкание клещей 6, причем манипулятор, на котором установлен кольцевой сварочный аппарат 9, захватывает трубу в месте монтирования, а другой манипулятор захватывает трубу на расстоянии 8 м от центра первого грузозахватного органа, чтобы изгибающая нагрузка у трубы была минимальная. Захватываемая труба перемещается в место укладки. При этом соблюдаются строгая соосность и горизонтальность труб на свариваемом участке. Все действия на данном этапе технологического процесса осуществляются оператором. После в автоматическом режиме происходит сварка монтируемых трубопроводов и контроль сварочного шва датчиком контроля 16 [3, 7].

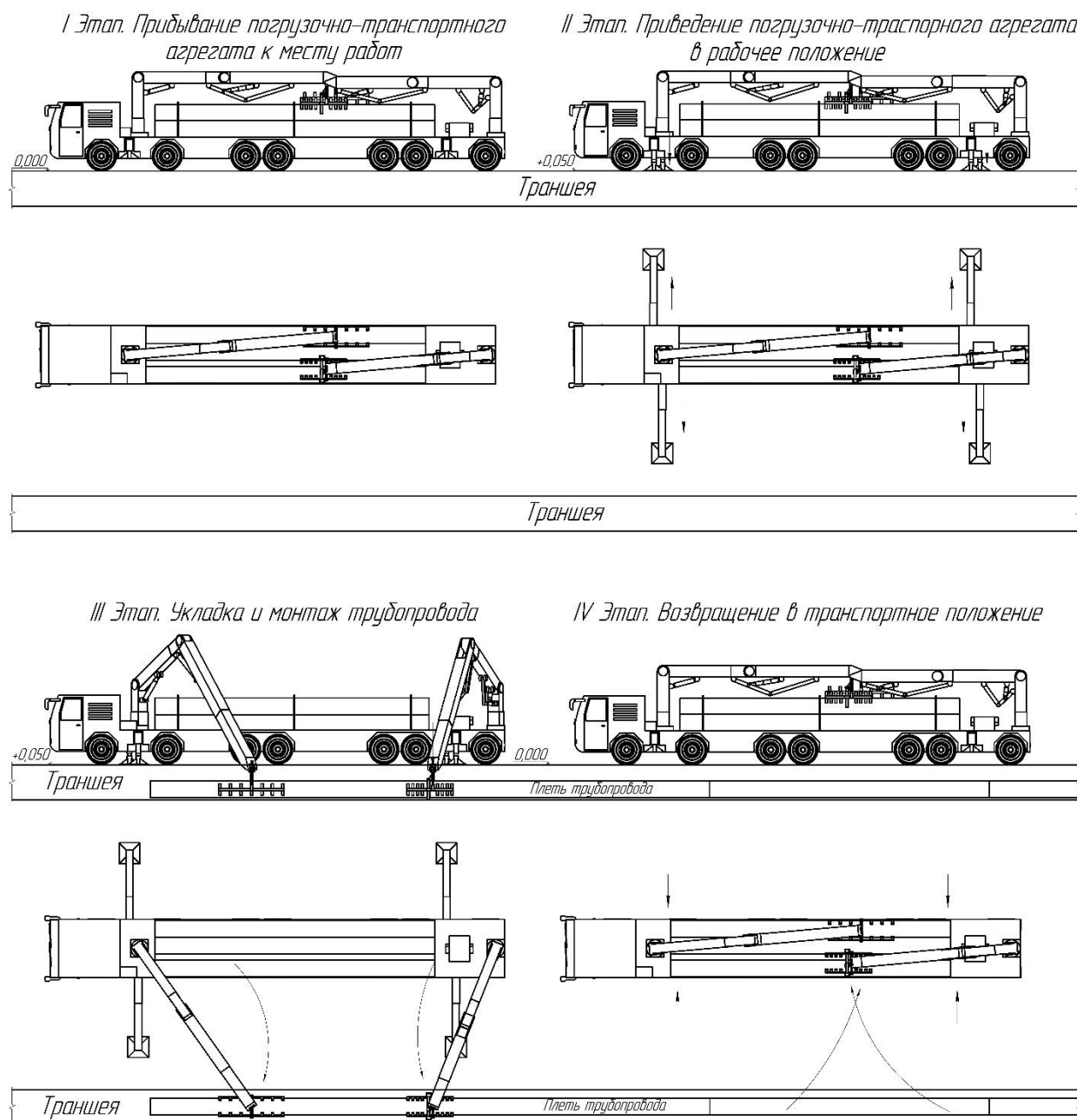


Рис. 2. Схема технологического процесса укладки и монтажа трубопровода

Этап IV. Возвращение в транспортное положение: по окончании процесса сварки подается сигнал в блок управления 14. В результате после обработки полученной информации с помощью гидрораспределителя 17 с клапанами электромагнитного управления производится автоматическое отпускание клещевыми грузозахватными органами захватываемой трубы, а затем возврат манипуляторов в исходное положение [9]. Далее машинист с помощью пульта управления поднимает пяты опор и передвигается вдоль траншеи к месту монтажа следующей трубы. Далее цикл повторяется с этапа II до момента окончания труб в кузове.

Таким образом, полуавтоматизированный погрузчик, имея два дополнительных манипулятора и клещевые грузозахватные органы, повышает эффективность выполнения технологических операций погрузки, разгрузки и транспортировки элементов трубопровода.

Основные задачи проектирования механизма погрузочно-транспортного агрегата включают определение структурных и кинематических параметров манипулятора погрузчика, а также расчет скоростей и ускорений выходного звена. Расчет скоростей и ускорений играет ключевую роль в различных областях науки и техники. Он необходим для анализа и оптимизации механических систем, обеспечения их надежности и безопасности, а также для разработки эффективных методов управления и прогнозирования их поведения [10].

Манипулятор погрузчика – пространственный механизм, состоящий из звеньев, образующих «механическую руку» с захватом в точке M (рис. 3) [2].

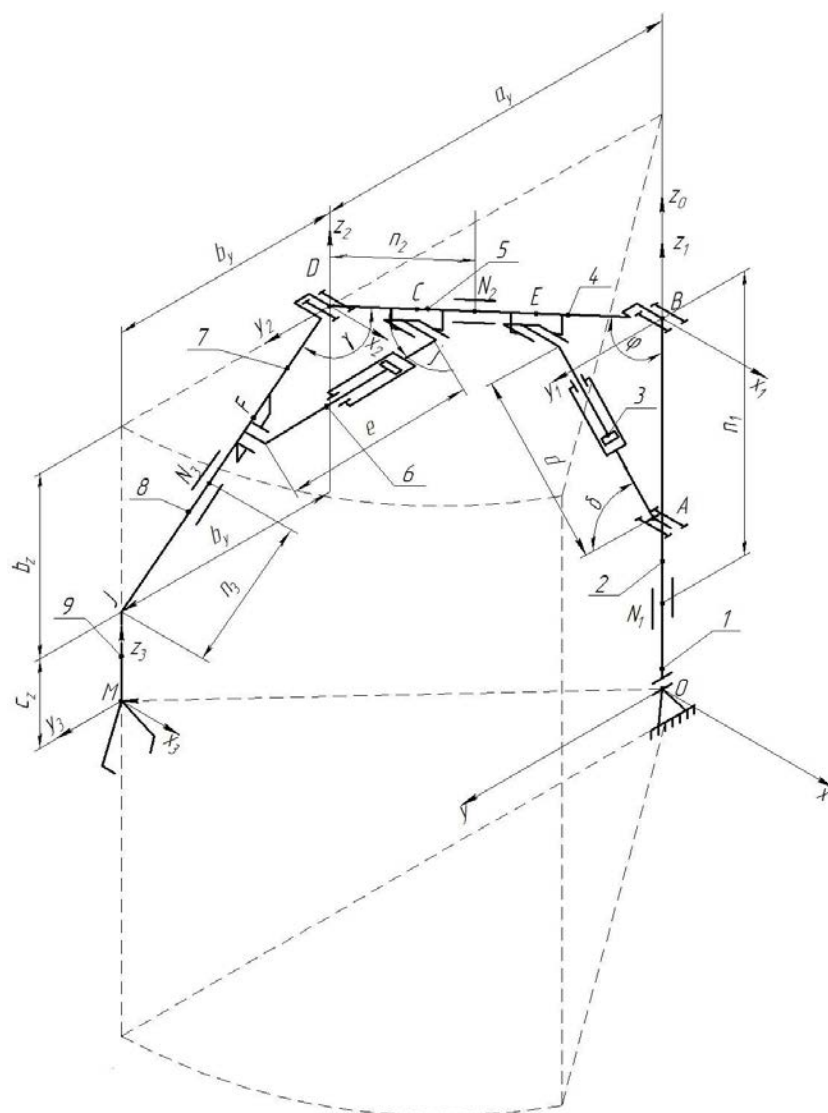


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора

Даны следующие уравнения движения для захвата:

$$y_M(t) = 8,249 - 0,2t, \quad (1)$$

$$z_M(t) = 5,947 - 0,2t. \quad (2)$$

Требуется определить углы γ и φ , что осуществляется в интервале времени $0 \leq t \leq \tau$. Для этого, применив аналитический метод, предварительно рассчитаем значения угловых скоростей и ускорений звеньев [1]. Дано: $BD = a$, $DJ = b$, $JM = c$.

По оси X движение отсутствует, но вдоль нее происходит поворот всего механизма. В начале механизм имеет координаты $X_0Y_0Z_0$, в конце $X_MY_MZ_M$.

Для положения манипулятора составляются векторные равенства, которые представляют собой уравнения связей. Эти равенства описывают взаимосвязь между положениями звеньев манипулятора и обеспечивают выполнение условий равновесия системы [2]:

$$\overline{OM} = \overline{OB} + \overline{BD} + \overline{DM}, \quad (3)$$

$$\overline{AE} = \overline{AB} + \overline{BE}, \quad (4)$$

$$\overline{CF} = \overline{CD} + \overline{DF}. \quad (5)$$

Осуществив проекции (3)–(5) на оси координат, составляем уравнение для определения закона

движения звеньев:

$$y_M(t) = a_y \cdot \sin(\pi - \varphi) + b_y \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right), \quad (6)$$

$$z_M(t) = b_y \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right) + c_z. \quad (7)$$

После дифференцирования уравнений (6)–(7) по времени получаем уравнения для угловых скоростей:

$$\dot{y}_M(t) = a_y \cdot \cos(\pi - \varphi) - b_y \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right), \quad (8)$$

$$\dot{z}_M(t) = b_y \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right). \quad (9)$$

После повторного дифференцирования (8)–(9) по времени уравнения определения угловых ускорений выглядят следующим образом:

$$\ddot{y}_M(t) = -a_y \cdot \sin(\pi - \varphi) - b_y \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right), \quad (10)$$

$$\ddot{z}_M(t) = -b_y \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right). \quad (11)$$

Для решения задачи на скорость и ускорение воспользуемся программным комплексом MathCAD. Исходные данные:

$$a := 3.3 \quad b := 3.1 \quad c := 0.44 \quad \varphi := 120 \text{ deg} \quad \gamma := 102 \text{ deg}.$$

Уравнения движения захвата:

$$yM(t) := a \cdot \sin(\pi - \varphi) + b \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right) - 0,2 \cdot t,$$

$$zM(t) := b \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right) + c - 0,2 \cdot t,$$

$$yMt(t) := a \cdot \cos(\pi - \varphi) - b \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right) - 0,2,$$

$$zMt(t) := b \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right) - 0,2,$$

$$yMtt(t) := -a \cdot \sin(\pi - \varphi) - b \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right),$$

$$zMtt(t) := -b \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right),$$

$$t := 0, 0,2 \dots 1.$$

$t =$	$yM(t) =$	$zM(t) =$	$yMt(t) =$	$zMt(t) =$	$yMtt(t) =$	$zMtt(t) =$
0	4,932	2,744	−0,854	1,874	−4,932	−2,304
0,2	4,892	2,704	−0,854	1,874	−4,932	−2,304
0,4	4,852	2,664	−0,854	1,874	−4,932	−2,304
0,6	4,812	2,624	−0,854	1,874	−4,932	−2,304
0,8	4,772	2,584	−0,854	1,874	−4,932	−2,304
1	4,732	2,544	−0,854	1,874	−4,932	−2,304

На начальном этапе исследования допускается вероятность заклинивания и потери устойчивости

механизма при выполнении операций погрузки, разгрузки и транспортировки грузов. Чтобы это предотвратить, нужно определить степень подвижности манипуляционного механизма погрузчика.

В данном случае структурная схема механизма состоит из восьми подвижных звеньев. Согласно условию нормальности количество звеньев должно соответствовать степени подвижности $W = N$. Для определения степени подвижности манипуляционного механизма погрузчика следует применить формулу Сомова – Малышева [2]:

$$W = 6n - 5p_5 - 3p_3 = 4, \quad (12)$$

где $W(n, p_i)$ – степень подвижности механизма погрузочно-транспортного агрегата; n – подвижные звенья манипуляционного механизма; p_i – кинематические пары i -й подвижности.

Чтобы определить конфигурацию зоны обслуживания манипуляционного механизма полуавтоматического погрузочно-транспортного комплекса, требуется составить систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} x_M \leftarrow \left(a \cdot \sin(\pi - \varphi) + b \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right) \right) \cdot \sin(n), \\ y_M \leftarrow \left(a \cdot \sin(\pi - \varphi) + b \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right) \right) \cdot \cos^2(n), \\ z_M \leftarrow \left(b \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \gamma - \varphi\right) + c \right) \cdot \cos(n) \cdot \sin(n), \end{cases} \quad (13)$$

где n – поворот по оси X , $n = 2\pi$.

Применение уравнений связи позволяет сформировать зону обслуживания рассчитываемого погрузочно-транспортного агрегата (рис. 4) [2]. Все вычисления для облегчения и повышения точности производятся в программном комплексе MathCAD.

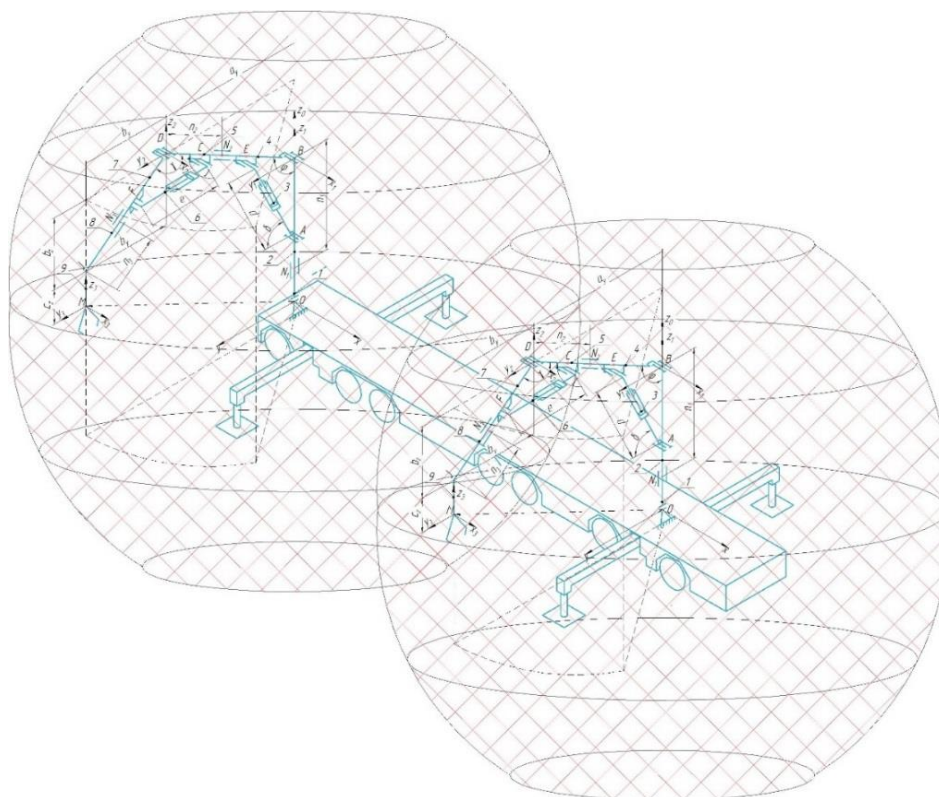


Рис. 4. Снимок экрана с программного комплекса MathCAD рабочей зоны обслуживания выходного звена грузозахватного органа погрузочно-транспортного агрегата

Таким образом, из формы рабочей зоны манипулятора на рис. 4 видно, что точка M перемещается по оси X от $\min(X) = -6,4$ м до $\max(X) = 6,4$ м, по оси Y от $\min(Y) = -6,4$ м до $\max(Y) = 6,4$ м, по оси Z от $\min(Z) = -1,743$ м до $\max(Z) = 1,743$ м.

Выводы

В ходе исследований была создана конструкция погрузочно-транспортного механизма, разработан технологический процесс перемещения укладки и монтажа труб, рассчитана теоретическая зона обслуживания с численным решением в программном комплексе MathCAD. В результате кинематического анализа механизма с определением скоростей и ускорений исполнительных звеньев установлено, что коэффициент производительности предложенного полуавтоматизированного погрузочно-транспортного агрегата составляет $K = 2,4$ в сравнении с базовым аналогом трубоукладчика – ЧТЗ/ТР12/ТР20.

Список литературы

- 1 **Белов, М. И.** Теория механизмов и машин : учебное пособие / М. И. Белов, С. В. Сорокин. – 2-е изд. – Москва : РИОР : ИНФРА-М, 2020. – 322 с. – ISBN 978-5-369-01742-5 (РИОР). – ISBN 978-5-16-013598-5 (ИНФРА-М).
- 2 Кинематический и динамический анализ плоских рычажных механизмов : учебное пособие / А. А. Тувин [и др.]. – Иваново : ИвГПУ, 2017. – 112 с. – ISBN 978-5-88954-456-2.
- 3 **Барахов, В. М.** Управление многозвенным манипулятором с распределенными параметрами / В. М. Барахов, Ю. Н. Санкин // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 8. – С. 57–67. – ISSN 0005-2310.
- 4 **Николаев, М. Е.** Обоснование параметров клещевого захвата погрузочно-транспортного агрегата / М. Е. Николаев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса : наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 1 (61). – С. 431–441. – DOI 10.32786/2071-9485-2021-01-41.
- 5 **Николаев, М. Е.** Погрузочно-транспортный агрегат с увеличенной рабочей зоной / М. Е. Николаев, Е. Ю. Козловцева, А. В. Калачев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 16–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_16.
- 6 **Жадановский, Б. В.** Организация строительно-монтажных и погрузочно-разгрузочных работ в строительстве автомобильными кранами / Б. В. Жадановский, С. А. Синенко, И. М. Мирошникова // Системные технологии. – 2018. – № 2 (27). – С. 41–48. – ISSN 2227-5398.
- 7 Распределенная система управления погрузочным манипулятором параллельно-последовательной структуры / И. А. Несмиянов [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса : наука и высшее профессиональное образование. – 2017. – № 1 (45). – С. 260–266. – ISSN 2071-9485.
- 8 **Glazunov, V. A.** The control complex robotic system on parallel mechanism / V. A. Glazunov, S. V. Kheylo, A. V. Tsarkov // Studies in Systems, Decision and Control. – 2019. – Vol. 174. – P. 137–

References

- 1 **Belov, M. I.** Theory of mechanisms and machines : a textbook / M. I. Belov, S. V. Sorokin. – 2nd ed. – Moscow : RIOR : INFRA-M, 2020. – 322 p. – ISBN 978-5-369-01742-5 (RIOR). – ISBN 978-5-16-013598-5 (INFRA-M).
- 2 Kinematic and dynamic analysis of flat lever mechanisms : a textbook / A. A. Tuvin [at al.]. – Ivanovo : IvSPU, 2017. – 112 p. – ISBN 978-5-88954-456-2.
- 3 **Barakhov, V. M.** Control of a multi-link manipulator with distributed parameters / V. M. Barakhov, Yu. N. Sankin // Automation and telemechanics. – 2007. – No. 8. – P. 57–67. – ISSN 0005-2310.
- 4 **Nikolaev, M. E.** Substantiation of the parameters of the pincer grip of the loading and transport unit / M. E. Nikolaev // Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex : Science and Higher Education. – 2021. – No. 1 (61). – P. 431–441. – DOI 10.32786/2071-9485-2021-01-41.
- 5 **Nikolaev, M. E.** Loading and transport unit with an enlarged working area / M. E. Nikolaev, E. Y. Kozlovtsseva, A. V. Kalachev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 16–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_16.
- 6 **Zhadanovsky, B. V.** Organization of construction and assembly and loading and unloading operations in construction by automobile cranes / B. V. Zhadanovsky, S. A. Sinenko, I. M. Miroshnikova // System Technologies. – 2018. – No. 2 (27). – P. 41–48. – ISSN 2227-5398.
- 7 Distributed control system for a parallel-sequential structure loading manipulator / I. A. Nesmiyanov [et al.] // Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education. – 2017. – No. 1 (45). – P. 260–266. – ISSN 2071-9485.
- 8 **Glazunov, V. A.** The control complex robotic system on parallel mechanism / V. A. Glazunov, S. V. Kheylo, A. V. Tsarkov // Studies in Systems, Decision and Control. – 2019. – Vol. 174.

146. – DOI 10.1007/978-3-319-99759-9_11.

9 **Theodoridis, D. C.** A new adaptive neuro-fuzzy controller for trajectory tracking of robot manipulators / D. C. Theodoridis, Y. S. Boutalis, M. A. Christodoulou // International Journal of Robotics and Automation. – 2011. – Vol. 26, No. 1. – P. 64–75. – DOI 10.2316/Journal.206.2011.1.206-3401.

10 Justification parameters and planning capture trajectories for robotic loading and transport / M. Nikolaev, I. Nesmianov, V. Zhoga, A. Ivanov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 245. – P. 235–246. – DOI 10.1007/978-981-16-3349-2_20.

– P. 137–146. – DOI 10.1007/978-3-319-99759-9_11.

9 **Theodoridis, D. C.** A new adaptive neuro-fuzzy controller for trajectory tracking of robot manipulators / D. C. Theodoridis, Y. S. Boutalis, M. A. Christodoulou // International Journal of Robotics and Automation. – 2011. – Vol. 26, No. 1. – P. 64–75. – DOI 10.2316/Journal.206.2011.1.206-3401.

10 Justification parameters and planning capture trajectories for robotic loading and transport / M. Nikolaev, I. Nesmianov, V. Zhoga, A. Ivanov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 245. – P. 235–246. – DOI 10.1007/978-981-16-3349-2_20.

M. E. Nikolaev, V. A. Perfilov, S. S. Kowryzhko, Y. R. Yakutkin, A. S. Dudnikov

SEMI-AUTOMATED LOADING AND TRANSPORT UNIT

Abstract. In order to optimize the technological operations of oil and gas pipeline construction (loading, transportation and installation), an integrated system with the introduction of partial automation elements is proposed, implemented in the form of a semi-automated loading and transport unit. The design scheme of the unit is based on two manipulators of a sequential structure, the ends of which are equipped with clamp-type grapples. A distinctive feature of the loading and transport unit design is the presence of an annular welding machine in one of the lifting mechanisms. Partial automation of the process consists in the fact that welding of the mounted elements, return of the manipulators to their original position at specified coordinates and capture of the pipeline from the body are carried out automatically, which increases the productivity of the proposed unit design.

The technological process of moving laying and installing pipes using the mechanism developed by the authors is considered. A theoretical service area with a numerical solution in the MathCAD software package is calculated. A kinematic analysis of the mechanism was carried out with the determination of the speeds and accelerations of the actuating links. As a result, the performance coefficient of the proposed semi-automated loading and transport unit $K = 2.4$ was established in comparison with the basic analog of the pipelayer – CHTZ/TR12/TR20.

Keywords: semi-automated loading and transport unit, manipulator, cargo handling, kinematics, service area, degree of mobility.

For citation: Semi-automated loading and transport unit / M. E. Nikolaev, V. A. Perfilov, S. S. Kowryzhko [et. al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putei Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 87–95. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_87.

Сведения об авторах

Николаев Максим Евгеньевич

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

Перфилов Владимир Александрович

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,

Information about the authors

Nikolaev Maxim Evgenievich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IAaC VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

Perfilov Vladimir Aleksandrovich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IAaC VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: vladimirperfilov@mail.ru

Коврыжко Сергей Сергеевич

Институт архитектуры и строительства Волго-
градского государственного технического уни-
верситета (ИАиС ВолгГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
студент,
e-mail: kowryzhcko@yandex.ru

Якуткин Ярослав Родионович

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолгГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
студент,
e-mail: yyakutkin@gmail.com

Дудников Алексей Сергеевич

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолгГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
студент,
e-mail: alexdud2014@yandex.ru

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of Chair,
e-mail: vladimirperfilov@mail.ru

Kowryzhko Sergey Sergeevich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IAaC VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Student,
e-mail: kowryzhcko@yandex.ru

Yakutkin Yaroslav Rodionovich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IAaC VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Student,
e-mail: yyakutkin@gmail.com

Dudnikov Alexey Sergeevich

Institute of Architecture and Construction
of Volgograd State Technical University
(IAaC VSTU),
Chair “Oil and Gas Structures”,
Student,
e-mail: alexdud2014@yandex.ru

В. Н. Сызранцев, К. В. Сызранцева, И. С. Сердюк

АНАЛИЗ САМОУСТАНОВКИ КОЛЕС ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С АРОЧНЫМИ ЗУБЬЯМИ

Аннотация. Цилиндрические передачи с арочными зубьями позволяют кратно увеличить долговечность по контактной и изгибной прочности передач силовых приводов энергонасыщенных машин, работающих в условиях неизбежного угла перекаса осей. Передачи с арочными зубьями обладают свойством компенсации угла перекаса путем осевого перемещения (самоустановки) одного из колес при обеспечении отсутствия кромочного контакта зубьев в зацеплении. В работе предложена приближенная зависимость для расчета величины смещения точки касания (погрешность не более 1...5 %) арочных зубьев в зацеплении по активной поверхности арочного зуба шестерни в направлении оси ее вращения. Для тяговой цилиндрической передачи электровоза с различной степенью локализации контакта арочных зубьев выполнен анализ величины самоустановки колеса с арочными зубьями, компенсирующей перекас (0, 1', 2', ..., 7') зубьев в зацеплении, а также величины смещения полуколес с целью получения в зацеплении адаптивной цилиндрической передачи с арочными зубьями двух зон контакта.

Ключевые слова: цилиндрическая передача, арочные зубья, самоустановка.

Для цитирования: Сызранцев, В. Н. Анализ самоустановки колес цилиндрических передач с арочными зубьями / В. Н. Сызранцев, К. В. Сызранцева, И. С. Сердюк // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 96–105. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_96.

Введение

Приводы энергонасыщенных машин характеризуются высокой податливостью корпусов, деталей и звеньев передач. В следствие чего прямые, косые и шевронные зубья колес цилиндрических передач работают в условиях неизбежного угла перекаса (γ) осей вращения колеса и шестерни, нарушающего линейный характер касания активных поверхностей зубьев в зацеплении и приводящего к точечному (кромочному) контакту зубьев на внешнем их торце. При этом передаточная функция цилиндрической передачи приобретает пилообразную форму и передача перестает быть сопряженной [1].

Эффективным путем повышения нагрузочной способности и увеличения ресурса цилиндрических передач приводов энергонасыщенных машин в отмеченных условиях эксплуатации является использование колес с зубьями арочной формы (рис. 1) с начальным точечным касанием их активных поверхностей [2–4]. Изгибная прочность зубьев арочной формы на 20...24 % выше по сравнению с косыми и прямыми зубьями [5]. Характер контакта активных поверхностей арочных зубьев в продольном их направлении является выпукло-вогнутым, что не только снижает опасность «выхода» точки касания арочных зубьев на торец зуба, но и обеспечивает более рациональное распределение напряжений по площадке контакта в условиях угла перекаса. Цилиндрические передачи с арочными зубьями могут быть выполнены самоустанавливающимися, что позволяет им адаптироваться к меняющемуся силовому потоку и погрешностям положения [2, 3]. К настоящему времени известно [2–4] полтора десятка различных способов изготовления арочных зубьев колес цилиндрических передач, отличающихся как применяемыми инструментами, так и формообразующими движениями. В отличие от прямозубых и косозубых колес, геометрия активных поверхностей зубьев арочной формы и характеристики их зацепления в передаче зависят от способа формообразования арочных зубьев [2, 3]. Исследования геометрических особенностей различных процессов нарезания арочных зубьев, геометрических характеристик их контактирования в передаче, решение задач расчета контактной и изгибной прочности арочных зубьев выполняются как отечественными [2, 3], так и зарубежными учеными [4]. В последнее время активные исследования различных аспектов цилиндрических передач с арочными зубьями выполняются специалистами Китайской Народной Республики [5–10].

Главное назначение цилиндрических передач с арочными зубьями заключается в возможности компенсации неизбежного в силовых приводах угла перекаса зубьев путем осевого перемещения (самоустановки) одного из колес при обеспечении отсутствия кромочного контакта в зацеплении. В цилиндрических передачах с шевронными зубьями самоустановка происходит под действием осевой силы в зацеплении, возникающей вследствие значительного угла наклона зубьев. В передачах с арочными

зубьями из-за смещения активной действующей линии в зацеплении по поверхности арочного зуба в зону с малым углом его наклона, самоустановка колеса ограничена. Для решения этой проблемы предложена адаптивная передача [11] с арочными зубьями, в которой, по аналогии с шевронной передачей, реализуются две зоны контакта, причем возникающие в этих зонах осевые силы друг друга уравнивают. Несмотря на актуальность анализа явления самоустановки колес с арочными зубьями цилиндрических передач, такие исследования до настоящей работы не выполнялись.

Известно [2, 3], что определение точек контакта в зацеплении арочных зубьев цилиндрической передачи, при наличии погрешностей изготовления и сборки ее элементов и закона движения, в теории пространственных передач является содержанием обратной задачи зацепления. Основой обратной задачи [12] является решение системы семи трансцендентных уравнений (совпадение трех проекций радиусов векторов точек контакта на поверхности зуба шестерни и на поверхности зуба колеса, двух проекций ортов нормалей на поверхности зуба шестерни и поверхности зуба колеса в точке контакта, двух уравнений зацепления, описывающих процесс формообразования поверхностей зуба шестерни и зуба колеса).



Рис. 1. Цилиндрическая передача с арочными зубьями

В настоящей статье исследуется самоустановка зубчатых колес с арочными зубьями цилиндрических передач, формообразование которых осуществляется круговыми резцовыми головками методом обката с единичным делением [12]. В отличие от многих других, данный способ имеет принципиально важное технологическое преимущество. Его реализация не требует специализированных зуборезных станков и возможна на универсальных станках с числовым программным управлением.

В среднем сечении арочного зуба, в котором угол его наклона равен нулю, профиль зуба является эвольвентным. В системе координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, жестко связанной с шестерней, среднее сечение поверхности ее арочного зуба описывается зависимостями [12]:

$$\begin{aligned} x_1 &= r_{w1} \left[\sin \varphi_1 - \varphi_1 \cos \alpha_0 \cos(\varphi_1 + \alpha_0) \right], \\ y_1 &= -r_{w1} \left[\cos \varphi_1 + \varphi_1 \cos \alpha_0 \sin(\varphi_1 + \alpha_0) \right], \\ R_1 &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Среднее сечение арочного зуба колеса в системе координат $S_2(x_2, y_2, z_2)$, жестко с ним связанной, описывается выражениями:

$$x_2 = r_{w2} \left[\sin \varphi_2 - \varphi_2 \cos \alpha_0 \cos(\varphi_2 + \alpha_0) \right], \quad (2)$$

$$y_2 = r_{w2} [\cos \varphi_2 + \varphi_2 \cos \alpha_0 \sin(\varphi_2 + \alpha_0)],$$

$$R_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}.$$

В формулах (1) и (2) обозначено: r_{w1}, r_{w2} – радиусы начальных окружностей шестерни и колеса, R_1, R_2 – модули радиус-векторов точек профиля арочных зубьев шестерни и колеса в среднем сечении арочного зуба; α_0 – угол профиля исходного производящего контура; φ_1, φ_2 – углы поворота шестерни и колеса в процессе формообразования поверхностей арочных зубьев и их зацепления в передаче.

Начальный (φ_{1n}) и конечный (φ_{1k}) углы поворота шестерни, определяющие активный участок профиля ее арочного зуба, рассчитываются по зависимостям:

$$\varphi_{1n} = \frac{-\sin 2\alpha_0 + \sqrt{\sin^2 2\alpha_0 - 4\cos^2 \alpha_0 \left[1 - (r_{a1}/r_{w1})^2\right]}}{2\cos^2 \alpha_0},$$

$$\varphi_{1k} = \frac{\sin 2\alpha_0 - \sqrt{\sin^2 2\alpha_0 - 4\cos^2 \alpha_0 \left[1 - (r_{a2}/r_{w2})^2\right]} \cdot r_{w2}}{2r_{w1} \cos^2 \alpha_0}, \quad (3)$$

где r_{a1}, r_{a2} – радиусы окружностей вершин соответственно шестерни и колеса.

Радиус вектор R_1 точки касания в среднем сечении поверхности арочного зуба шестерни рассчитывается по формулам (1) при изменении угла φ_1 в диапазоне $\varphi_{1n} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1k}$, при этом $\varphi_2 = \varphi_1 r_{w1} / r_{w2}$.

Решение обратной задачи для рассматриваемого способа нарезания арочных зубьев представлено в работах [12, 13]. Обратная задача позволяет вскрыть геометро-кинематические характеристики зацепления арочных зубьев при наличии погрешностей их изготовления и сборки, получить необходимые исходные данные (проекции точек контакта, главные приведенные кривизны) для расчета нагруженности зацепления арочных зубьев. Поскольку задача оценки распределения нагрузки в контакте арочных зубьев является еще более сложной, нежели обратная задача, на этапе проектного расчета цилиндрической передачи с арочными зубьями необходимо иметь возможность приближенной оценки геометрических характеристик зацепления арочных зубьев при наличии угла перекоса, исключающей необходимость решения систем трансцендентных уравнений обратной задачи.

Материалы и методы

Традиционно для цилиндрической передачи с арочными зубьями на этапе ее проектирования известны следующие параметры: число зубьев шестерни z_1^* и колеса z_2^* , нормальный модуль m_n , коэффициент головки зуба h_a , коэффициент радиального зазора c_0 , коэффициент смещения для шестерни χ_1 , коэффициент смещения для колеса χ_2 , расчетный радиус резцовой головки для шестерни r_{g1} и колеса r_{g2} , ширина зуба b_w . Геометрические параметры колеса и шестерни цилиндрической передачи с арочными зубьями рассчитываются по методике, представленной в работе [3]. При заданном угле перекоса γ для расчета величины смещения (z_0') точки касания арочных зубьев в зацеплении по активной поверхности арочного зуба шестерни в направлении оси z_1 вращения шестерни, относительно среднего сечения зуба, получена следующая приближенная зависимость:

$$z_0' = K_z \left[\operatorname{tg}(\gamma \cdot \cos \alpha_w) + (\sin(\gamma \cdot \cos \alpha_w) / k_{11} + \Delta_z) / 2r_{g2} \right] / (k_{22} - k_{12}) + \Delta_z, \quad (4)$$

где Δ_z – смещение шестерни вдоль оси вращения z_1 ; α_w – угол зацепления в передаче; K_z – корректирующий коэффициент; k_{11}, k_{12} – главные кривизны вогнутой стороны зуба шестерни в профильном и продольном направлениях [13]; k_{22} – главная кривизна выпуклой стороны зуба колеса в продольном направлении арочного зуба [13]. В среднем сечении арочного зуба шестерни и колеса, в котором угол наклона зуба равен нулю, кривизны k_{11}, k_{12}, k_{22} рассчитываются по формулам:

$$k_{11} = -\frac{1}{r_{w1}(\sin \alpha_0 - \varphi \cos \alpha_0)}, k_{12} = -\frac{\cos \alpha_0}{r_{w1}\varphi_1 \sin^2 \alpha_0 - r_{g1}}, k_{22} = -\frac{\cos \alpha_0}{r_{w2}\varphi_2 \sin^2 \alpha_0 - r_{g2}}. \quad (5)$$

Отметим, что поскольку входящие в формулу (5) кривизны в среднем сечении арочных зубьев шестерни и колеса зависят от углов φ_1 и φ_2 , определяющих, как показано в работах [12, 13], фазу зацепления в сопряженной передаче, то величина смещения z'_0 зависит, в том числе, и от фазы зацепления.

Выражение (4) позволяет оценить величину смещения z'_0 точки контакта по поверхности арочного зуба шестерни в любой заданной фазе зацепления в зависимости от угла перекося. В качестве примера, используя формулу (4), определим величины смещения (z'_0) точки контакта при изменении угла перекося $\gamma = 0, 1', 2', \dots, 7'$ для зацепления арочных зубьев в полюсе ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$) тяговой цилиндрической передачи электровоза ЭР9П [14], имеющей параметры: $z_1^* = 23$, $z_2^* = 73$, $m_n = 10$ мм, $\alpha_0 = 20^\circ$, $h_a = 1$, $c_0 = 0,25$, $\chi_1 = 0,44$, $\chi_2 = 0,042$, $r_{g1} = 220$ мм, $r_{g2} = 215$ мм, $b_w = 120$ мм. Шестерня передачи имеет следующие конструктивные параметры: толщина ступицы 50 мм, толщина диска 120 мм, смещение оси диска относительно оси венца 0 мм. В этой передаче (передача 1) локализация контакта высокая. На рис. 2 в координатах $\gamma - z'_0$ линией с черными кружками показаны результаты расчета по формуле (4). Здесь же кружками обозначены смещения точек контакта по активной поверхности арочного зуба шестерни в направлении оси ее вращения z_1 в передаче [12], полученные в результате решения обратной задачи зацепления с использованием методов теории пространственных зубчатых зацеплений и соответствующего программного обеспечения [12].

Аналогичные результаты для этой же передачи с арочными зубьями, но с более плотным контактом в зацеплении: $r_{g1} = 220$ мм, $r_{g2} = 218$ мм (передача 2) – показаны на рис. 2 линией с черными треугольниками, а прозрачными треугольниками – результаты расчета на основе решения обратной задачи [12].

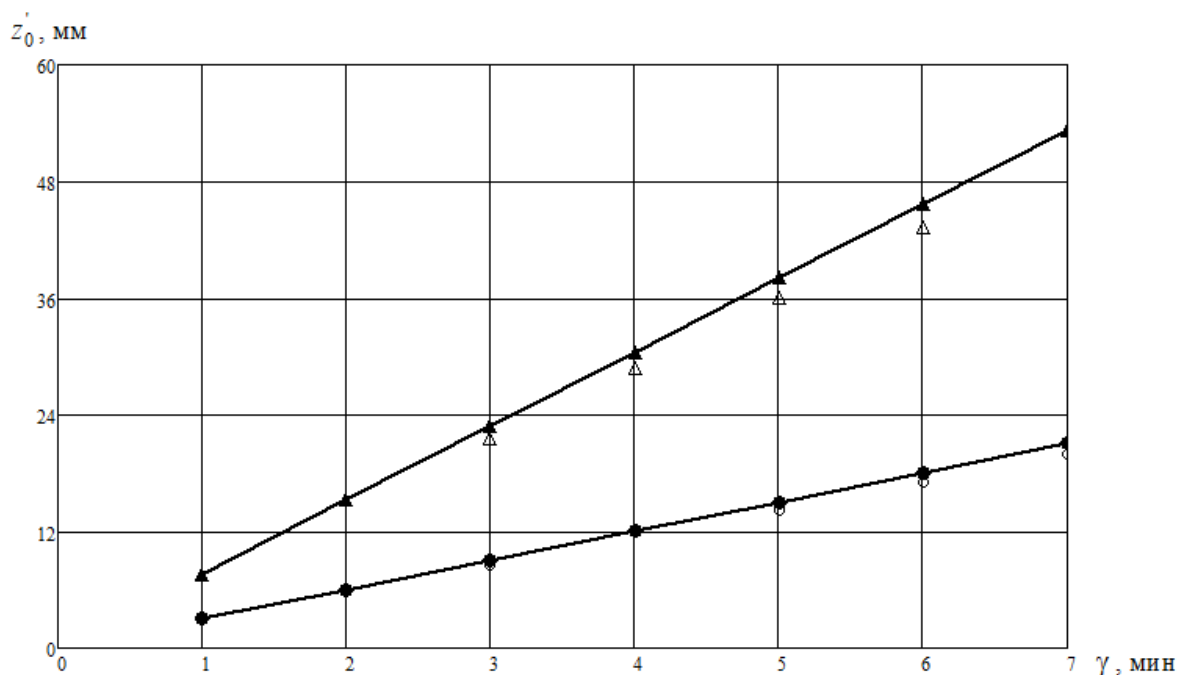


Рис. 2. Смещение точки касания по поверхности арочного зуба шестерни для зацепления в полюсе в зависимости от угла перекося

Геометрия арочных зубьев шестерни и колеса по профилю зубьев, в отличие от прямозубых и косозубых передач, изменяется [2, 12, 13]. Следствием этого, при $\gamma \neq 0$, является различная величина смещения точки касания по поверхности арочного зуба шестерни в зависимости от фазы зацепления. На основании формулы (4) с учетом зависимостей (5) для диапазона изменения $\varphi_{1n} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1k}$ при $\gamma = 1', 2', \dots, 7'$ были выполнены расчеты z'_0 для передачи 1, показанные на рис. 3, а для передачи 2 на

рис. 4. На рис. 3 и 4 слева показан профиль зуба шестерни, для точек которого рассчитывалась величина z'_0 при фиксированном угле перекося.

Другой вариант использования зависимости (4) заключается в возможности расчета для передачи с арочными зубьями, работающей в условиях известного угла перекося γ , величины смещения (Δ_z) вдоль оси вращения шестерни или колеса, обеспечивающего расположение точки контакта в среднем сечении арочного зуба. Данная задача позволяет оценить величину необходимого смещения элементов передачи при полной ее самоустановке. Для решения этой задачи в формуле (4) положим $z'_0 = 0$ и решим ее относительно Δ_z . В результате получим:

$$\Delta_z = -K_z \left[2r_{g2} \operatorname{tg}(\gamma \cdot \cos \alpha_w) + \sin(\gamma \cdot \cos \alpha_w) / k_{11} \right] / \left[K_z + 2r_{g2} (k_{22} - k_{12}) \right]. \quad (6)$$

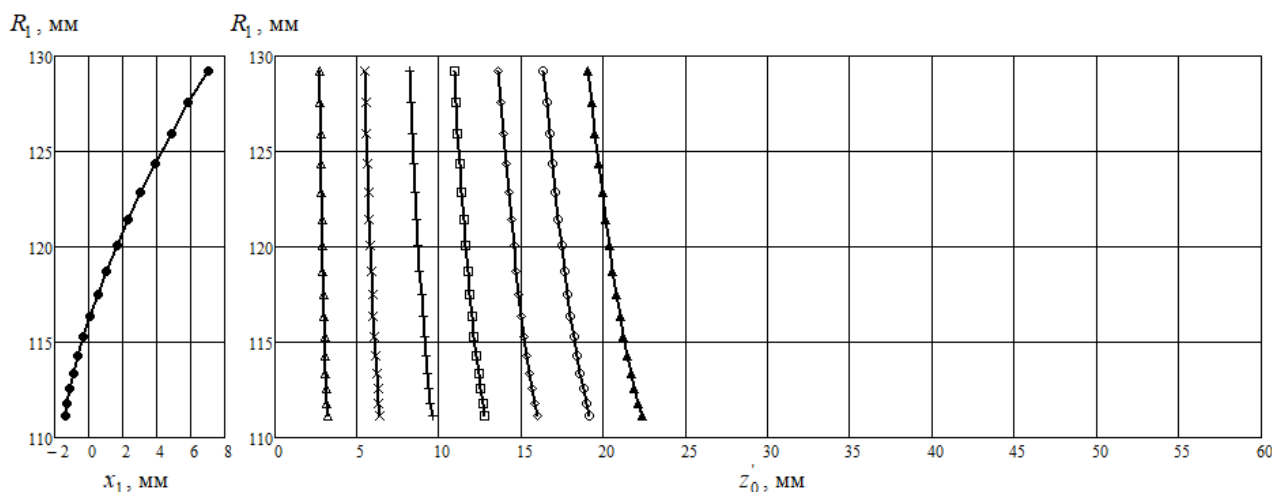


Рис. 3. Смещение точки касания по поверхности арочного зуба шестерни в различных фазах зацепления для передачи 1 в зависимости от угла перекося $\gamma = 1', 2', \dots, 7'$

Рассчитанная по зависимости (6) величина Δ_z используется для оценки максимального осевого смещения при полной самоустановке колес цилиндрической передачи с арочными зубьями. Воспользовавшись данными обоих вариантов вышерассмотренной цилиндрической передачи с арочными зубьями, по формуле (6) определим величины Δ_z для касания арочных зубьев в полюсе при различных углах перекося $\gamma = 0, 1', 2', \dots, 7'$ (рис. 5).

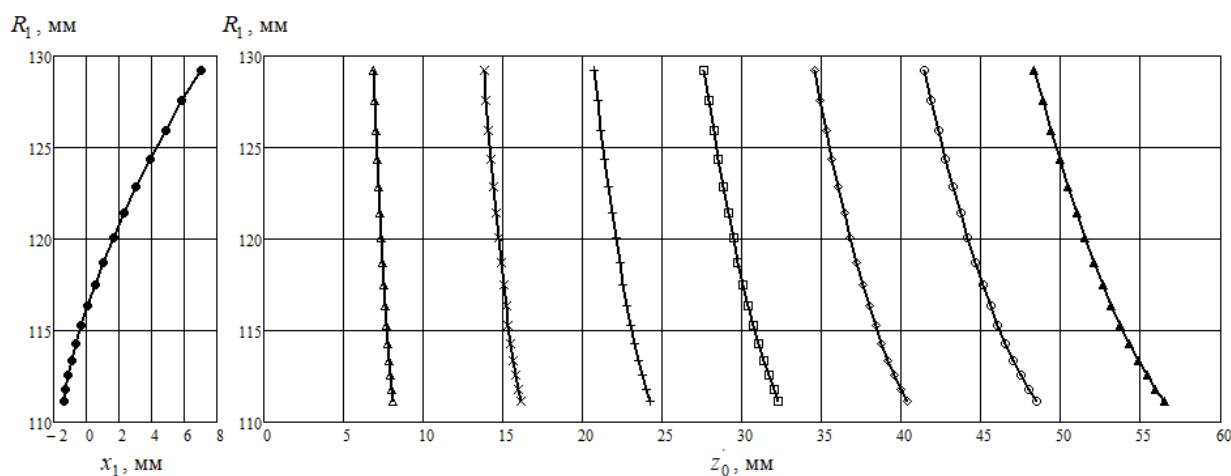


Рис. 4. Смещение точки касания по поверхности арочного зуба шестерни в различных фазах зацепления для передачи 2 в зависимости от угла перекося $\gamma = 1', 2', \dots, 7'$

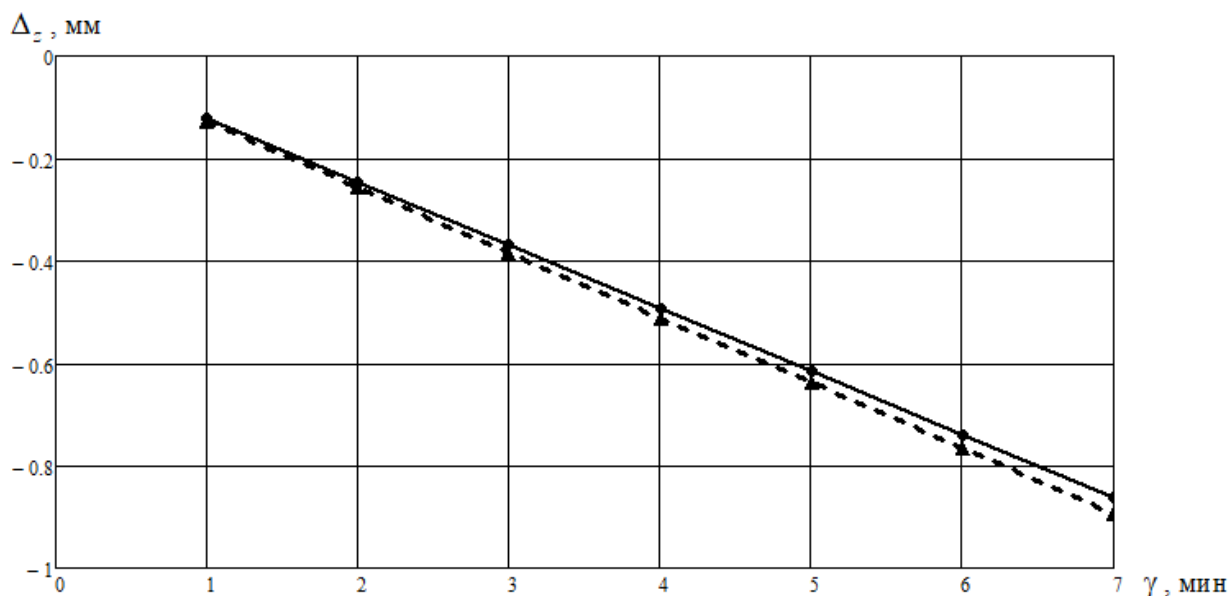


Рис. 5. Функция $\Delta_z = \Delta_z(\gamma)$, передача 1 (кружки), передача 2 (треугольники)

В процессе работы передачи точки контакта поверхностей арочных зубьев шестерни и колеса в зависимости от фазы зацепления перемещаются по профилю зубьев, а в зависимости от угла перекоса – в продольном их направлении. Известно [2, 3, 12], что каждый способ формообразования арочных зубьев характеризуется своими геометрическими параметрами активных поверхностей, которые при фиксированном угле перекоса могут приводить в течение всего времени контактирования пары зубьев к различным величинам смещения Δ_z . Для оценки изменения Δ_z при фиксированных углах перекоса $\gamma = 0, 1', 2', \dots, 7'$ в течение полного цикла зацепления пары арочных зубьев передач ($\varphi_{1n} \leq \varphi_1 \leq \varphi_{1k}$) с использованием формулы (6) для двух вариантов исследуемой передачи выполнены расчеты максимальной ($\Delta_{z\max}$) и минимальной ($\Delta_{z\min}$) величины Δ_z при полной самоустановке передачи, представленные в таблице.

Предельные величины осевого смещения элементов передач при полной самоустановке

Параметры	Угол перекоса арочных зубьев, минуты						
	1	2	3	4	5	6	7
Передача 1 $r_{g1} = 220$ мм, $r_{g2} = 215$ мм							
$\Delta_{z\min}$	–0,126	–0,252	–0,378	–0,504	–0,629	–0,755	–0,881
$\Delta_{z\max}$	–0,139	–0,279	–0,418	–0,557	–0,696	–0,836	–0,975
Передача 2 $r_{g1} = 220$ мм, $r_{g2} = 218$ мм							
$\Delta_{z\min}$	–0,124	–0,248	–0,372	–0,497	–0,621	–0,745	–0,869
$\Delta_{z\max}$	–0,137	–0,275	–0,412	–0,550	–0,687	–0,824	–0,962

Еще один вариант использования формулы (4) заключается в определении величины Δ_z для случая расположения точки контакта в заданной зоне на активной поверхности арочного зуба шестерни. Данная задача возникает при проектировании адаптивной цилиндрической передачи [2, 11, 16], колесо которой состоит из двух полуколес, имеющих возможность осевого перемещения друг относительно друга. Контактное взаимодействие арочных зубьев в адаптивной передаче осуществляется в двух зонах, расположенных по разные стороны от среднего сечения арочного зуба шестерни по его длине. Подобно шевронной передаче в адаптивной передаче с арочными зубьями осевые силы в зацеплении правого и левого полуколес уравниваются, при этом обеспечивается возможность компенсации угла перекоса путем перемещения полуколес друг относительно друга вдоль оси вращения. Характер касания арочных зубьев в адаптивной передаче является точечным, что позволяет, по аналогии с коническими передачами с круговыми зубьями, исключить возможность опасного кромочного контакта в зацеплении и обеспечить повышение нагрузочной способности передач в условиях угла перекоса зубьев.

Основой геометрического расчета адаптивной цилиндрической передачи с арочными зубьями является обеспечение в заданной фазе зацепления касания зубьев в середине левого и правого полуколеса. Для решения данной задачи в формуле (4) зададим $z'_0 = b_w / 4$, $\gamma = 0$ и разрешим полученное уравнение относительно Δ_z :

$$\Delta_z = \left[r_{g2} b_w (k_{22} - k_{12}) / 2 \right] / \left[K_z + 2r_{g2} (k_{22} - k_{12}) \right]. \quad (7)$$

Удвоенное значение Δ_z , рассчитанное по зависимости (7), определяет величину «раздвижки» двух полуколес адаптивной передачи, обеспечивающее в зацеплении арочных зубьев две, разнесенные по длине, контактные зоны в середине ширины зуба каждого полуколеса. В том случае, когда адаптивную передачу изготавливают на основе вышерассмотренной передачи первого варианта ($r_{g1} = 220$ мм, $r_{g2} = 215$ мм), расчет по формуле (7) дает $\Delta_z = 0,504$ мм, если используется второй вариант передачи, то $\Delta_z = 0,497$ мм.

Для того, чтобы оценить величину осевого перемещения полуколес в адаптивной передаче при наличии угла перекося, в формуле (4) достаточно задать $z'_0 = b_w / 4$ и разрешить ее относительно Δ_z , в результате получим выражение:

$$\Delta_z = \left[r_{g2} b_w (k_{22} - k_{12}) / 2 - K_z \left(2 \operatorname{tg}(\gamma \cdot \cos \alpha_w) r_{g2} + \sin(\gamma \cdot \cos \alpha_w) / k_{11} \right) \right] / \left[K_z + 2r_{g2} (k_{22} - k_{12}) \right]. \quad (8)$$

Результаты исследования

Из рис. 2 следует, что передача 2 значительно более чувствительна к углу перекося зубьев по сравнению с передачей 1. Например, при угле перекося $\gamma = 3^\circ$ в передаче 1 (кружки) точка контакта смещается от среднего сечения арочного зуба на величину 9,6 мм, в то же время в передаче 2 (треугольники) величина смещения при $\gamma = 3^\circ$ составляет уже 24,3 мм. Несмотря на то, что передача 1 менее чувствительна к углу перекося, контактные напряжения, вследствие высокой локализации контакта, здесь выше, чем в передаче 2. Выбор оптимальной величины локализации контакта в заданных условиях работы передачи связан с анализом характера распределения напряжений по площадке контакта в зацеплении арочных зубьев, который зависит как от положения точки касания на поверхности зуба при заданной величине угла перекося, так и плотности прилегания поверхностей зубьев в окрестности точки контакта [3, 15].

Анализ смещений z'_0 , определенных по приближенной зависимости (4) для передач 1 и 2 (рис. 2) и других передач, показал, что по сравнению с точным решением они практически постоянно, примерно на 5 %, систематически завышают точное значение z'_0 . С целью согласования результатов расчета по формуле (4) в нее включен корректирующий коэффициент K_z , величина которого для приведенных на рис. 2, 3 и 4 расчетов была принята $K_z = 1$. В случае $K_z = 0,95$ погрешность смещений z'_0 , рассчитанных по формуле (3), относительно точных значений составляет менее 1 %.

Показанные на рис. 5 результаты свидетельствуют, что для обеспечения касания арочных зубьев колес в полюсе зацепления в зоне среднего сечения арочного зуба при угле перекося в передаче до семи минут достаточно осевого перемещения шестерни (или колеса) не более одного миллиметра, при этом степень локализации контакта практически на величину Δ_z не влияет. Из анализа данных таблицы следует, что несмотря на существенную разницу положения на поверхности зуба шестерни точек активной действующей линии в передачах 1 и 2 (рис. 3, 4) для одних и тех же углов перекося, величина смещения элементов передачи для полной ее самоустановки за весь цикл зацепления пары арочных зубьев изменяется на величину от 0,01 мм ($\gamma = 1^\circ$) до 0,1 мм ($\gamma = 7^\circ$). Из полученных результатов следует, что реализация процесса компенсации угла перекося путем применения передачи с арочными зубьями с разнесенными зонами контакта возможна в пределах осевой «игры» подшипников.

Заключение

Для цилиндрических передач с арочными зубьями получена приближенная зависимость по расчету величины смещения точки касания по активной поверхности зуба шестерни при заданной фазе за-

цепления и угле перекося, позволяющая определять геометрические характеристики контакта без решения систем трансцендентных уравнений с погрешностью, не превышающей 1...5 %. Предложены процедуры использования приближенной зависимости: для оценки положения активных действующих линий в передаче с арочными зубьями при варьировании угла перекося зубьев в зацеплении; расчете величины смещения элементов передачи при условии ее самоустановки при наличии угла перекося; для определения необходимых величин смещения элементов адаптивной цилиндрической передачи с арочными зубьями, обеспечивающими положение центров пятен контакта в средней части арочных зубьев полуколес.

Список литературы

- 1 **Лагутин, С. А.** Предопределение функции ошибки в передачах с двойной модификацией зубьев / С. А. Лагутин // *Пространство зацеплений : сборник докладов научного семинара Учебно-научного центра зубчатых передач и редукторостроения*. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2001. – С. 26–37.
- 2 **Сызранцев, В. Н.** Формообразование арочных зубьев цилиндрических колес и геометро-кинематические характеристики их зацеплений : монография / В. Н. Сызранцев, К. В. Сызранцева. – Тюмень : ТИУ, 2023. – 174 с. – ISBN 978-5-9961-3079-5.
- 3 **Сызранцев, В. Н.** Цилиндрические передачи с арочными зубьями: геометрия, прочность, надежность : монография / В. Н. Сызранцев, К. В. Сызранцева. – Тюмень : ТИУ, 2020. – 171 с. – ISBN 978-5-9961-2378-0.
- 4 **Arafa, H. A.** C-gears : Geometry and Machining, Part C. / H. A. Arafa // *Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2005. – No. 219 (7). – P. 709–726.
- 5 **Jia, F.** Modelling and bending strength analysis of cylindrical gears with arcuate tooth trace / F. Jia, L. Hou, Y. Wei, B. Li, Y. You // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. – 2015. – Vol. 13, No. 2. – P. 77–86. – DOI 10.7158/M13-068.2015.13.2.
- 6 **Ma, D.** Tooth surface reconstruction and tooth profile geometric analysis of circular arc tooth trace cylindrical gears / D. Ma, Z. Ye, H. Yang // *Transactions of FAMENA*. – 2019. – Vol. 43, No. 1. – P. 29–44. – DOI 10.21278/TOF.43103.
- 7 **Jiang, Y.** Contact ratio calculation of involute arc gear device Academic / Y. Jiang // *Journal of Manufacturing Engineering*. – 2017. – Vol. 15, No. 3. – P. 19–22.
- 8 Milling machine error modelling and analysis in the machining of circular-arc-tooth-trace cylindrical gears / Y. Wu, L. Hou, L. Lan [et al.] // *Transactions of FAMENA*. – 2021. – Vol. 44, No. 4. – P. 13–29. – DOI 10.21278/TOF.444009419.
- 9 **Zhang, X.** Mathematical model and contact characteristics of curvilinear cylindrical gears with line contact / X. Zhang, Z. Liang // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.

References

- 1 **Lagutin, S. A.** Predetermination of the error function in gears with double modification of teeth / S. A. Lagutin // *Space of engagements: collection of reports of the scientific seminar of the Educational and Scientific Center for Gear Drives and Gearbox Engineering*. – Izhevsk : Publishing house of Izhevsk State Technical University, 2001. – P. 26–37.
- 2 **Syzrantsev, V. N.** Formation of arched teeth of cylindrical wheels and geometric and kinematic characteristics of their engagement : monograph / V. N. Syzrantsev, K. V. Syzrantseva. – Tyumen : TIU, 2023. – 174 p. – ISBN 978-5-9961-3079-5.
- 3 **Syzrantsev, V. N.** Cylindrical gears with arched teeth: geometry, strength, reliability : monograph / V. N. Syzrantsev, K. V. Syzrantseva. – Tyumen : TIU, 2020. – 171 p. – ISBN 978-5-9961-2378-0.
- 4 **Arafa, H. A.** C-gears : Geometry and Machining, Part C. / H. A. Arafa // *Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2005. – No. 219 (7). – P. 709–726.
- 5 **Jia, F.** Modelling and bending strength analysis of cylindrical gears with arcuate tooth trace / F. Jia, L. Hou, Y. Wei, B. Li, Y. You // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. – 2015. – Vol. 13, No. 2. – P. 77–86. – DOI 10.7158/M13-068.2015.13.2.
- 6 **Ma, D.** Tooth surface reconstruction and tooth profile geometric analysis of circular arc tooth trace cylindrical gears / D. Ma, Z. Ye, H. Yang // *Transactions of FAMENA*. – 2019. – Vol. 43, No. 1. – P. 29–44. – DOI 10.21278/TOF.43103.
- 7 **Jiang, Y.** Contact ratio calculation of involute arc gear device Academic / Y. Jiang // *Journal of Manufacturing Engineering*. – 2017. – Vol. 15, No. 3. – P. 19–22.
- 8 Milling machine error modelling and analysis in the machining of circular-arc-tooth-trace cylindrical gears / Y. Wu, L. Hou, L. Lan [et al.] // *Transactions of FAMENA*. – 2021. – Vol. 44, No. 4. – P. 13–29. – DOI 10.21278/TOF.444009419.
- 9 **Zhang, X.** Mathematical model and contact characteristics of curvilinear cylindrical gears with line contact / X. Zhang, Z. Liang // *Journal of the*

– 2021. – Vol. 43, No. 4. – DOI 10.1007/s40430-021-02894-w.

10 Meshing Contact Impact Properties of Circular Arc Tooth Trace Cylindrical Gear Based on Rotating Knife Dish Milling Process / D. Ma, Y. Liu, Z. Ye [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2021. – Vol. 2021. – DOI 10.1155/2021/8819818.

11 Патент RU № 2721579 C1, МПК F16H1/06. Адаптивная цилиндрическая передача с арочными зубьями / В. Н. Сызранцев, К. В. Сызранцева, В. П. Вибе, Ю. Г. Денисов. – № 2019136799 ; заявл. 15.11.2019 ; опубл. 20.05.2020, Бюл. № 14. – 1 с.

12 Сызранцев, В. Н. Расчет геометро-кинематических характеристик зацепления арочных зубьев цилиндрической передачи при погрешностях взаимного расположения / В. Н. Сызранцев, А. И. Стариков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 5–18. – DOI 10.14529/engin230101.

13 Сызранцев, В. Н. Повышение надежности работы арочных цилиндрических передач на основе определения граничных величин смещения, обеспечивающих касание колес / В. Н. Сызранцев, А. И. Стариков // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2023. – № 4 (67). – С. 93–102. – DOI 10.47617/2072-3172_2023_4_93.

14 Гришко, В. А. Повышение износостойкости зубчатых передач / В. А. Гришко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 232 с.

15 Сызранцев, В. Н. Расчет распределенной по площадке контакта нагрузки в зацеплении прямых и бочкообразных зубьев в условиях их перекоса / В. Н. Сызранцев, К. В. Сызранцева, И. С. Сердюк // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2024. – № 3 (365). – С. 52–61. – DOI 10.33979/2073-7408-2024-365-3-52-61.

16 Сызранцев, В. Н. Синтез адаптивной цилиндрической передачи с арочными зубьями с двумя зонами контакта / В. Н. Сызранцев, А. И. Стариков // *Омский научный вестник*. – 2023. – № 4 (188). – С. 38–45. – DOI 10.25206/1813-8225-2023-188-38-45.

Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2021. – Vol. 43, No. 4. – DOI 10.1007/s40430-021-02894-w.

10 Meshing Contact Impact Properties of Circular Arc Tooth Trace Cylindrical Gear Based on Rotating Knife Dish Milling Process / D. Ma, Y. Liu, Z. Ye [et al.] // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2021. – Vol. 2021. – DOI 10.1155/2021/8819818.

11 Pat. 2721579 Russian Federation, MPK F 16 N 1/06. Adaptive spur gear with arched teeth / V. N. Syzrantsev, K. V. Syzrantseva, V. P. Vibe, Yu. G. Denisov. – No. 2019136799 ; declared. 15.11.2019 ; published. 20.05.2020, Bulletin No. 14. – 1 p.

12 Syzrantsev, V. N. Calculation of the geometric and kinematic characteristics of the engagement of the arc teeth of a cylindrical gear with errors in the relative position / V. N. Syzrantsev, A. I. Starikov // *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – P. 5–18. – DOI 10.14529/engin230101.

13 Syzrantsev, V. N. Improving the reliability of the operation of arched cylindrical gears based on the determination of the boundary values of displacement that ensure the wheels touch / V. N. Syzrantsev, A. I. Starikov // *Vestnik MSUT “Stankin”*. – 2023. – No 4 (67). – P. 93–102. – DOI 10.47617/2072-3172_2023_4_93.

14 Grishko, V. A. Increase of wear resistance of toothed gears / V. A. Grishko. – Moscow : Mashinostroenie, 1977. – 232 p.

15 Syzrantsev V. N. Calculation of the load distributed over the contact area in the meshing of straight and barrel-shaped teeth under conditions of their skewing / V. N. Syzrantsev, K. V. Syzrantseva, I. S. Serdyuk // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2024. – No (365). – P. 52–61. – DOI 10.33979/2073-7408-2024-365-3-52-61.

16 Syzrantsev, V. N. Synthesis of an adaptive cylindrical gear with arched teeth with two contact zones / V. N. Syzrantsev, A. I. Starikov // *Omsk Scientific Bulletin*. – 2023. – No. 4 (188). – P. 38–45. – DOI 10.25206/1813-8225-2023-188-38-45.

V. N. Syzrantsev, K. V. Syzrantseva, I. S. Serdyuk

ANALYSING THE SELF-ALIGNMENT OF CYLINDRICAL GEAR WHEELS WITH ARC TEETH

Abstract. Cylindrical gears with arc teeth make it possible to multiply the durability in terms of the contact and bending strength of gears of power drives of energy-intensive machines operating under conditions of inevitable skew angle of axes. Gears with arc teeth have the property of compensation of the skew angle by axial displacement (self-adjustment) of one of the wheels while ensuring the absence of edge contact of teeth in engagement. In the work

an approximate dependence for calculation of displacement value of the touch point (error not more than 1...5 %) of the arc teeth in engagement on the active surface of the arc tooth of the gear in the direction of the axis of its rotation is offered. For the traction cylindrical gear of an electric locomotive with a different degree of localisation of the contact of the arc teeth, the analysis of the value of the self-alignment of the wheel with arc teeth, compensating for the skew (0, 1', 2', ..., 7') of the teeth in engagement, as well as the value of the displacement of the half-wheels in order to obtain an adaptive cylindrical gear with arch teeth of two contact zones in engagement.

Keywords: cylindrical gear, arc teeth, self-alignment.

For citation: Syzrantsev, V. N. Analysing the self-alignment of cylindrical gear wheels with arch teeth / V. N. Syzrantsev, K. V. Syzrantseva, I. S. Serdyuk // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 96–105. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_96.

Сведения об авторах

Сызранцев Владимир Николаевич

Тюменский Индустриальный университет,
кафедра машин и оборудования нефтяной
и газовой промышленности,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель наук РФ, профессор,
e-mail: syzrantsevvn@tyuiu.ru

Сызранцева Ксения Владимировна

Тюменский индустриальный университет,
кафедра машин и оборудования нефтяной
и газовой промышленности,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: kv.syzr@gmail.com

Сердюк Иван Сергеевич

Тюменский индустриальный университет,
кафедра машин и оборудования нефтяной и
газовой промышленности,
аспирант,
e-mail: serdyuk.ivan.98@mail.ru

Information about the authors

Syzrantsev Vladimir Nikolaevich

Tyumen Industrial University,
Chair “Machines and Equipment of Oil
and Gas Industry”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Honoured
Worker of Sciences of the Russian Federation,
Professor,
e-mail: syzrantsevvn@tyuiu.ru

Syzrantseva Ksenia Vladimirovna

Tyumen Industrial University,
Chair “Machines and Equipment of Oil
and Gas Industry”,
Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: kv.syzr@gmail.com

Serdyuk Ivan Sergeevich

Tyumen Industrial University,
Chair “Machines and Equipment of Oil
and Gas Industry”,
Postgraduate Student,
e-mail: serdyuk.ivan.98@mail.ru

И. Т. Хиникадзе

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМА, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВЕРЛИЛЬНЫХ СТАНКОВ

Аннотация. В современном промышленном производстве сверлильные станки играют важную роль в обработке различных материалов. Установлено, что эксплуатация сверлильных станков сопровождается генерацией значительного уровня шума, который может негативно влиять на здоровье и работоспособность операторов, а также на окружающую среду. Выполнено исследование, направленное на изучение характеристик шума, генерируемого сверлильными станками, с целью разработки эффективных мер по снижению шумового воздействия. Приведены результаты экспериментальных исследований спектров шума сверлильных станков, проведенных при различных технологических нагрузках, что подтверждается теоретическими выводами о закономерностях формирования виброакустических характеристик станков. Определены основные источники шума и разработаны эффективные меры по снижению шумового воздействия. Реализация предложенных мер позволит улучшить условия труда операторов сверлильных станков и снизить негативное воздействие шума.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, уровни шума, октавные уровни звукового давления, сверлильные станки.

Для цитирования: Хиникадзе, И. Т. Экспериментальные исследования шума, генерируемого при эксплуатации сверлильных станков / И. Т. Хиникадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 106–113. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_106.

Введение

В современном промышленном производстве сверлильные станки занимают одно из основных мест, обеспечивая выполнение широкого спектра технологических операций. Однако наряду с высокой производительностью и точностью работа сверлильных станков сопровождается интенсивным шумовым воздействием, которое может оказывать негативное влияние на здоровье и работоспособность операторов, а также ухудшать акустическую обстановку в производственных помещениях. Поэтому изучение шумовых характеристик сверлильных станков является актуальной задачей, решение которой позволит разработать эффективные методы снижения шумового воздействия.

Методология проведения экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований шумовых характеристик сверлильных станков была разработана методика, включающая в себя следующие этапы [1–4]:

Выбор объектов исследования. В качестве объектов исследования были выбраны несколько типов сверлильных станков, отличающихся по конструкции, мощности и назначению. Это позволило охватить широкий спектр оборудования, используемого в промышленности, и получить репрезентативные данные о шумовых характеристиках различных типов станков. Технические характеристики станков при сверлении отверстий различных диаметров на заготовках из серого чугуна приведены в табл. 1.

Определение точек измерения. Для объективной оценки шумового воздействия были выбраны точки измерения, расположенные в непосредственной близости от станка, в зоне рабочего места оператора и на некотором удалении от станка. Это позволило оценить распределение шума в пространстве и выявить зоны с максимальным уровнем шумового воздействия.

Используемое оборудование. Измерения уровня звукового давления проводились с использованием прецизионного шумомера, микрофонов с известными характеристиками. Для регистрации частотного спектра шума использовался анализатор спектра. Калибровка измерительного оборудования проводилась перед началом и после окончания каждой серии измерений. Особое внимание уделялось выбору сверл различного диаметра и материала заготовок, представляющих типичные условия эксплуатации сверлильных станков.

Таблица 1

Технические характеристики объектов исследования

Модель станка	Количество скоростей	Диапазон оборотов шпинделя, об/мин	Максимальный диаметр сверления, мм	Мощность электропривода, кВт
2М106П	7	1000 ÷ 8000	6	0,4
2М112	5	450 ÷ 4500	12	0,6
2Н118	9	180 ÷ 2800	18	0,6
2Н125Л	9	90 ÷ 1420	25	1,5
2Н125	12	45 ÷ 2920	25	2,2
2Н135	12	31 ÷ 1400	35	4
2Г 135	12	45 ÷ 2000	35	4
2Н150	12	22 ÷ 1000	50	7,5
2Г175	12	18 ÷ 800	75	11
2Г175М	12	22 ÷ 1000	75	11

Режим работы станков. Измерения проводились в различных режимах работы станков, включая холостой ход, сверление различных материалов (сталь, чугун, пластик) с различными режимами резания (скорость вращения шпинделя, подача). Это позволило оценить влияние параметров технологического процесса на уровень генерируемого шума.

Эксперименты проводились в условиях производственной эксплуатации сверлильных станков и включали в себя следующие этапы измерений:

- измерение уровней звука на холостом режиме и под нагрузкой;
- измерение спектрального состава шума наиболее шумных режимов холостого хода станка;
- измерение спектрального состава шума при сверлении в наиболее шумных рабочих режимах.

Обработка результатов измерений. Полученные данные подвергались статистической обработке с использованием специализированного программного обеспечения. Рассчитывались средние значения уровня звукового давления, стандартное отклонение, частотные спектры шума. После завершения измерений проводилась обработка полученных данных, включающая в себя расчет средних значений уровня звукового давления, построение графиков и спектров шума. Был выполнен частотный анализ шума для выявления доминирующих частот и источников шума. Результаты анализа сравнивались с допустимыми уровнями шума, установленными нормативными документами. Проводился статистический анализ данных для оценки достоверности полученных результатов.

Результаты экспериментальных исследований

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены следующие данные (табл. 2).

Таблица 2

Уровни звука сверлильных станков

Модель станка	Уровни звука холостого режима, дБА	Уровни звука рабочего режима, дБА
2М106П	78–86	80–87
2М112	77–84	80–87
2Н125Л	76–82	81–88
2Н125	75–83	82–89
2Н135	74–83	82–90
2Р 135	75–83	84–90
2Н150	75–84	84–92
2Г175	74–84	86–93
2Г175М	74–84	86–94

Анализ полученных данных по уровням звука показал, что на холостом режиме работы почти все станки демонстрируют превышение допустимого порога в 80 дБА. Величина этого превышения со-

ставляет от 2 до 6 дБА для наиболее высокоскоростного станка 2Н160П. Для большинства станков величина превышений уровня звука составляет 3–4 дБА. Как показали результаты измерений, у станков 2Н135, 2Р135, 2Н150, 2Г175 и 2Г175М уровни звука практически одинаковые. Это объясняется их конструктивной особенностью: все эти станки оснащены двенадцатиступенчатыми коробками скоростей. Следовательно, их шумовые характеристики создаются сходным набором кинематических элементов, таких как зубчатые колёса и подшипники качения. Эти данные позволяют предположить, что существенное влияние на процесс генерации шума оказывает привод движения, так как в данном режиме работы отсутствует излучение звуковой энергии акустических подсистем узлов резания и обрабатываемых заготовок.

В рабочем режиме у высокоскоростных станков 2Н106П ($n = 8000$ об/мин, $N = 0,4$ кВт), 2Н112 ($n = 4500$ об/мин, $N = 0,6$ кВт) и 2Н118 ($n = 2800$ об/мин, $N = 0,6$ кВт) уровни звука практически не отличаются. Полученные данные позволяют предположить, что у высокоскоростных станков с малыми диаметрами свёрл звуковое поле на рабочих местах станочников определяется излучением звуковой энергии коробок скоростей. Для станков 2Н125Л, 2Н125, 2Н135, 2Р135, 2Н150, 2Г175 и 2Г175М следует учитывать звуковое излучение коробок скоростей, узлов резания и узлов заготовок.

При измерениях шумовых характеристик нескольких источников, одновременно излучающих звуковую энергию, выявить вклад отдельного источника практически невозможно. Для косвенной идентификации долевого вклада источников (что является наиболее важным этапом данной серии экспериментов) измерялись уровни вибраций на корпусах сверлильной бабки и коробке передач, а также на заготовках, непосредственно устанавливаемых на столе станков. Результаты этих измерений приведены в табл. 2.

Данные измерений вибраций наглядно подтвердили выводы об основных источниках шума, создающих уровни звука, превышающие нормативное значение (80 дБА). Действительно, у станков 2Н106П и 2Н112 уровни вибраций на коробке передач и столе с заготовкой практически на 23–24 дБА ниже, чем на корпусе коробки скоростей. Кроме того, увеличение уровней вибраций во всех точках изменений рабочего режима в сравнении с холостым ходом не превышает 2 дБА, что фактически соответствует погрешности проведения эксперимента.

У станков 2Н125Л и 2Н125 разница в уровнях вибраций на коробке передач и коробке скоростей составляет 17 дБ. Несмотря на то что уровни вибраций на столе с заготовкой существенно ниже, чем на коробке скоростей, уровень вибрации достигает значения 80 дБА. Этот факт свидетельствует о необходимости учитывать звуковое излучение обрабатываемых заготовок.

Такая тенденция еще более наглядно проявляется при работе станков модели 2Н135 и 2Р135. Разница между уровнями вибраций корпуса коробки скоростей и на столе с заготовкой составляет 9 дБ, но уровень вибрации на заготовке достигает значения 84 дБА. Уровень вибрации корпуса коробки передач не превышает 74 дБА. Уровень вибрации на заготовке станка модели 2Н150 также на 9 дБА ниже, чем на корпусе коробки скоростей, но составляет 86 дБА, а у станков моделей 2Н175 и 2Г175Н это значение составляет 88 дБА.

Для уточнения закономерностей формирования уровней звукового давления по октавам и выявления частотных диапазонов, в которых уровни звукового давления превышают нормативные величины, необходимо изучить спектральный состав виброакустических характеристик [5–8].

Замеры ключевых показателей звукового давления показали, что функционирующие вхолостую высокооборотные станки моделей 2М106П и 2М112 создают шумовые характеристики, выходящие за рамки допустимых санитарных норм (рис. 1, 2). Даже на холостом режиме работы показатели звукового давления превышают установленные лимиты в средне- и высокочастотном диапазоне, а именно в пределах 500–8000 Гц. Превышение варьируется от 2 до 5 дБ с максимальным значением 5 дБ, зафиксированным в шестой октаве. При сверлении изменение уровня звукового давления не превышает 2 дБ, однако значения превышений могут достигать 6–7 дБ в диапазоне частот 1000–4000 Гц.

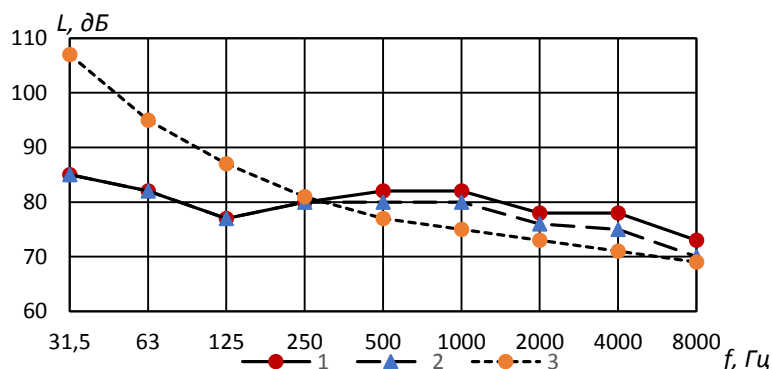


Рис. 1. Шумовые спектры настольного сверлильного станка модели 2М106П:

1 – во время сверления; 2 – на холостом ходу; 3 – предельно допустимый спектр

У станков модели 2Н112 (см. рис. 2) уровни звукового давления холостого хода также демонстрируют превышение санитарных норм в диапазоне частот от 250 до 2000 Гц. Величина превышения составляет 2–3 дБ, что на 2 дБ меньше, чем у станков модели 2М106П. Данный факт объясняется тем, что мощность станка 2Н112 в 1,8 раза ниже, чем у 2М106П. Теоретически уменьшение уровня шума составляет 4 дБ. Влияние рабочих нагрузок при сверлении более выражено в изменении интенсивности излучения звука. Увеличение уровня звукового давления по сравнению с холостым ходом составляет 2–5 дБ. Таким образом, значения превышения уровня звукового давления достигают 4–7 дБ.

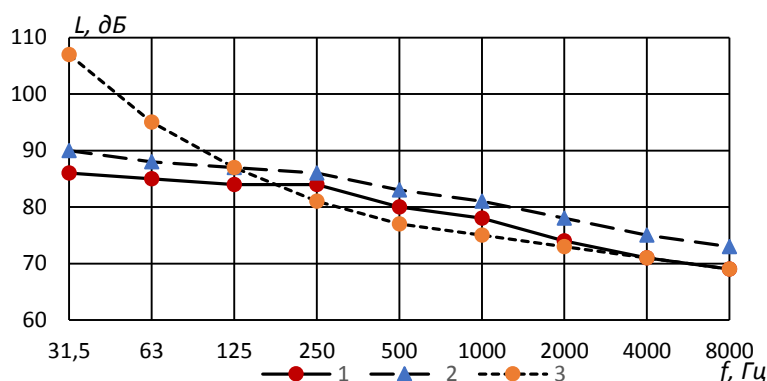


Рис. 2. Шумовые спектры настольного сверлильного станка модели 2Н112:

1 – на холостом ходу; 2 – во время сверления; 3 – предельно допустимый спектр

В случае настольного сверлильного станка модели 2Н125 показатели звукового давления не превышают нормативных значений во всем частотном диапазоне (рис. 3). Однако в процессе сверления наблюдается превышение уровней звукового давления в средне- и высокочастотной областях спектра, в диапазоне 500 – 8000 Гц. Наибольшие отклонения зафиксированы в следующих октавах: 6 дБ – в пятой октаве; 7 дБ – в шестой; 5 дБ – в седьмой; 6 дБ – в восьмой и девятой октавах.

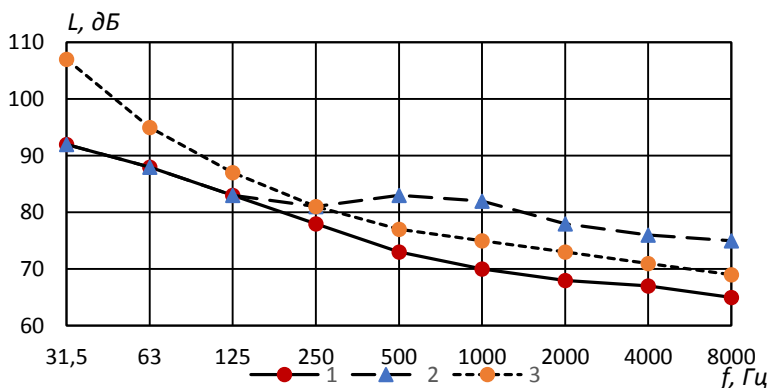


Рис. 3. Шумовые спектры настольного сверлильного станка модели 2Н125:

1 – на холостом ходу; 2 – во время сверления; 3 – предельно допустимый спектр

У вертикально-сверлильного станка модели 2Н135 превышение уровней звукового давления начинается с четвертой октавы (рис. 4). В четвертой октаве превышение достигает 7 дБ, в пятой – 9 дБ, в шестой – 10 дБ, в седьмой – 9 дБ, в восьмой – 8 дБ, а в девятой – 5 дБ. Эти данные отчетливо демонстрируют восходящую тенденцию увеличения превышения допустимых уровней шума в диапазоне высоких частот, достигающую пика в шестой октаве, а затем плавно снижающуюся к девятой. Такая картина распределения уровней шума может указывать на специфический источник или комбинацию источников, генерирующих акустическую энергию преимущественно в средне- и высокочастотном диапазоне.

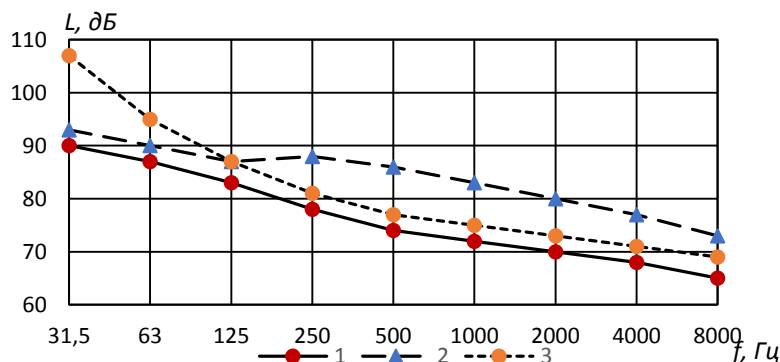


Рис. 4. Шумовые спектры вертикально-сверлильного станка модели 2Н135:

1 – на холостом ходу; 2 – во время сверления; 3 – предельно допустимый спектр

При работе вертикально-сверлильного станка модели 2Н150 на холостом ходу акустические показатели соответствуют гигиеническим нормам (рис. 5). В ходе работы станка под нагрузкой происходит значительное изменение акустической картины. Интенсивность звука возрастает, и спектр частот, в котором наблюдается превышение гигиенических норм, расширяется. Наиболее выраженные превышения наблюдаются в диапазоне средних частот, что может быть связано с резонансными явлениями в конструкции станка и вибрацией обрабатываемой детали. Снижение интенсивности звука относительно максимально допустимых значений достигает 2 дБ в спектре частот от 250 до 8000 Гц, что сопоставимо с допустимой погрешностью измерений. Проведенные измерения демонстрируют, что превышение допустимых уровней шума достигает критических значений в третьей – восьмой октавах и их величины составляют: 125 Гц – 3 дБ; 250 Гц – 8 дБ; 500, 1000, 2000 – 10 дБ; 4000 Гц – 9 дБ; 8000 Гц – 8 дБ, что может представлять опасность для здоровья оператора станка при длительном воздействии.

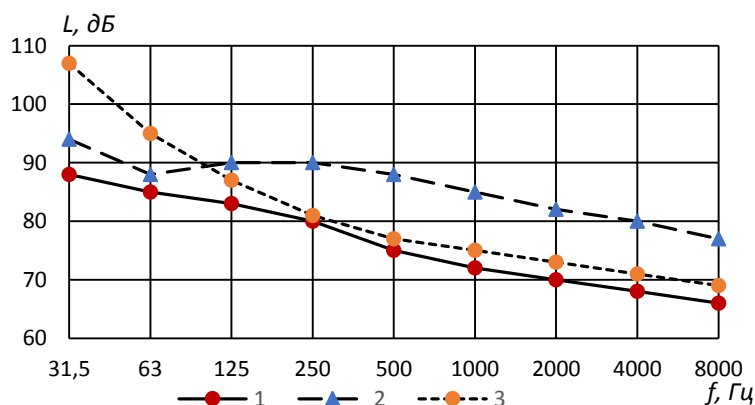


Рис. 5. Шумовые спектры вертикально-сверлильного станка модели 2Н150:

1 – на холостом ходу; 2 – во время сверления; 3 – предельно допустимый спектр

Шум, производимый вертикально-сверлильным станком модели 2Г175, характеризуется тем, что в диапазоне частот от 250 до 2000 Гц уровни звукового давления практически достигают максимально разрешенных значений (рис. 6). Подобная картина спектра показывает, что в пятой и шестой октавах уровень шума доходит до 89–90 дБ. Превышение нормативных показателей следующее: на частоте 125 Гц – 2 дБ; на частоте 250 Гц – 5 дБ; на частоте 500, 1000 Гц – 13 дБ; на частоте 2000, 4000 и 8000 Гц – 12 дБ. В данном случае высокая интенсивность шума в диапазоне 500–2000 Гц указывает на то, что

источниками шума могут являться процессы резания, работа приводов и вибрация корпусных деталей станка.

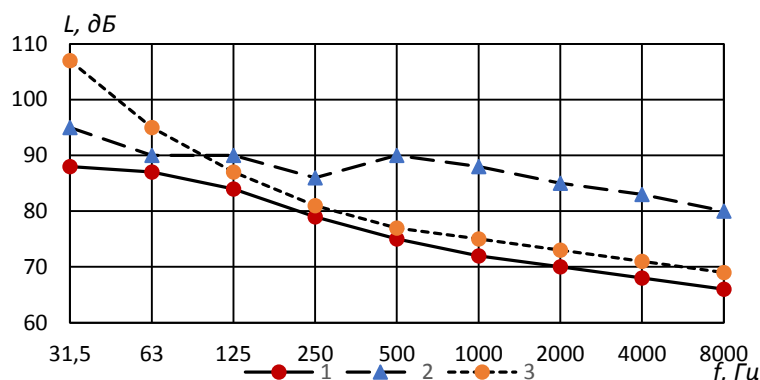


Рис. 6. Шумовые спектры вертикально-сверлильного станка модели 2Г175:

1 — на холостом ходу; 2 — во время сверления; 3 — предельно допустимый спектр

Измерения спектрального состава шума и вибраций позволили идентифицировать основные источники шума сверлильных станков: редуктор, подшипники шпинделя, вибрация корпуса станка, шум, возникающий при взаимодействии режущего инструмента с обрабатываемым материалом.

Анализ результатов измерений показал, что в высокоскоростных настольных сверлильных станках моделей 2Н106П и 2Н112 основным источником шумового загрязнения, фактически формирующим звуковое поле на рабочем месте, является коробка скоростей и в значительно меньшей степени системы «узел резания – обрабатываемая заготовка». В станках моделей 2Н125, 2Н135, 2Н150 и 2Н175 следует учитывать как звуковое излучение корпуса коробки скоростей, так и звуковое излучение системы «узел резания – обрабатываемая заготовка».

Выводы и рекомендации

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить основные характеристики шума, генерируемого сверлильными станками, и выявить основные источники шума. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы [9, 10]:

1 Работа сверлильных станков сопровождается интенсивным шумовым воздействием, превышающим допустимые нормы.

2 Основная энергия шума сосредоточена в диапазоне низких и средних частот.

3 Уровень шума зависит от типа станка, режима работы и обрабатываемого материала.

4 Основными источниками шума являются редуктор, подшипники шпинделя, вибрация корпуса станка и шум, возникающий при взаимодействии режущего инструмента с обрабатываемым материалом.

На основании полученных результатов рекомендуется:

1) проводить мониторинг уровня шума на рабочих местах операторов сверлильных станков;

2) обеспечить операторов средствами индивидуальной защиты органов слуха (наушники, беруши);

3) внедрить современные методы обучения операторов по безопасному использованию сверлильных станков, включая информацию о вредном воздействии шума и способах защиты от него;

4) разработать и внедрить комплекс мер по снижению шумового воздействия сверлильных станков, включающий в себя использование виброизоляции, звукоизоляции, демпфирования, а также применение специальных режущих инструментов с уменьшенным уровнем вибрации.

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 экспе-

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 Putej 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

риментальных 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. – ISBN 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 **Хиникадзе, И. Т.** Снижение уровней шума коробок скоростей высокоскоростных вертикально-сверлильных станков / И. Т. Хиникадзе, А. Н. Чукарин, Т. А. Финоченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 12. – С. 698–702. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-12-698-702.

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

8 **Khinikadze, I.** Modeling the processes of vibroacoustic dynamics of the acoustic subsystem “drill – blanket” / I. Khinikadze, A. Chukarin, T. Finochenko // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 549. – P. 01005. – DOI 10.1051/e3sconf/202454901005.

9 **Месхи, Б. Ч.** Исследование виброакустических характеристик малозумного механизма поддержки прутка / Б. Ч. Месхи, Т. А. Финоченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 4. – С. 27–30. – EDN MIPLGR.

10 Характеристики шумового дискомфорта в рабочей зоне прутковых токарных станков / С. А. Раздорский, Т. А. Финоченко, А. Н. Чука-

machines / Т. А. 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.] ; RSTU. – 2-nd ed., rev. and add. – Rostov-on-Don, 2019. – 308 p. – ISBN 978-5-88814-843-3.

4 **Finochenko, T. A.** Methodology for conducting experimental studies of the noise of bar lathe machines / Т. А. 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 slot-milling machines / A. E. Nabokov // News of the Tula State University. Technical sciences. – 2023. – No. 5. – P. 77–84. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-77-78.

6 **Khinikadze, I. T.** Reducing noise levels of gearboxes of high-speed vertical drilling machines / I. T. Khinikadze, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko // News of the Tula State University. Technical sciences. – 2022. – Issue 12. – P. 698–702. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-12-698-702.

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 / Rostov State University of Civil Engineering. – Rostov on Don, 2003. – P. 50–57. – EDN VIHKAAD.

8 **Khinikadze, I.** Modeling the processes of vibroacoustic dynamics of the acoustic subsystem “drill – blanket” / I. Khinikadze, A. Chukarin, T. Finochenko // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 549. – P. 01005. – DOI 10.1051/e3sconf/202454901005.

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

10 Characteristics of noise discomfort in the working area of bar turning machines / S. A. Razdorsky, T. A. Finochenko, A. N. Chukarin, I. A. Yaitskov // Monitoring. Science and Technology. – 2018. –

рин, И. А. Яицков // Мониторинг. Наука и технологии. – 2018. – № 3 (36). – С. 81–84. – EDN YCMIFF.

No. 3 (36). – P. 81–84. – EDN YCMIFF.

I. T. Khinikadze

EXPERIMENTAL STUDIES OF NOISE GENERATED DURING OPERATION OF DRILLING MACHINES

Abstract. In modern industrial production, drilling machines play an important role in the processing of various materials. It has been established that the operation of drilling machines is accompanied by the generation of a significant level of noise, which can negatively affect the health and performance of operators, as well as the environment. A study is aimed at studying the characteristics of noise generated by drilling machines in order to develop effective measures to reduce noise exposure. The article presents the results of experimental studies of the noise spectra of drilling machines, carried out under various technological loads, which is confirmed by theoretical conclusions about the patterns of formation of vibroacoustic characteristics of machines. The main sources of noise are determined and effective measures to reduce noise exposure are developed. The implementation of the proposed measures will improve the working conditions of drilling machine operators and reduce the negative impact of noise.

Keywords: experimental studies, noise levels, octave sound pressure levels, drilling machines.

For citation: Khinikadze, I. T. Experimental studies of noise generated during operation of drilling machines / I. T. Khinikadze // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 106–113. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_106.

Сведения об авторах

Хиникадзе Илдар Тенгизович
Ростовский государственный
университет путей сообщения
(РГУПС),
кафедра «Безопасность
жизнедеятельности»
аспирант,
e-mail: xinikadze755@gmail.com

Information about the authors

Khinikadze Ildar Tengizovich
Rostov State Transport University
(RSTU),
Chair “Life Safety”,
Postgraduate Student,
e-mail: xinikadze755@gmail.com

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 629.423.1

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_114

*П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова*ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТОКОПРИЁМНИКЕ
СОВРЕМЕННОГО ОТЕЧЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
С КОЛЛЕКТОРНЫМ ПРИВОДОМ

Аннотация. Рассматриваются проблемы высокого расхода электроэнергии из тяговой сети современными отечественными электровозами переменного тока с коллекторным приводом и низкого качества электроэнергии на их токоприёмниках. Выяснено, что данные проблемы обусловлены наличием в контактной сети реактивной мощности, потребляемой электровозами практически в равных пропорциях с активной, и значительными искажениями напряжения и тока. Предложен новый способ управления плечами выпрямительно-инверторных преобразователей на базе IGBT-транзисторов, позволяющий повысить коэффициент мощности современного отечественного электровоза переменного тока с коллекторным приводом до 0,99 и снизить коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока на его токоприёмнике до 4 и 10 % соответственно. Предлагаемый способ позволит значительно повысить эффективность вождения поездов с применением технологии «Виртуальная сцепка».

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент мощности, энергоэффективность, электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, IGBT-транзисторы, коллекторный привод, технология «Виртуальная сцепка».

Для цитирования: Повышение качества электроэнергии на токоприёмнике современного отечественного электровоза переменного тока с коллекторным приводом / П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 114–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_114.

Введение

Высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика – приоритетное направление научно-технологического развития России [1]. В связи с этим актуально разрабатывать новые способы экономии электроэнергии в наиболее значимых отраслях страны. Такой отраслью является железнодорожный транспорт, это один из наиболее энергоёмких секторов российской экономики. В среднем 42132 млн кВт·ч электроэнергии ежегодно затрачивается на тягу поездов, что составляет 80 % от всей потребляемой электроэнергии компанией ОАО «РЖД» или 4 % от всей потребляемой электроэнергии в России (рис. 1) [2, 3].

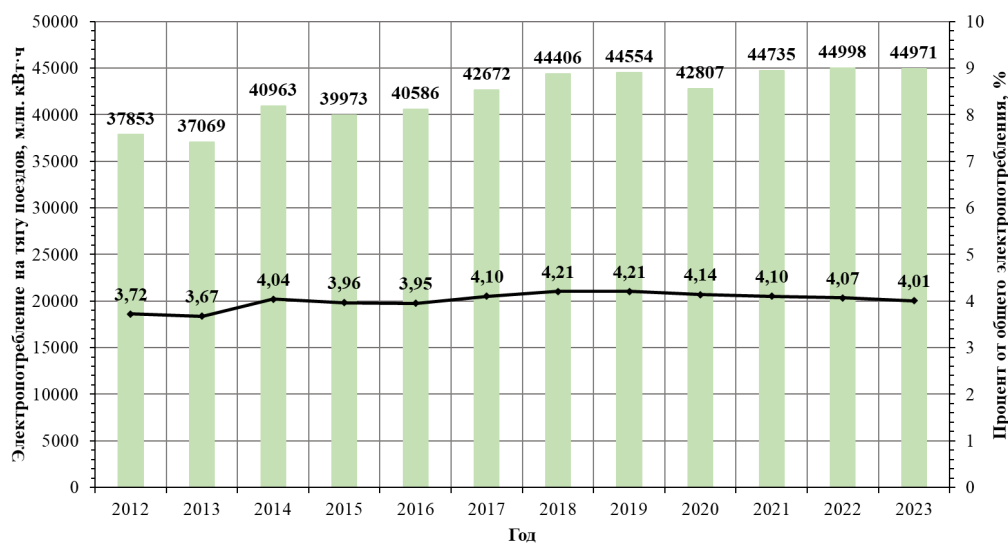


Рис. 1. Электропотребление на тягу поездов и его процент от общего электропотребления

Экономия электроэнергии на железнодорожном транспорте – актуальное направление развития. Проблемы высокого потребления электроэнергии на тягу поездов в значительно большей степени проявляют себя именно сегодня, при высоком темпе роста интенсивности движения поездов, особенно по Восточному полигону, при вождении поездов по технологии «Виртуальная сцепка» [4]. При использовании данной технологии снижается интервал времени попутного следования поездов, в результате чего увеличивается количество составов, одновременно движущихся по перегону. Однако при этом закономерно увеличивается и потребление мощности тяговых подстанций, которые в настоящее время работают на пределе своих мощностей. Поэтому для эффективного вождения поездов по технологии «Виртуальная сцепка» и, соответственно, повышения пропускной способности железных дорог, необходимо снижать расход электроэнергии на тягу поездов в тяговой сети.

Высокий расход электроэнергии современными отечественными электровозами переменного тока с коллекторным приводом обусловлен дополнительным потреблением реактивной мощности, практически в равных пропорциях с активной, что снижает КПД тяговой сети (до 0,89) за счёт увеличения в ней тока [5, 6]. Наличие реактивной мощности, в свою очередь, связано с индуктивностью оборудования электровоза (тяговые трансформаторы (ТТ), сглаживающие реакторы, тяговые двигатели и др.), с отсутствием возможности запереть тиристоры выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) электровоза, а также с наличием значительных искажений напряжения и тока на токоприёмнике, вызванных распределённой ёмкостью контактной сети и коммутацией тиристоров. Коэффициент мощности современных отечественных электровозов переменного тока с коллекторным приводом в среднем в эксплуатации составляет 0,71 и не превышает 0,84 в режиме тяги [5, 7, 8], что противоречит требованиям ГОСТ 55364-2012, согласно которому его значение должно быть не менее 0,9. Коэффициент гармонических составляющих напряжения на токоприёмнике электровоза может достигать 18 % [9] при максимальном допустимом по ГОСТ 32144-2014 значении 5 %, а коэффициент гармонических составляющих тока превышает 50 % [10]. По качественным показателям электроэнергии электровозы переменного тока с коллекторным приводом значительно уступают электровозам переменного тока с асинхронным приводом, коэффициент мощности которых составляет 0,98–0,99, а коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока составляют 1,5–3 % и 4,5–15 % соответственно [10–12]. Низкое качество электроэнергии на токоприёмниках современных отечественных электровозов с коллекторным приводом негативно влияет на работу их электрического и электронного оборудования, значительно снижая его ресурс, поддерживая тем самым положительную динамику неплановых ремонтов. Однако до сих пор отечественные электровозы переменного тока эксплуатируются с недопустимыми коэффициентами несинусоидальности напряжения и тока на токоприёмнике.

Авторами разработано решение, позволяющее значительно снизить реактивную мощность, потребляемую современным отечественным электровозом переменного тока с коллекторным приводом. Решение заключается в реализации такого способа управления ВИП, который позволил практически полностью устранить угол отставания тока сети, потребляемого электровозом, от напряжения на его токоприёмнике [13–18]. Такое положение дел становится возможным только при замене полупроводниковых приборов ВИП электровоза на полностью управляемые IGBT-транзисторы (рис. 2). Коэффициент мощности электровоза переменного тока в режиме тяги, оборудованного ВИП на базе IGBT-транзисторов, в среднем составляет 0,95 [16], что значительно выше, чем у электровоза со штатным ВИП на базе тиристоров (0,71) [5, 7]. Однако у существующих способов управления ВИП на базе IGBT-транзисторов [16, 19] имеются значительные дополнительные резервы повышения как коэффициента мощности электровоза, так и показателей качества электроэнергии на его токоприёмнике при работе в режиме тяги.

В данной работе предлагается способ управления плечами ВИП на базе IGBT-транзисторов с целью повысить коэффициент мощности современного отечественного электровоза переменного тока с коллекторным приводом в режиме тяги и значительно снизить гармонические составляющие напряжения и тока на его токоприёмнике.

Описание предлагаемого авторами способа

Способ объединяет и усовершенствует ранее предложенные авторами способы управления ВИП на базе IGBT-транзисторов, позволяющие повысить качество электроэнергии на токоприёмнике электровоза переменного тока:

– способ разнесённого управления преобразователями, заключающийся в разнесении временных интервалов работы ВИП в полупериоде питающего напряжения тяговой сети, согласно которому при включении транзисторных плеч одного ВИП выключаются транзисторные плечи другого ВИП, а

моменты включения и выключения вблизи границ полупериода разносятся на угол разнофазного управления с чередованием их по полупериодам [20–22];

– способ организации коммутации, заключающийся в разбиении большого контура коммутации плеч ВИП на несколько малых, но протекающих последовательно друг за другом и тем самым создающих условия для снижения выбросов ЭДС самоиндукции обмоток ТТ [23].

Предлагаемый способ заключается в квантовании синусоидального сигнала, амплитуда которого зависит от напряжения управления зонами регулирования, с целью получения в полупериоде амплитудно-временной области n -х количеств временных уровней, определяющих длительность работы секций вторичных обмоток ТТ электровоза переменного тока. Данный способ позволяет привести форму тока на токоприёмнике электровоза к форме синусоиды и исключить выбросы ЭДС самоиндукции обмоток ТТ за счёт организации их противофазного наложения. Электромагнитные процессы на токоприёмнике и в выпрямленной цепи электровоза переменного тока с ВИП на базе IGBT-транзисторов при работе по предлагаемому способу аналогичны изложенным ранее в статьях [20–23]. В данной статье приведены этапы его реализации, которые представлены на рис. 3–5 для электровоза с четырьмя ВИП и потележечным регулированием силы тяги.

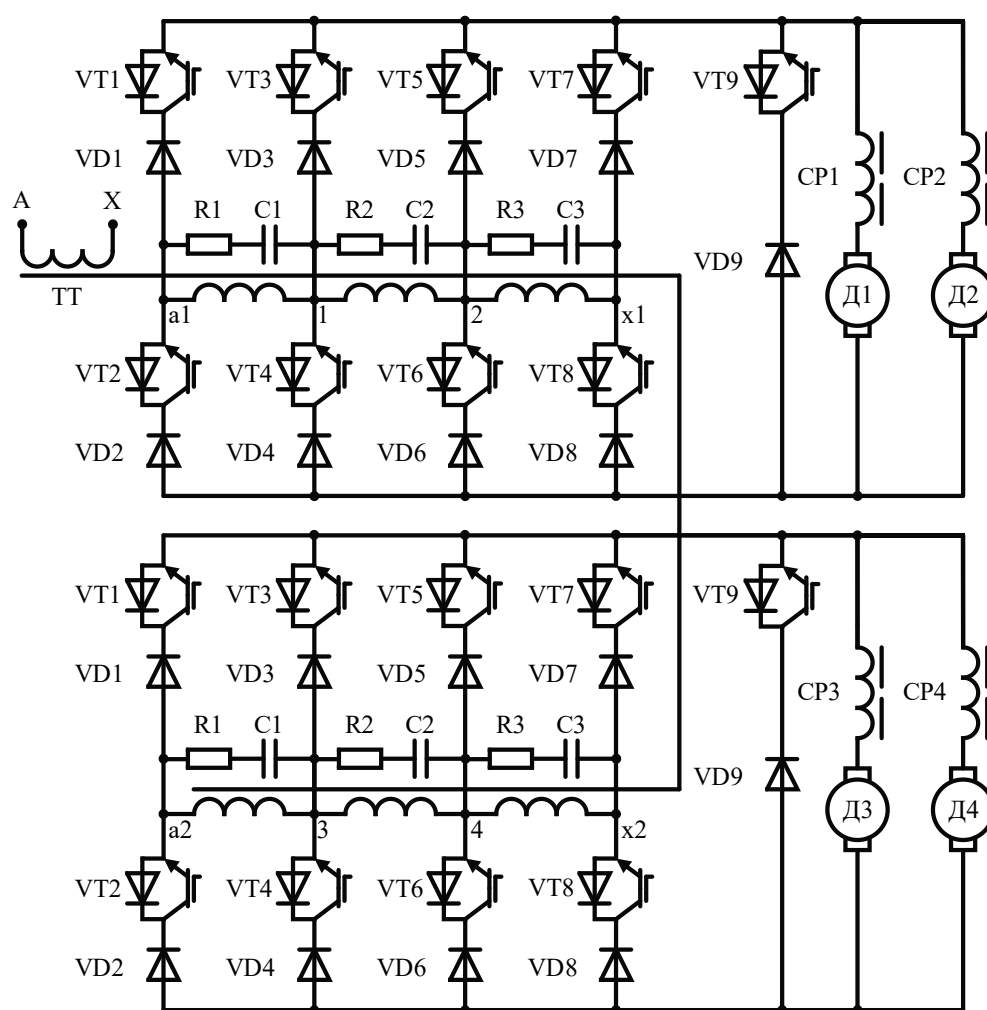


Рис. 2. Упрощённая принципиальная схема силовой цепи электровоза переменного тока с ВИП на базе IGBT-транзисторов:

$VT1$ – $VT9$ – транзисторные плечи; $VD1$ – $VD9$ – диодные плечи; TT – тяговый трансформатор;

A – X – первичная обмотка ТТ; $a1$ – 1 – 2 – $x1$, $a2$ – 3 – 4 – $x2$ – секции вторичной обмотки ТТ;

$R1$ – $R3$, $C1$ – $C3$ – снабберные цепи; $CP1$ – $CP4$ – сглаживающие реакторы; $D1$ – $D4$ – тяговые двигатели

На этапе 1 (рис. 3) задаётся напряжение управления зонами $U_{упр.зона}$, например, системой автоматики электровоза.

На этапе 2 (рис. 3) определяется значение амплитуды A_{sin} , пропорциональное напряжению управления зонами $U_{упр.зона}$, для формирования синусоидального сигнала sin .

На этапе 3 (рис. 3) формируется синусоидальный сигнал sin с амплитудой A_{sin} .

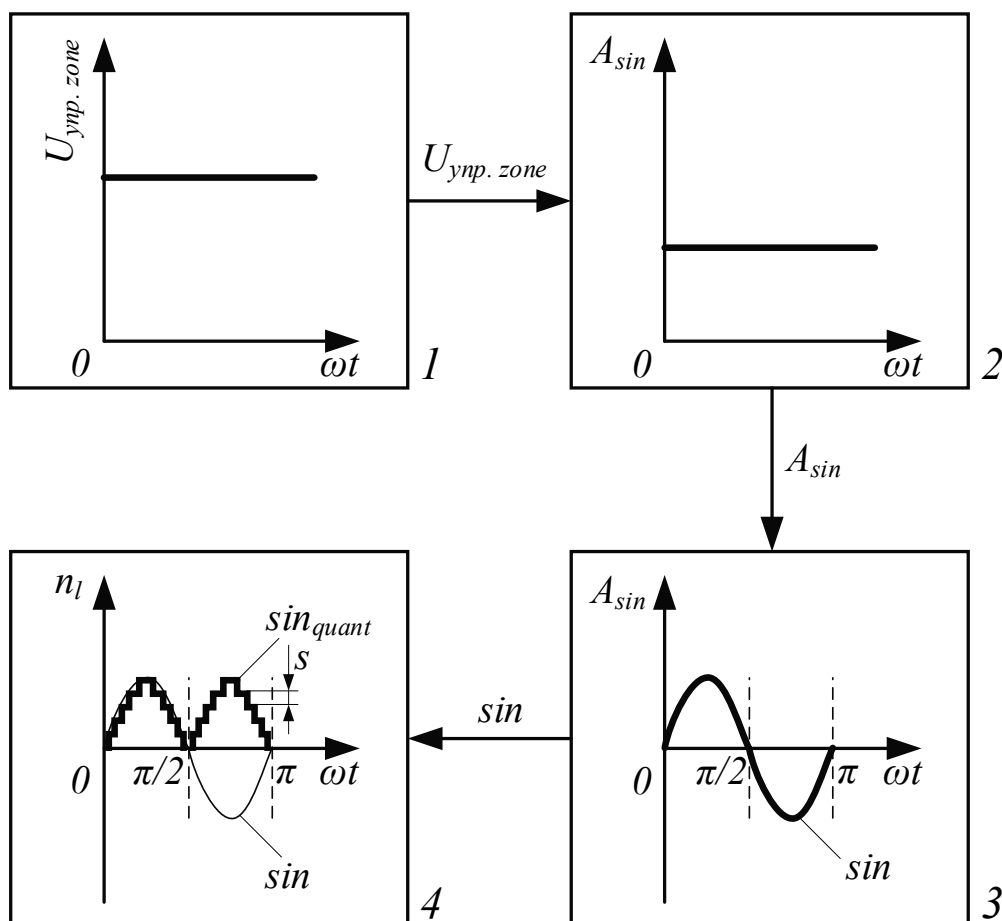


Рис. 3. Этапы получения квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} по заданному напряжению управления зонами регулирования $U_{ynp.zone}$

На этапе 4 (рис. 3) синусоидальный сигнал \sin преобразуется в квантованный синусоидальный сигнал \sin_{quant} , с помощью алгоритма квантования сигнала с фиксированным шагом s по формуле (1):

$$n_l(\omega t) = s \cdot \text{sign}(\sin(\omega t)) \cdot \text{floor}(|\sin(\omega t)|/s + 0,5), \quad (1)$$

где $\sin(\omega t)$ – синусоидальный сигнал \sin ;
 s – шаг квантования по уровню;
 floor – функция округления до меньшего целого числа;
 sign – функция знака;
 $n_l(\omega t)$ – уровень квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} .

Квантованный синусоидальный сигнал \sin_{quant} используется для установления в полупериоде амплитудно-временной области n -х временных уровней, определяющих алгоритм работы управляемых силовых полупроводниковых приборов плеч ВИП (рис. 2). Максимальное количество уровней квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} ограничено значением n_{lmax} , рассчитываемым по формуле (2):

$$n_{lmax} = n_{z(max)} \cdot n_{vip(max)}, \quad (2)$$

где $n_{z(max)}$ – количество зон регулирования ВИП;
 $n_{vip(max)}$ – количество ВИП в электровозе.

В рассматриваемом случае (электровоз с четырьмя ВИП и потележечным регулированием силы тяги) $n_{z(max)} = n_{vip(max)} = 4$.

На этапе 5 (рис. 4) фиксируются и запоминаются временные моменты возрастания уровня $a_{n_{li}}^{n_{zi}}$ квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} , где n_{zi} – номер i -й зоны регулирования ВИП, n_{li} – номер i -го уровня сигнала \sin_{quant} . Нумерация индексов a осуществляется с первой зоны регулирования ($n_{zi} = 1$) и первого уровня сигнала \sin_{quant} ($n_{li} = 1$). В моменты возрастания уровня квантованного синусоидального

сигнала \sin_{quant} значение n_{li} увеличивается на единицу, если $n_{li} = n_{вин(max)}$, то следующий момент возрастания \sin_{quant} будет обозначен для следующей зоны регулирования, то есть для $n_{zi} = 2$, нумерация n_{li} начнётся снова с 1. Моменты убывания уровня $b_{n_{li}}^{n_{zi}}$ квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} рассчитываются как $b_{n_{li}}^{n_{zi}} = \pi - a_{n_{li}}^{n_{zi}}$. Каждый i -й уровень сигнала \sin_{quant} определяет длительность работы секций вторичных обмоток ТТ (рис. 2).

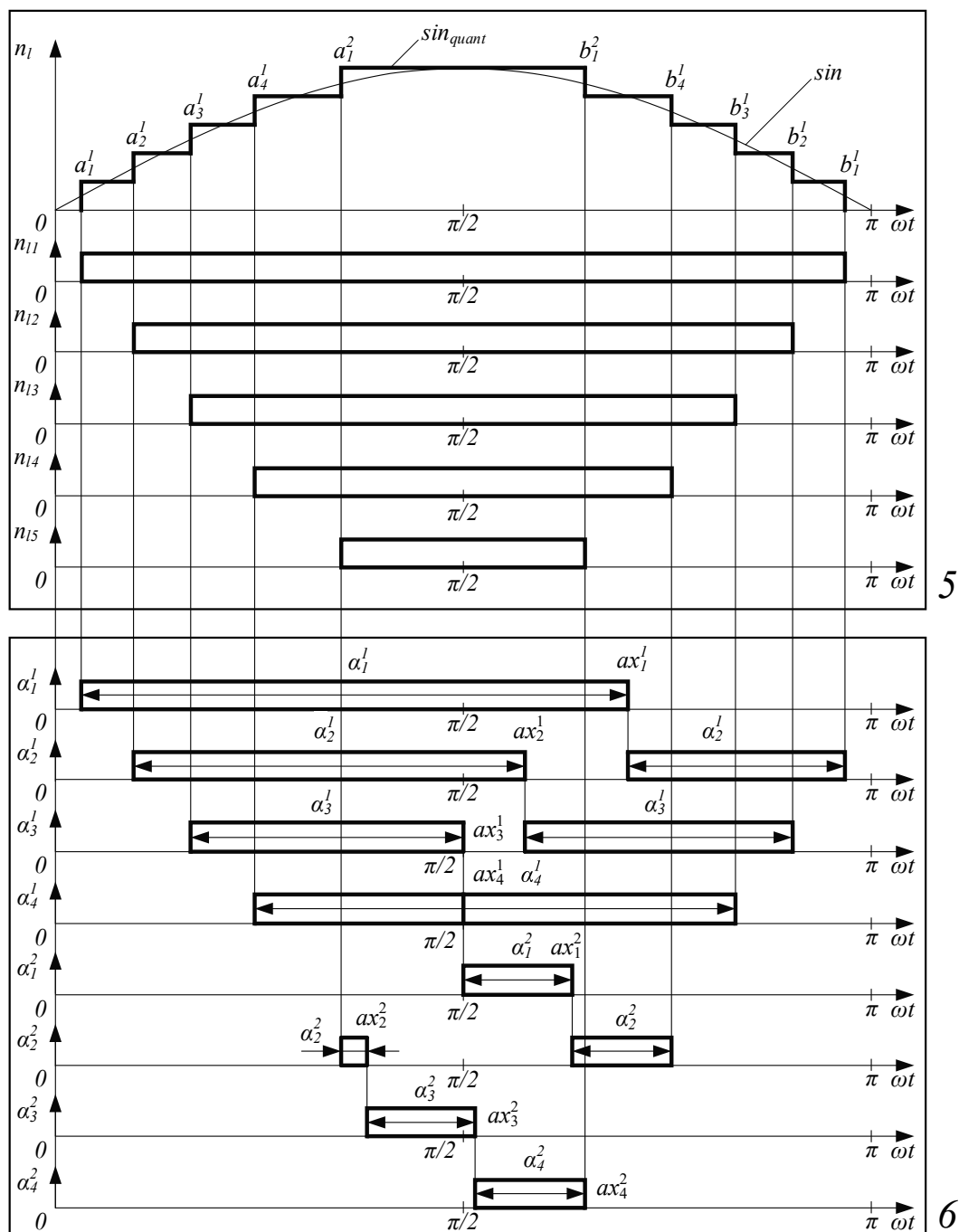


Рис. 4. Этапы реализации в полупериоде амплитудно-временной области n -х временных уровней, моментов подключения/отключения секций вторичных обмоток ТТ электровоза и их временных интервалов работы

На этапе 6 (рис. 4) моменты подключения и отключения секций вторичных обмоток ТТ приравниваются моментам возрастания $a_{n_{li}}^{n_{zi}}$ и убывания $b_{n_{li}}^{n_{zi}}$ квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} и определяются моменты подключения и отключения секций вторичных обмоток ТТ внутри амплитудно-временной области $ax_{n_{винi}}^{n_{zi}}$, которые в совокупности с известными временными моментами $a_{n_{li}}^{n_{zi}}$ и $b_{n_{li}}^{n_{zi}}$ представляют собой временные интервалы работы секций вторичных обмоток

ТТ $\alpha_{n_{\text{вип}i}}^{n_{zi}}$. При этом обеспечивается идентичное напряжение тяговых двигателей $U_{dreq}^{n_{zi}}$. Расчёт производится для всех ВИП, при этом каждому ВИП присваивается порядковый номер $n_{\text{вип}i}$, лежащий в диапазоне от 1 до $n_{\text{вип}(\max)}$, расчёт производится с первого ВИП и секции вторичной обмотки ТТ, образующей первую зону регулирования, то есть секции 1–2 (рис. 2), следующим образом. Момент подключения секции вторичной обмотки ТТ 1–2 (рис. 2), образующей первую зону регулирования ($n_{zi} = 1$) первого ВИП ($n_{\text{вип}i} = 1$) принимается равным a_1^1 , то есть первому моменту возрастания квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} ($n_{li} = 1$). Далее производится расчёт момента отключения данной секции вторичной обмотки ТТ $\alpha_{n_{\text{вип}i}}^{n_{zi}}$ по формуле (3):

$$\alpha_{n_{\text{вип}i}}^{n_{zi}} = \cos^{-1} \left(\cos(a_{n_{li}}^{n_{zi}}) - \frac{\pi \cdot U_{dreq}^{n_{zi}}}{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}} \right), \quad (3)$$

где $U_{\Delta 2}$ – шаг изменения напряжения при переключении секций вторичных обмоток ТТ (315 В).

Таким образом, временной интервал работы секции вторичной обмотки ТТ 1–2 (рис. 2), образующей первую зону регулирования, первого ВИП $\alpha_{n_{\text{вип}i}}^{n_{zi}} = a_1^1$, располагается между a_1^1 и $\alpha_{n_{\text{вип}i}}^1$.

Момент подключения секции вторичной обмотки ТТ 3–4 (рис. 2), образующей первую зону регулирования ($n_{zi} = 1$), второго ВИП ($n_{\text{вип}i} = 2$), принимается равным $\alpha_{n_{\text{вип}(i-1)}}^{n_{zi}}$, то есть моменту отключения секции вторичной обмотки ТТ 1–2 (рис. 2), образующей первую зону регулирования первого ВИП $\alpha_{n_{\text{вип}i}}^1$. Далее производится проверка достаточности напряжения $U_{drem_{n_{li}}}^{n_{zi}}$ оставшейся части n -го уровня амплитудно-временной области ($n_{li} = 1$), то есть $U_{drem_1}^1$, для обеспечения требуемого напряжения тяговых двигателей $U_{dreq}^{n_{zi}}$, то есть U_{dreq}^1 , по формуле (4):

$$U_{drem_{n_{li}}}^{n_{zi}} = \frac{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}}{\pi} (\cos(\alpha_{n_{\text{вип}(i-1)}}^{n_{zi}}) - \cos(b_{n_{li}}^{n_{zi}})). \quad (4)$$

В случае если $U_{dreq}^{n_{zi}} \leq U_{drem_{n_{li}}}^{n_{zi}}$, то расчёт момента отключения секции вторичной обмотки ТТ 3–4 второго ВИП (рис. 2) производится по формуле (5):

$$\alpha_{n_{\text{вип}i}}^{n_{zi}} = \cos^{-1} \left(\cos(\alpha_{n_{\text{вип}(i-1)}}^{n_{zi}}) - \frac{\pi \cdot U_{dreq}^{n_{zi}}}{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}} \right). \quad (5)$$

В случае если $U_{dreq}^{n_{zi}} > U_{drem_{n_{li}}}^{n_{zi}}$, то расчёт момента отключения секции вторичной обмотки ТТ 3–4 второго ВИП (рис. 2) производится по формуле (6):

$$\alpha_{n_{\text{вип}i}}^{n_{zi}} = \cos^{-1} \left(\cos(\alpha_{n_{\text{вип}(i-1)}}^{n_{zi}}) + \cos(a_{n_{li}}^{n_{zi}}) - \cos(b_{n_{li}}^{n_{zi}}) - \frac{\pi \cdot U_{dreq}^{n_{zi}}}{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}} \right). \quad (6)$$

Аналогично производится дальнейший расчёт моментов подключения и отключения секций вторичных обмоток ТТ $a1-1$, $1-2$, $2-x1$, $a2-3$, $3-4$, $4-x2$ следующих ВИП электровоза, в том числе образующих $2 \dots n_{z(\max)}$ зоны регулирования. При этом напряжение тяговых двигателей, прикладываемое секциями вторичных обмоток ТТ, образующих зону регулирования, будет ограничено временным интервалом работы последнего по порядковому номеру ВИП, так как границами его работы в полупериоде будут выступать наиболее близкие к середине полупериода значения $a_{n_{li}}^{n_{zi}}$ и $b_{n_{li}}^{n_{zi}}$. Поэтому при выполнении равенства (7) дальнейшее увеличение напряжения тяговых двигателей осуществляется подключением дополнительных секций вторичных обмоток ТТ, образуя тем самым следующую зону регулирования, начиная с плеч первого ВИП электровоза.

$$\frac{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot (\cos(a_{n_{li}}^{n_{zi}}) - \cos(b_{n_{li}}^{n_{zi}})) = U_{dreq}^{n_{zi}}. \quad (7)$$

Момент подключения секций вторичной обмотки ТТ для образования следующей зоны регулирования (секций $a1-1$ и $a2-3$ для образования второй зоны регулирования) принимается равным $\alpha_{n_{\text{вип}(i-1)}}^{n_{zi}}$. То есть в момент отключения секции вторичной обмотки ТТ 3–4 четвёртого ВИП происходит подключение секции вторичной обмотки ТТ $a1-1$ первого ВИП (рис. 4).

На этапе 7 (рис. 5) суммируются полученные временные интервалы $\alpha_{n_{\text{вип}i}}^{n_{zi}}$ работы секций вторичных обмоток ТТ каждого ВИП, в результате получаем алгоритм работы силовых полупроводниковых приборов плеч ВИП $\alpha_{n_{\text{вип}i}}$. При $\alpha_{n_{\text{вип}i}} = s$ работают плечи ВИП, подключающие и отключающие секции вторичных обмоток ТТ для образования первой зоны регулирования, т. е. плечи VT3-VT6 подключают обмотки 1–2 и 3–4 (рис. 2), при $\alpha_{n_{\text{вип}i}} = 2 \cdot s$ работают плечи ВИП, подключающие и отключающие секции вторичных обмоток ТТ для образования второй зоны регулирования, то есть плечи VT1-VT2 подключают обмотки $a1-1$ и $a2-3$, а плечи VT3-VT6 подключают обмотки 1–2 и 3–4 (рис. 2), и т. д. до $\alpha_{n_{\text{вип}i}} = n_{z(\max)} \cdot s$.

Таким образом, в процессе регулирования напряжение тяговых двигателей равномерно распределяется в полупериоде, что приводит ток на токоприёмнике электровоза к форме синусоиды. При этом момент подключения секции вторичной обмотки ТТ к тяговым двигателям плечами ВИП всегда равен моменту отключения секции вторичной обмотки ТТ от тяговых двигателей плечами другого ВИП. Такой подход позволяет значительно ограничить выбросы ЭДС самоиндукции обмоток ТТ электровоза.

На рис. 6 представлены формы выпрямленного напряжения на выходе ВИП u_{deun} , средневыврямленное напряжение U_d , формы токов на токоприёмнике электровоза i_l без индуктивности сети (черная линия) и с учётом индуктивности сети (красная линия).

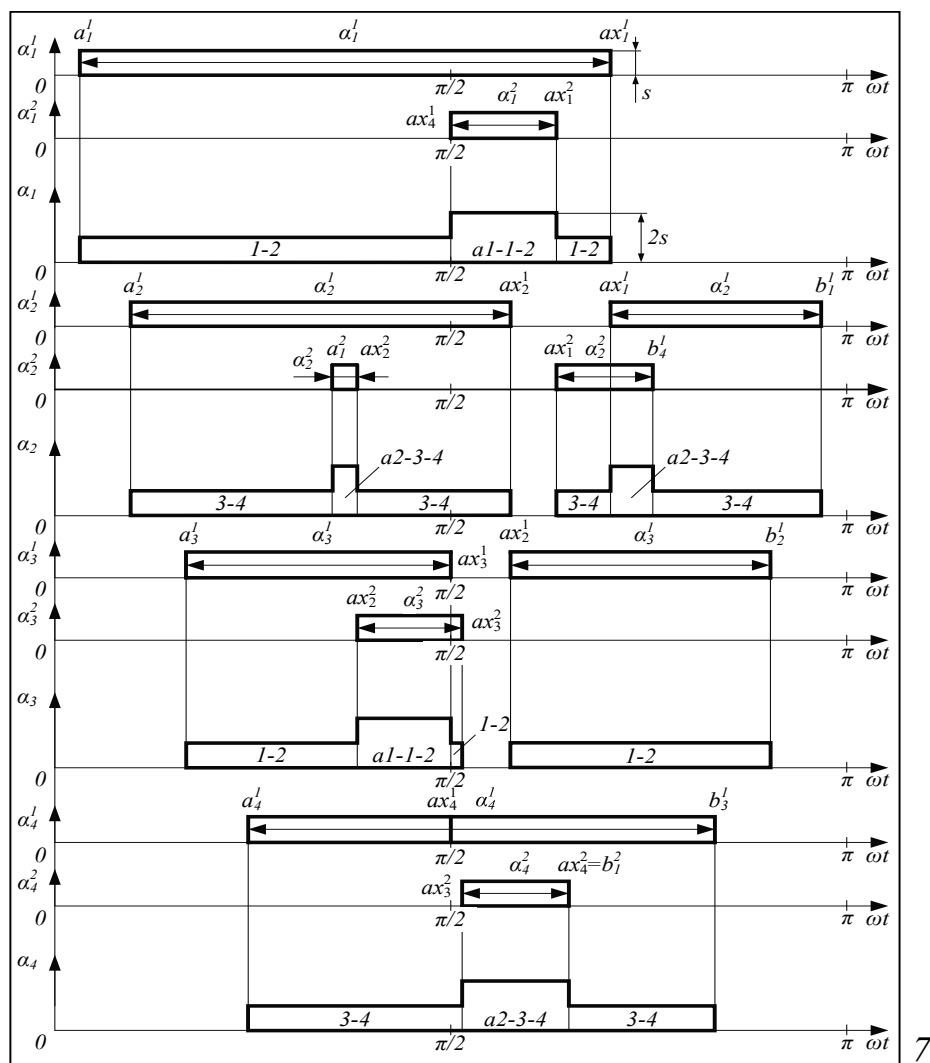


Рис. 5. Этап реализации итогового алгоритма работы ВИП по вычисленным временным интервалам работы секций вторичных обмоток ТТ электровоза

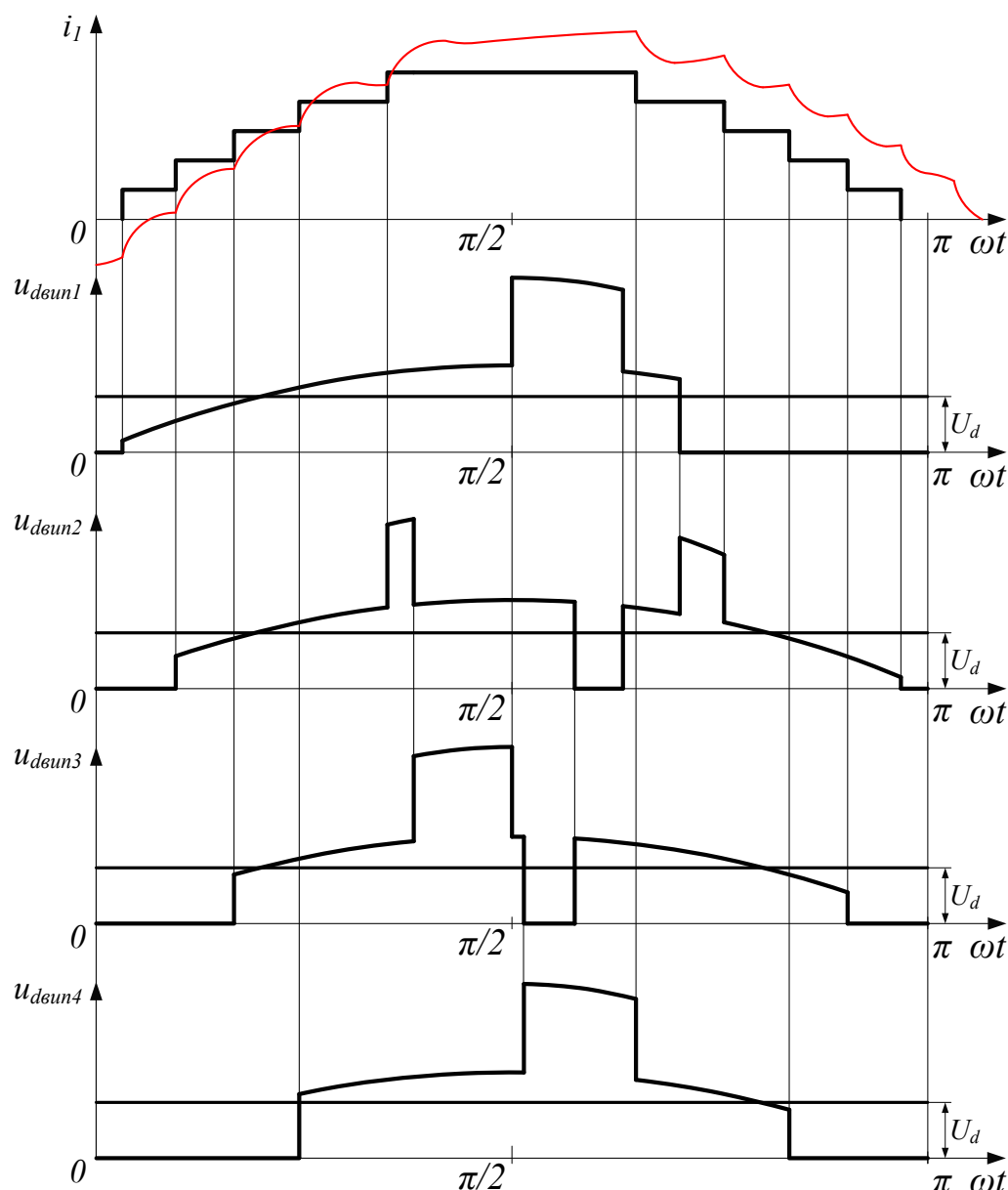


Рис. 6. Формы выпрямленного напряжения на выходе ВИП $u_{dвип}$ и формы токов на токоприёмнике электровоза i_l без индуктивности сети и с учётом индуктивности сети

Выводы

Современные отечественные электровозы переменного тока с коллекторным приводом и тиристорными ВИП при их работе имеют низкий коэффициент мощности (в среднем 0,71 в режиме тяги) и значительные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока на токоприёмнике (18 и 50 % соответственно), что значительно ограничивает применение технологии «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне за счёт потребления реактивной мощности электровозами и низкого КПД тяговой сети (0,89).

Низкое качество электроэнергии на токоприёмниках современных отечественных электровозов с коллекторным приводом и тиристорными ВИП негативно влияет на работу их электрического и электронного оборудования, значительно снижая его ресурс, поддерживая тем самым положительную динамику неплановых ремонтов. Однако до сих пор отечественные электровозы переменного тока эксплуатируются с недопустимыми коэффициентами несинусоидальности напряжения и тока на токоприёмнике.

Эксплуатация современных отечественных электровозов переменного тока с коллекторным приводом и транзисторными ВИП с предлагаемым способом управления в режиме тяги позволит повысить коэффициент мощности электровоза до 0,99 и снизить коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока на токоприёмнике до 4 и 10 % соответственно, что значительно повысит

надёжность работы электровозов и эффект от вождения поездов с применением технологии «Виртуальная сцепка».

Список литературы

- 1 Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529 // Президент России : официальный сайт. – 2025. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50755> (дата обращения: 17.04.2025).
- 2 Отчеты о функционировании ЕЭС // АО «СО ЕЭС» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (дата обращения: 17.04.2025).
- 3 Отчеты об устойчивом развитии // ОАО «РЖД» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9386/page/103290?id=17643> (дата обращения: 17.04.2025).
- 4 Технология «Виртуальная сцепка» // ООО «АВП Технология» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://avpt.ru/products/virtualnaya-stseпка/> (дата обращения: 17.04.2025).
- 5 Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава / под редакцией И. К. Лакина // Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Красноярск, 24–25 марта 2020 г. – Красноярск : АО «ДЦВ Красноярской ж.д.», 2020. – 360 с.
- 6 **Фролов, Н. О.** Электрические железные дороги : методические рекомендации / Н. О. Фролов, Н. Г. Фетисова. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 93 с.
- 7 **Мамошин, Р. Р.** Энергетика системы переменного тока / Р. Р. Мамошин // Железнодорожный транспорт. – 1987. – № 9. – С. 69–70.
- 8 **Тихменев, Б. Н.** Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – Москва : Транспорт, 1988. – 311 с.
- 9 **Клинкова, О. А.** Внутрисистемный учет электрической энергии и контроль ее качества на электровозах переменного тока : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Клинкова Ольга Александровна ; Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – Комсомольск-на-Амуре, 2008. – 149 с.
- 10 Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока / А. А. Зарифьян, А. М. Евстафьев // Известия Петербургского университета путей

References

- 1 Decree of the President of the Russian Federation No. 529, dated June 18, 2024 // President of Russia : official website. – 2025. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50755> (date of access: 04/17/2025).
- 2 Reports on the functioning of the UPS // JSC «SO UPS» : official website. – 2025. – URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (date of access: 04/17/2025).
- 3 Reports on sustainable development // JSC Russian Railways : official website. – 2025. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9386/page/103290?id=17643> (date of access: 04/17/2025).
- 4 Technology “Virtual Coupling” // LLC «AVP Technology» : official website. – 2025. – URL: <https://avpt.ru/products/virtualnaya-stseпка/> (date of access: 04/17/2025).
- 5 Operation and maintenance of electronic and microprocessor equipment of traction rolling stock / edited by I. K. Lakin // Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, Krasnoyarsk, 24–25 March 2020. – Krasnoyarsk : JSC «Road Center for the Implementation of the Krasnoyarsk Railway», 2020. – 360 p.
- 6 **Frolov, N. O.** Electric railways : method. recommendations / N. O. Frolov, N. G. Fetisova. – Yekaterinburg : USURT Publishing House, 2012. – 93 p.
- 7 **Mamoshin, R. R.** Power engineering of an alternating current system / R. R. Mamoshin // Railway transport. – 1987. – No. 9. – P. 69–70.
- 8 **Tikhmenev, B. N.** AC electric locomotives with thyristor converters / B. N. Tikhmenev, V. A. Kuchumov. – Moscow : Transport, 1988. – 311 p.
- 9 **Klinkova, O. A.** In-system accounting of electric energy and control of its quality on electric locomotives of alternating current : specialty 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems” : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Klinkova Olga Aleksandrovna ; Far Eastern State Transport University. – Komsomolsk-on-Amur, 2008. – 149 p.
- 10 Energy consumption quality indicators in collector and asynchronous traction drives of AC electric locomotives / A. A. Zarifyan, A. M. Evstafiev // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2023. – Vol. 20, No. 4.

сообщения. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 987–998. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-987-998.

11 Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 1. – С. 77–92. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92.

12 Режимы электротяговой сети при эксплуатации электровозов ВЛ-80р и УТЧ-1 / А. Т. Бурков, М. М. Мирмаитов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – Т. 13, № 2. – С. 146–160. – ISSN 1815-588X.

13 Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на IGBT модулях / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2013. – №. 9. – С. 17–24. – ISBN 978-5-262-00710-3.

14 Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, С. Г. Шрамко // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 46–51. – ISSN 2074-9325.

15 Структура математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока в режиме тяги / Д. А. Яговкин, А. Ю. Портной, О. В. Мельниченко [и др.] // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды II Всероссийской научно-практической конференции, Хабаровск, 20–21 сентября 2018 года. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 121–129. – ISBN 978-5-262-00831-5.

16 Яговкин, Д. А. Совершенствование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока и принципа его управления в режиме тяги 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яговкин Дмитрий Андреевич; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Иркутск, 2016. – 162 с.

17 Экспериментальный стенд для исследования процессов работы тиристорного и транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме тяги на высших зонах регулирования / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, С. Г. Шрамко //

– P. 987–998. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-987-998.

11 Experimental research of energetic efficiency of electric locomotive asynchronous traction Ddrive at changing load/ A. A. Zarifyan, P. G. Kolpakhchyan // Bulletin of scientific research results. – 2023. – No. 1. – P. 77–92. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92.

12 Modes of the electric traction network in the operation of VL80p and UTY-1 electric locomotives/ A. T. Burkov, M. M. Mirmaitov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2016. – Vol. 13, No. 2. – P. 146–160. – ISSN 1815-588X.

13 Development of a new energy-saving control algorithm for a RIC electric locomotive based on IGBT modules / D. A. Yagovkin, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy // Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock. – 2013. – No. 9. – P. 17–24. – ISBN 978-5-262-00710-3.

14 The new rectifier-inverter converter for AC traction rolling stock with the high power characteristics in a traction mode / D. A. Yagovkin, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, S. G. Shramko // Science and technology in transport. – 2014. – No. 3 – P. 46–51. – ISSN 2074-9325.

15 The structure of the mathematical model of a rectifier-inverter converter on IGBT transistors for an alternating current electric locomotive in traction mode / D. A. Yagovkin, A. Yu. Portnoy, O. V. Mel'nichenko and others// Electric drive in transport and industry : proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference, Khabarovsk, September 20–21, 2018. – Khabarovsk : FESTU, 2018. – P. 121–129. – ISBN 978-5-262-00831-5.

16 Yagovkin, D. A. Improvement of the rectifier-inverter converter of an alternating current electric locomotive and the principle of its control in traction mode 05.22.07 “Railway rolling stock, train traction and electrification” : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Yagovkin Dmitry Andreevich; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. – Irkutsk, 2016. – 162 p.

17 Experimental stand for studying the processes of operation of thyristor and transistor rectifier-inverter converters of an alternating current electric locomotive in traction mode in higher control zones / D. A. Yagovkin, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, S. G. Shramko // Bulletin of Irkutsk State

Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 11 (94). – С. 251–259. – ISSN 1814-3520.

18 Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги / В. Н. Знаенко, А. О. Линьков, О. В. Мельниченко // Известия Транссиба. – 2021. – №. 1 (45). – С. 66–75. – ISSN 2220-4245.

19 **Мельниченко, О. В.** Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока : 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Мельниченко Олег Валерьевич ; Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – Хабаровск, 2015. – 392 с.

20 Разработка способа разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями электровоза на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения / П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2024. – Т. 21, № 1. – С. 252–264. – DOI 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264.

21 **Григоренко, П. В.** Увеличение пропускной способности железных дорог при повышении коэффициента мощности электровозов и качества электроэнергии тяговой сети / П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. С. Самойлова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2024. – Т. 1. – С. 91–96. – ISBN 978-5-262-00975-6.

22 **Григоренко, П. В.** Повышение энергоэффективности электровозов переменного тока для увеличения пропускной способности железных дорог Восточного полигона / П. В. Григоренко, А. С. Самойлова // Молодежная наука : Труды XXVIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 25 апреля 2024 года. – Красноярск : ФГБОУ ВО ИрГУПС, 2024. – С. 100–105. – ISBN 978-5-907865-01-3.

23 Повышение качества электроэнергии на токоприемнике электровоза переменного тока с транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями в режиме тяги / П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (64). – С. 42–54. – DOI 10.20291/2079-0392-2024-4-42-54.

Transport University. – 2014. – No. 11 (94). – P. 251–259. – ISSN 1814-3520.

18 Rectifier-inverter converter of an electric locomotive based on IGBT-transistors as a way to increase the capacity A. O. Linkov, O. V. Mel'nichenko of railway sections / V. N. Znaenok, O. V. Mel'nichenko // Izvestiya Transsiba. – 2021. – No. 1 (45). – P. 66–75. – ISSN 2220-4245.

19 **Melnichenko, O. V.** Improving the energy efficiency of traction electric drives of alternating current electric locomotives :05.09.03 “Electrotechnical Complexes and Systems” : dissertation for the degree of doctor of engineering sciences / Mel'nichenko Oleg Valerievich ; Far Eastern State Transport University. – Khabarovsk, 2015. – 392 p.

20 Development of a method for spaced control of transistor traction converters of an electric locomotive in the first rectified voltage regulation zone / P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoilova // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2024. – Vol. 21, No. 1. – P. 252–264. – DOI 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264.

21 **Grigorenko, P. V.** Increasing the capacity of railways by an increase in the power factor of electric locomotives and the quality of electricity in the traction network / P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. S. Samoilova // Scientific, technical and economic cooperation between Asia-Pacific countries in the 21st century. – 2024. – Vol. 1. – P. 91–96. – ISBN 978-5-262-00975-6.

22 **Grigorenko, P. V.** Improving the energy efficiency of AC electric locomotives to increase the capacity of the railways of the Eastern polygon / P. V. Grigorenko, A. S. Samoilova // Youth Science : Proceedings of the XXVIII All-Russian student scientific and practical conference, Krasnoyarsk, April 25, 2024. – Krasnoyarsk : ISTU, 2024. – P. 100–105. – ISBN 978-5-907865-01-3.

23 Improving the quality of electricity at current collector of an alternating current electric locomotive with transistor rectifier-inverter converters in traction mode / P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoilova // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2024. – No. 4 (64) – P. 42–54. – DOI 10.20291/2079-0392-2024-4-42-54.

P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoilova

IMPROVING THE POWER QUALITY ON THE PANTOGRAPH OF A MODERN DOMESTIC ALTERNATING CURRENT ELECTRIC LOCOMOTIVE WITH A COLLECTOR DRIVE

Abstract. The article discusses the problems of high consumption of electricity from the traction network by modern domestic AC electric locomotives with collector drive and low power quality on their pantographs. It was found out that these problems are caused by the presence of reactive power in the contact network, consumed by electric locomotives in almost equal proportions with the active one, and significant distortions of voltage and current. A new method for controlling the arms of rectifier-inverter converters based on IGBT transistors is proposed, which makes it possible to increase the power factor of a modern domestic AC electric locomotive with a collector drive to 0.99 and reduce the coefficients of the harmonic components of voltage and current on its current collector to 4 % and 10 %, respectively. The proposed method will significantly improve the efficiency of driving trains using the "Virtual Coupling" technology.

Keywords: power quality, power factor, energy efficiency, alternating current electric locomotive, rectifier-inverter converter, IGBT transistors, collector drive, Virtual Coupling technology.

For citation: Improving the power quality on the pantograph of a modern domestic alternating current electric locomotive with a collector drive / P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoilova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 114–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_114.

Сведения об авторах

Григоренко Павел Владимирович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроподвижной состав»,
аспирант,
e-mail: grigorenko.pv@mail.ru

Мельниченко Олег Валерьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроподвижной состав»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: olegmelnval@mail.ru

Портной Александр Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Физика, механика и приборостроение»,
доктор физико-математических наук,
доцент,
e-mail: portnoy_alexander@mail.ru

Самойлова Анастасия Сергеевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроподвижной состав»,
аспирант,
e-mail: a.s.samoilova@mail.ru

Information about the authors

Grigorenko Pavel Vladimirovich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair "Electric Rolling Stock",
Postgraduate Student,
e-mail: grigorenko.pv@mail.ru

Mel'nichenko Oleg Valerievich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair "Electric Rolling Stock",
Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
e-mail: olegmelnval@mail.ru

Portnoy Alexander Yurievich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair "Physics, Mechanics and Instrument Engineering",
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: portnoy_alexander@mail.ru

Samoilova Anastasia Sergeevna

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair "Electric Rolling Stock",
Postgraduate Student,
e-mail: a.s.samoilova@mail.ru

Б. Ю. Калмыков, П. В. Харламов, О. М. Калмыкова

ПОВЫШЕНИЕ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОБУСОВ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПАССАЖИРСКИХ СИДЕНИЙ

Аннотация. Статья посвящена вопросам повышения пассивной безопасности авто-транспортных средств на примере автобусов за счет совершенствования конструкций пассажирских сидений. Исследования проводились с применением методов «Дерево целей», «Экспертных оценок», «Диаграмма Парето», «АВС-метод». Рассмотрены способы достижения цели «Повышение безопасности пассажирских сидений при опрокидывании». На основе проведенного анализа предложено применить дополнительное устройство, которое в случае опрокидывания автобуса поворачивало бы пассажирское сиденье в поперечной плоскости автобуса в сторону, противоположную опрокидыванию. Данное устройство, предназначенное для поворота пассажирского сиденья, позволяет пассажирам во время опрокидывания автобуса сохранять устойчивое положение.

Ключевые слова: пассивная безопасность автобусов, пассажирское сиденье, устойчивость пассажира, опрокидывание.

Для цитирования: Калмыков, Б. Ю. Повышение пассивной безопасности автобусов за счет совершенствования конструкций пассажирских сидений / Б. Ю. Калмыков, П. В. Харламов, О. М. Калмыкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 126–131. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_126.

Для проведения анализа работ в области повышения пассивной безопасности за счет совершенствования конструкций пассажирских сидений целесообразно воспользоваться методом «Дерево целей» [1].

Генеральной целью – Ц, или целью первого уровня, является «Повышение пассивной безопасности автобусов путем совершенствования конструкций пассажирских сидений» (рис. 1) [1, 2].



Рис. 1. Дерево целей

Для достижения цели первого уровня сформулируем цели второго уровня (см. рис. 1):

- повышение прочности конструкции пассажирских сидений (Ц1);
- повышение прочности креплений пассажирских сидений (Ц2);
- повышение безопасности пассажирских сидений при опрокидывании (Ц3);
- повышение безопасности пассажирских сидений при столкновении (Ц4);
- повышение безопасности пассажирских сидений при боковом ударе (Ц5);
- повышение безопасности пассажирских сидений при ударе сзади (Ц6);

– внедрение новых систем безопасности для пассажирских сидений (Ц7).

Для определения наиболее перспективных целей второго уровня дерева целей определим с помощью метода экспертных оценок ранги этих целей.

В исследовании приняли участие 11 экспертов. Каждому из них было предложено заполнить табл. 1, указав для каждой цели значение рангов от 7 до 1, где 7 – максимальный вклад цели для достижения генеральной цели, 1 – минимальный вклад.

Таблица 1

Форма определения ранга целей, заполняемая экспертами

Номер цели	Наименование цели	Ранг цели
Ц1	Повышение прочности конструкции пассажирских сидений	
Ц2	Повышение прочности креплений пассажирских сидений	
Ц3	Повышение безопасности пассажирских сидений при опрокидывании	
Ц4	Повышение безопасности пассажирских сидений при столкновении	
Ц5	Повышение безопасности пассажирских сидений при боковом ударе	
Ц6	Повышение безопасности пассажирских сидений при ударе сзади	
Ц7	Внедрение новых систем безопасности для пассажирских сидений	

По результатам опроса экспертов была сформирована табл. 2.

Таблица 2

Ранговые оценки объектов экспертами

Номер эксперта (i)	Объекты (j)							Сумма рангов
	Ц1	Ц2	Ц3	Ц4	Ц5	Ц6	Ц7	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	7	6	4	3	2	1	5	28
2	6	7	5	3	1	2	4	28
3	5	7	4	2	3	1	6	28
4	7	6	5	3	2	1	4	28
5	7	6	5	3	1	2	4	28
6	6	7	4	2	3	1	5	28
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	6	7	5	3	2	1	4	28
8	7	6	4	1	2	3	5	28
9	6	5	4	3	1	2	7	28
10	7	6	5	3	2	1	4	28
11	7	4	5	3	1	2	6	28
Сумма рангов \sum_j	71	67	50	29	20	17	54	308

Проведем оценку согласованности мнений экспертов посредством расчета коэффициента конкордации (табл. 3).

Таблица 3

Промежуточные результаты оценки согласованности мнений экспертов

Последовательность оценки согласованности мнений экспертов	Значения						
1 Суммы рангов	71	67	50	29	20	17	54
2 Среднее значение	44						
3 Алгебраические разности $S_j - \bar{S}$	27	23	6	-15	-24	-27	10
4 Квадраты алгебраических разностей $(S_j - \bar{S})^2$	729	529	36	225	576	729	100

Сумма квадратов алгебраических разностей равна $K = 2924$.

Определим максимальный суммарный квадрат алгебраических разностей:

$$K_{\max} = \frac{1}{12} m^2 (n^3 - n), \quad (1)$$

где m – число экспертов; n – число целей.

Получим

$$K_{\max} = \frac{1}{12} 11^2 (7^3 - 7) = 3388.$$

Рассчитаем коэффициент конкордации по формуле

$$K_{\text{кон}} = \frac{K}{K_{\max}}. \quad (2)$$

Подставим значения в формулу (2), получим

$$K_{\text{кон}} = \frac{2924}{3388} = 0,86.$$

Полученное значение коэффициента конкордации больше 0,5 говорит о высокой сходимости мнений экспертов, следовательно, можно будет использовать эту информацию для дальнейшей работы.

Полученные результаты по определению наиболее перспективных целей второго уровня, необходимых для достижения генеральной цели, представим в виде диаграммы Парето (табл. 4).

Таблица 4

Таблица данных для построения диаграммы Парето

Обозначения целей	Сумма баллов, полученных от экспертов	Накопленная сумма баллов экспертов	Процент от экспертных баллов в общей сумме	Накопленный процент
Ц1	71	71	23,1 %	23,1 %
Ц2	67	138	21,8 %	44,9 %
Ц7	54	192	17,5 %	62,4 %
Ц3	50	242	16,2 %	78,6 %
Ц4	29	271	9,4 %	88,0 %
Ц5	20	291	6,5 %	94,5 %
Ц6	17	308	5,5 %	100 %
Итого	308	—	100	—

На рис. 2 представлена диаграмма Парето.

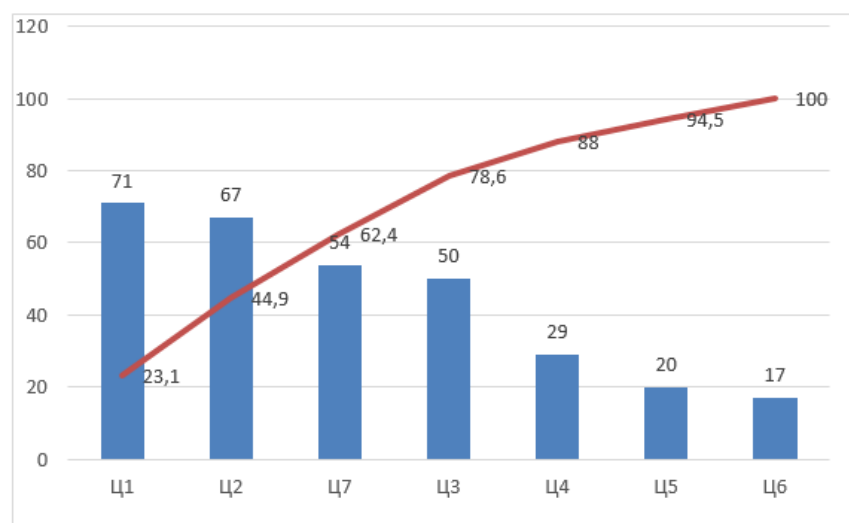


Рис. 2. Диаграмма Парето

Как видно из диаграммы Парето (см. рис. 2), цели Ц1, Ц2, Ц7, Ц3 являются приоритетными для

достижения генеральной цели и относятся к группе А (АВС-метод). Цели Ц4, Ц5 (группа В) должны реализовываться после целей группы А. И, наконец, цель Ц6 относится к группе С, и может быть реализована в последнюю очередь.

Остановимся в данной работе более подробно на цели Ц3 «Повышение безопасности пассажирских сидений при опрокидывании».

Как видно из дерева целей на рис. 1, для достижения Ц3 выявлены две подцели третьего уровня:

- за счет дополнительных удерживающих систем пассажира на пассажирском сиденье (Ц31);
- за счет дополнительных систем, повышающих устойчивость пассажира на пассажирском сиденье (Ц32).

Для достижения подцели Ц31 при проведении патентного поиска был найден патент на изобретение «Защитный балдахин пассажирского кресла» [3].

Ниже представлен текст реферата в авторском изложении с нумерацией обозначений, приведенных на рис. 3: «Защитный балдахин пассажирского кресла содержит размещенный на кресле 9 раздвижной матерчатый экран. Экран размещен при помощи багетов 2 и 4 таким образом, что прямые багеты 2 жестко прикреплены к боковинам сиденья 1. К изголовью спинки 3 прикреплен подпружиненный сверху в месте крепления прямоугольный багет 4. Причем матерчатые створки 6 экрана соединены с багетами при помощи подвижных колец 5 таким образом, чтобы подлокотники 7 оставались внутри них. Каждая матерчатая створка неподвижно закреплена с краями спинки 8. Достигается повышение защищенности пассажира предупреждением выпадения его из кресла и предохранением от ушибов при резком торможении, заносе или опрокидывании транспортного средства, возможность уединения» [3, 4].

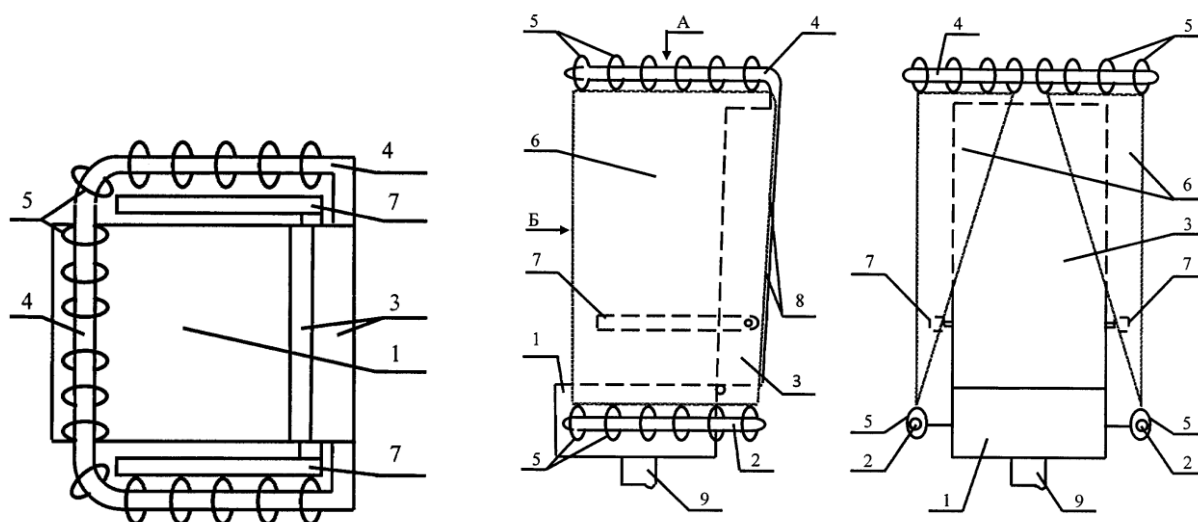


Рис. 3. Индивидуальное пассажирское кресло с защитным балдахином

Для достижения подцели Ц32 при проведении патентного поиска патентов найдено не было. Поэтому авторами предложено применить дополнительное устройство, которое в случае опрокидывания автобуса поворачивало бы пассажирское сиденье в поперечной плоскости автобуса в сторону, противоположную опрокидыванию [5, 6]. В результате достигается устойчивость пассажиров на пассажирском сиденье (рис. 4).

Заявка на полезную модель «Пассажирское сиденье с повышенной устойчивостью при опрокидывании транспортного средства» направлена в Роспатент.

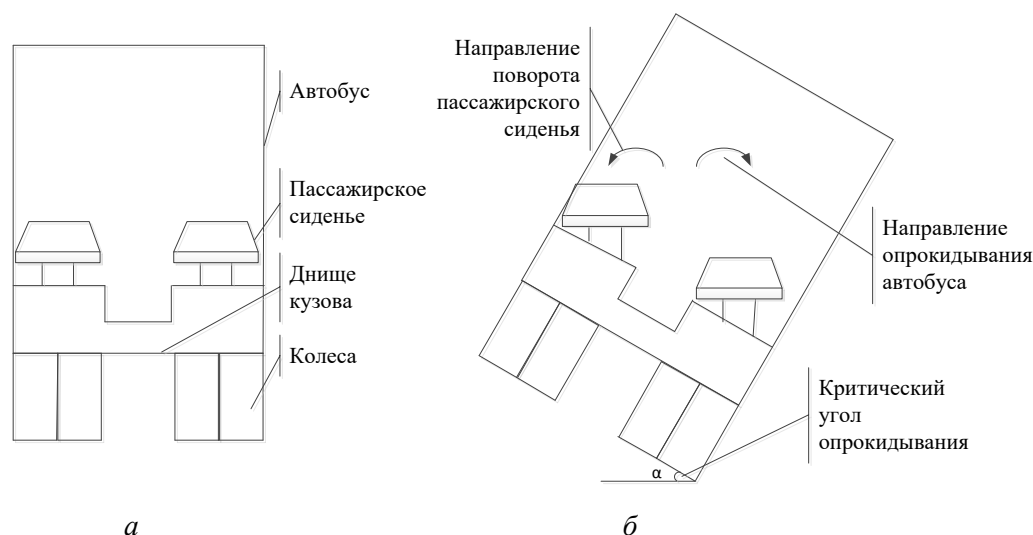


Рис. 4. Пассажирское сиденье, повышающее устойчивость пассажира:

а – автобус в исходном состоянии; *б* – автобус в процессе опрокидывания

Из рис. 4 видно, что при срабатывании устройства, поворачивающего пассажирское сиденье, пассажиры не падают с него, а следовательно, не сталкиваются с твердыми предметами интерьера пассажирского салона и с другими падающими пассажирами. Этим достигается и генеральная цель – повышение пассивной безопасности автобусов путем совершенствования конструкций пассажирских сидений.

Список литературы

- 1 **Каргин, Р. В.** Анализ нормативных документов в сфере безопасности пассажирских перевозок / Р. В. Каргин, П. В. Харламов, В. Г. Щитов // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2019) : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 305–309. – ISBN 978-5-88814-989-8.
- 2 **Фех, А. И.** Определение эргономических параметров пассажирского места при проектировании сидения для туристического автобуса / А. И. Фех, Л. А. Скачкова, А. Т. Николайчук // Современные проблемы машиностроения : сборник научных трудов XII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 28 октября – 1 ноября 2019 г. – Томск : Издательство ТПУ, 2019. – С. 351–356.
- 3 **Патент № 2610786 C1 Российская Федерация, МПК B60R 21/06, B60N 2/01, B64D 11/06.** Защитный балдахин пассажирского кресла : № 2016110363 : заявл. 21.03.2016 : опубл. 15.02.2017 / А. Г. Батт. – EDN SENXDA.
- 4 **Багичев, С. А.** Расчетно-экспериментальная оценка несущей способности пассажирского сиденья с ремнем безопасности / С. А. Багичев, Е. А. Наумов, Е. В. Кочанов // Грузовик. – 2015. – № 12. – С. 2–4. – ISSN 1684-1298.
- 5 **Харламов, П. В.** Разработка комплекса средств для продления периода эксплуатации колес легковых автомобилей / П. В. Харламов, С. Л. Горин // Грузовик. – 2012. – № 9. – С. 34–35. – ISSN 1684-1298.

References

- 1 **Kargin, R. V.** Analysis of regulatory documents in the field of passenger transportation safety / R. V. Kargin, P. V. Kharlamov, V. G. Shchitov / Transport : science, education, production (Transport-2019) : Collection of scientific papers – Rostov-on-Don, 2019. – P. 305–309. – ISBN 978-5-88814-989-8.
- 2 **Fekh, A. I.** Determination of ergonomic parameters of a passenger seat when designing a seat for a tourist bus / A. I. Fekh, L. A. Skachkova, A. T. Nikolaychuk // Modern problems of mechanical engineering: collection of scientific papers of the XII International scientific and technical conference, Tomsk, October 28 – November 1, 2019. – Tomsk : TPU Publishing House, 2019. – P. 351–356.
- 3 **Patent No. 2610786 C1 Russian Federation, IPC B60R 21/06, B60N 2/01, B64D 11/06.** Protective canopy for a passenger seat : No. 2016110363 : declared 21.03.2016 : published 15.02.2017 / A. G. Batt. – EDN SENXDA.
- 4 **Bagichev, S. A.** Calculation and experimental assessment of the load-bearing capacity of a passenger seat with a seat belt / S. A. Bagichev, E. A. Naumov, E. V. Kochanov // Truck. – 2015. – No. 12. – P. 2–4. – ISSN 1684-1298.
- 5 **Kharlamov, P. V.** Development of a set of means for extending the service life of passenger car wheels / P. V. Kharlamov, S. L. Gorin // Truck. – 2012. – No. 9. – P. 34–35. – ISSN 1684-1298.

6 **Зиновьев, В. Е.** Обзор современных диагностических комплексов наземных транспортных средств / В. Е. Зиновьев, П. В. Харламов // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 202–205.

6 **Zinoviev, V. E.** Review of modern diagnostic systems for ground vehicles / V. E. Zinoviev, P. V. Kharlamov // Transport : science, education, production : Collection of scientific papers of the International scientific and practical conference. – Rostov-on-Don, 2021. – P. 202–205.

B. Yu. Kalmykov, P. V. Kharlamov, O. M. Kalmykova

INCREASING THE PASSIVE SAFETY OF BUSES BY IMPROVING THE DESIGN OF PASSENGER SEATS

Abstract. The article is devoted to the issues of increasing the passive safety of motor vehicles using buses as an example by improving the design of passenger seats. The research was conducted using the methods of "Goal Tree", "Expert Assessments", "Pareto Diagram", "ABC Method". The methods of achieving the goal of "Increasing the Safety of Passenger Seats in the Event of a Rollover" are considered. Based on the analysis, it is proposed to use an additional device that, in the event of a bus rollover, would rotate the passenger seat in the transverse plane of the bus in the direction opposite to the rollover. This device, designed to rotate the passenger seat, allows passengers to maintain a stable position during a bus rollover.

Keywords: passive safety of buses, passenger seat, passenger stability, rollover.

For citation: Kalmykov, B. Yu. Increasing the passive safety of buses by improving the design of passenger seats / B. Yu. Kalmykov, P. V. Kharlamov, O. M. Kalmykova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 126–131. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_126.

Сведения об авторах

Калмыков Борис Юрьевич

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ФГБОУ «Донской государственный технический университет» в г. Шахты Ростовской области, кафедра «Автомобильный транспорт и технологическое оборудование», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, e-mail: doc_tea@sssu.ru

Харламов Павел Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Проектирование и технология производства машин», доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, e-mail: kcharlamov@yandex.ru

Калмыкова Ольга Михайловна

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ФГБОУ «Донской государственный технический университет» в г. Шахты Ростовской области, кафедра «Автомобильный транспорт и технологическое оборудование», кандидат философских наук, доцент, e-mail: doc_tea@sssu.ru

Information about the authors

Kalmykov Boris Yuryevich

Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of DGTU (the FSBEI of Higher Education "Don State Technical University") in Shakhty, Rostov Region, Chair "Automobile Transport and Technological Equipment", Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Chair, e-mail: doc_tea@sssu.ru

Kharlamov Pavel Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair "Design and Technology of Machine Production", Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: kcharlamov@yandex.ru

Kalmykova Olga Mikhailovna

Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of DGTU (the FSBEI of Higher Education "Don State Technical University") in Shakhty, Rostov Region, Chair "Automobile Transport and Technological Equipment", Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor, e-mail: doc_tea@sssu.ru

Г. М. Менакер, О. Е. Пудовиков

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИМ ТОРМОЗОМ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА *

Аннотация. Предложена функциональная схема системы автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда с возможностью идентификации реальных тормозных параметров поезда и сопротивления движению, которая наряду с остальными средствами автоматического управления поездом обеспечивает безопасность перевозок на железнодорожном транспорте. В качестве алгоритма идентификации тормозных параметров поезда, а также сопротивления движению использован расширенный фильтр Калмана – ЕKF. Приведены результаты моделирования с использованием алгоритма ЕKF и без него. Показано преимущество использования предлагаемой системы в части обеспечения высокого качества управления посредством увеличения промежутков между торможениями на «вредном» спуске, что способствует повышению участковой скорости движения, а также достаточно точной реализации алгоритма прицельного торможения.

Ключевые слова: автоматическое управление, пневматический тормоз, продольные математическое моделирование, идентификация параметров.

Для цитирования: Менакер, Г. М. Адаптивная система автоматического управления пневматическим тормозом грузового поезда / Г. М. Менакер, О. Е. Пудовиков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 132–144. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_132.

Во многих странах мира железнодорожные дороги занимают ключевую позицию в транспортной системе. В Российской Федерации более половины всех перевозок в стране приходится на долю железнодорожного транспорта. Вместе с этим, из-за увеличения объема перевозок на железных дорогах некоторые линии достигли предела пропускной и провозной способности.

Пневматическая тормозная система является важнейшим средством обеспечения безопасности движения поездов, она применяется, самостоятельно или совместно с электродинамическим тормозом локомотива, при выполнении регулировочных и остановочных торможений, а также для поддержания скорости при движении по «вредным» спускам.

Необходимо отметить, что на последовательность смены технологических операций по управлению тормозной системой накладываются строгие порядковые и временные ограничения [1], усложняющие управление ею и оказывающие влияние на ряд показателей, характеризующих эффективность перевозочного процесса. Нарушение данной последовательности создает предпосылки к возникновению ситуаций, создающих угрозу безопасности движению поездов ввиду снижения эффективности тормоза из-за истощения.

Повышению экономической эффективности железнодорожного транспорта и безопасности движения поездов способствует повсеместное внедрение средств автоматизации технологических процессов и интеллектуальных систем управления. Примером могут служить многоконтурные системы автоматического ведения поездов (САВП), которые в настоящее время нашли широкое применение. Внешним контуром таких систем является контур регулирования времени хода, формирующий траекторию движения поезда, рациональную с точки зрения расхода топливно-энергетических ресурсов при условии соблюдения заданного времени хода поезда, а внутренними контурами – система автоматического управления скоростью движения, формирующая задание для системы автоматизированного тягового электропривода, и система автоматического управления тормозной системой [2, 3], исполняющие заданные контуром регулирования времени хода режимы и скорости движения поезда.

Вопросами автоматизации управления торможением занимались Л. А. Баранов [2], В. И. Головин [11], Л. М. Жебрак [14], Ю. Г. Кутыев [11], Е. В. Комков [12], М. Ю. Капустин [13], Б. Д. Никифоров [11], О. Е. Пудовиков [3–5], А. Н. Савоськин [2, 15] и другие отечественные и зарубежные ученые.

* Работа выполнена за счёт бюджетного финансирования в рамках государственного задания от 20.03.2025 № 103-00001-25-02.

Ранее авторами настоящей работы была предложена система автоматизации управления пневматическим тормозом, позволяющая выполнять поддержание заданной скорости на спусках, а также прицельное торможение в заданные координаты [4, 5]. В этой системе для выбора точки смены режима работы пневматического тормоза использованы расчетные значения параметров тормозной системы (расчетные тормозной коэффициент и нажатие). Данная система не позволяет обеспечить достаточную точность управления при объективно существующем отклонении фактических параметров тормозной системы, а также параметров сопротивления движению вагонов поезда от расчетных значений и их изменение в процессе эксплуатации, хотя эти факторы оказывают существенное влияние на качество управления в части точности поддержания скорости и выбора точки начала торможения. Для повышения качества управления вышеописанная система, принятая в качестве прототипа, дополнена подсистемами идентификации параметров пневматического тормоза и адаптации параметров системы автоматического управления к фактическим параметрам тормозной системы. Функциональная схема системы автоматического управления приведена на рис. 1.

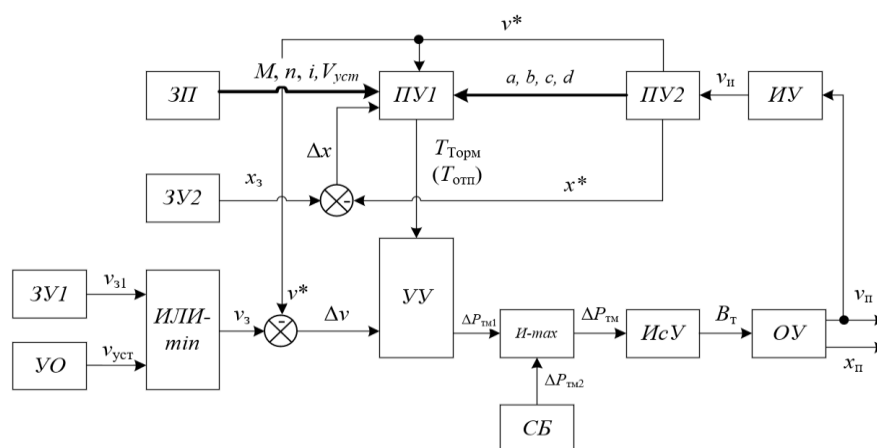


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления пневматическим тормозом

Задающее устройство **3У1** вводит в систему сигнал заданной скорости движения v_{31} , поступающий с вышестоящего контура регулирования времени хода САВП, данная величина не может превышать максимально допустимую установленную скорость на перегоне $v_{уст}$, которую задает устройство ограничения (**УО**) системы обеспечения безопасности движения. Устройство **ИЛИ-min** пропускает на свой выход минимальное значение из двух входящих, что позволяет предотвратить превышение максимально допустимого по условиям безопасности движения значения скорости. С выхода устройства **ИЛИ-min** сигнал поступает на устройство сравнения, в котором вычисляется рассогласование между величинами заданной скорости движения v_3 и измеренной v^* . Последняя, в свою очередь, поступает с выхода измерительного устройства (**ИУ**), которое представляет собой импульсный датчик скорости. Для предварительной фильтрации шума датчика используется фильтр скользящего среднего, который является частью промежуточного устройства **ПУ2**. Рассогласование Δv поступает на вход устройства управления (**УУ**), выходной сигнал которого представляет собой заданное значение величины изменения давления в тормозной магистрали поезда $\Delta P_{тм1}$. В промежуточном устройстве **ПУ1** производится выбор момента времени начала торможения или отпуска, необходимые для соблюдения ограничений скорости. Для этого в устройстве **ПУ1** осуществляется упреждающий тормозной расчет с использованием «точечной» модели поезда, при выполнении которого учитываются силы сопротивления движению, вычисленные на основании данных, поступающих с электронной карты, и расчетные значения сил торможения [3]. Устройство **И-тах** выбирает наибольшее значение из величин $\Delta P_{тм1}$ и $\Delta P_{тм2}$, поступивших на его входы от устройства управления (**УУ**) и локомотивных устройств систем безопасности (**СБ**) КЛУБ, БЛОК-М соответственно [6]. Исполнительным устройством является пневматическая тормозная система поезда, в модели которой учтены конечная скорость распространения тормозной волны по поезду, время наполнения и опорожнения тормозных цилиндров (ТЦ), задержка срабатывания воздухораспределителей по длине состава по мере удаления от локомотива [6], в качестве модели объекта управления использована многомассовая модель поезда [7].

Для устранения указанных ранее недостатков системы, связанных с недостаточной точностью реализации прицельного торможения из-за отклонения расчетных значений параметров тормозной системы и поезда от их фактических значений, в системе предусмотрена возможность идентификации ряда параметров поезда, а именно величины сопротивления движению поезда и коэффициента трения колодки о колесо, для чего в системе применен алгоритм расширенного фильтра Калмана – ЕKF, позволяющий выполнить оценку фактических параметров тормозной системы [8]. Для фильтрации сигнала скорости, а также адаптации системы автоматического управления пневматическим тормозом (САУ ПТ) к изменяющимся реальным параметрам поезда и пневматического тормоза в системе предусмотрены дополнительные элементы – промежуточное устройство ПУ2, которое выполняет также функцию идентификации параметров тормозной системы, и промежуточное устройство ПУ1, предназначенное для определения точки начала прицельного регулировочного или остановочного торможения поезда.

В промежуточном устройстве ПУ1 выполняется упреждающий тяговый расчет, алгоритмы работы которого и решаемые задачи различаются в зависимости от режима движения поезда.

При прицельном регулировочном торможении осуществляется:

- определение момента начала разрядки тормозной магистрали для предотвращения превышения установленного ограничения скорости, перед которым и выполняется регулировочное торможение;
- определение момента начала отпуска тормозов, который гарантирует соблюдение установленного ограничения скорости (не выше установленного предела), в том числе при многократном торможении при движении по затяжному спуску.

При прицельном остановочном торможении выполняется:

- определение момента начала разрядки тормозной магистрали при выполнении остановочного торможения;
- предотвращение отпуска тормозов в выбранном ранее режиме регулировочного торможения, если это приведет к проезду заданной точки остановки.

Укрупненная схема алгоритма выбора метода выполнения упреждающего расчета для регулировочного или остановочного торможения показана на рис. 2. Для своей работы указанный алгоритм использует данные о текущей скорости v^* и координате поезда $x_{\text{ф}}$, а также значение заданной скорости v_3 и целевой точки остановки x_3 .

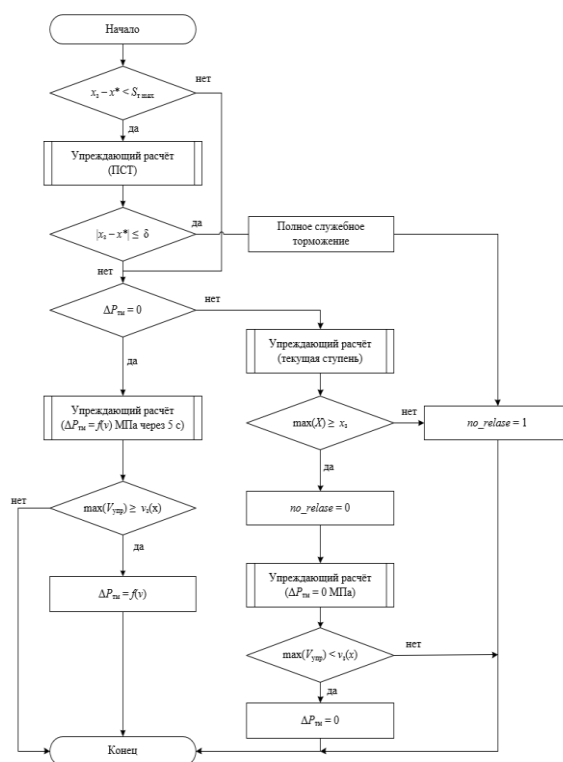


Рис. 2. Алгоритм работы регулировочного и остановочного торможения

Упреждающий расчет для остановочного торможения

В начальный момент времени в системе определяется расстояние до заданной точки остановки поезда: если полученная величина меньше или равна максимально допустимому тормозному пути поезда, выполняется расчет для выбора точки начала торможения со ступенью разрядки тормозной магистрали (ТМ) на 0,1 МПа. Данная ступень выбрана с целью обеспечения плавности торможения и снижения величин продольных сил, возникающих из-за продольных колебаний, при этом проверяется точность определения координаты полученной точки остановки по критерию допустимого отклонения от заданного значения. При выполнении данного условия выполняется разрядка тормозной магистрали в выбранной точке на величину 0,1 МПа, вследствие чего начинается наполнение тормозных цилиндров, тормозная сила растет и скорость снижается до 0 км/ч к заданной координате.

Если в текущий момент времени САУ ПТ находится в режиме регулировочного торможения, то производится упреждающий расчет с учетом текущей ступени разрядки тормозной магистрали; в случае если по результатам упреждающего расчета вычисленная координата точки остановки находится на большем удалении от поезда, чем заданная, поезд продолжает движение в режиме торможения с примененной ранее ступенью до момента начала остановочного торможения.

Упреждающий расчет для регулировочного торможения

Регулировочное торможение выполняется с целью снижения скорости перед местом постоянного или временного ограничения скорости.

В промежуточном устройстве ПУ1 производится упреждающий тормозной расчет для модели поезда с применением вычисленной ступени торможения в соответствии с дифференциальным законом управления, дополненным составляющей, пропорциональной фактическому значению скорости и постоянной составляющей

$$\Delta P_{\text{TM}} = 0,05 + K_1 \frac{d(\Delta v)}{dt} + K_2 v, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент при дифференциальной части закона управления;

K_2 – коэффициент пропорциональности при составляющей фактической скорости движения;

0,05 – постоянная составляющая, соответствующая минимальной ступени торможения.

Составляющая, пропорциональная фактическому значению скорости, введена в закон управления с целью компенсации уменьшения коэффициента трения колодок о колесо при увеличении скорости.

Если полученная при выполнении упреждающего расчета расчетная кривая снижения скорости превышает величину ограничения, перед которым производится торможение, происходит немедленная выработка сигнала торможения, который поступает на вход УУ.

Величина разрядки тормозной магистрали для реального поезда, необходимая для достижения заданной скорости движения, вычисляется в устройстве управления (УУ) в соответствии с законом управления (1), и происходит немедленная разрядка ТМ на вычисленную величину ΔP_{TM} .

Если полученная в результате упреждающего расчета расчетная скорость не превышает установленную на заданном перегоне, поезд продолжает следовать на выезде.

При следовании поезда в режиме торможения система производит расчет с целью определения момента начала отпуска тормозов. Отпуск тормозов выполняется при соблюдении следующих условий:

- минимальное время нахождения на ступени превышает 30 с [1];
- при отпуске тормозов через минимальное время для зарядки ТМ 60 с не будет превышена установленная скорость на заданном перегоне [1];
- отсутствует риск поезда заданной точки остановки.

Необходимость применения остановочного торможения может приводить к конфликтным ситуациям, вызванным нарушением временных ограничений на чередование и длительность операций по управлению тормозными приборами [1]. Например, в процессе регулировочного торможения был сформирован сигнал на отпуск, а через некоторое время наступает необходимость применения остановочного торможения, которое не сможет быть выполнено потому, что не прошел минимальный промежуток времени между торможениями, вследствие чего возможен проезд заданной точки остановки. Для предотвращения подобных ситуаций в системе формируется сигнал «no_release=1», если в результате выполнения упреждающего расчета для остановочного торможения будет обнаружена описанная выше ситуация.

Как было отмечено ранее, при решении тормозной задачи по определению координаты точки

начала торможения для повышения качества управления необходимо учитывать фактическое состояние тормозной системы поезда. Известно, что на эффективность тормоза, а значит, и на длину тормозного пути оказывает влияние величина коэффициента трения между колодками и колесом, механические потери в тормозной системе, состояние пневматической части тормозных приборов и множество других факторов [9], индивидуальных для каждого вагона поезда и изменяющихся в процессе движения поезда. В тяговых расчетах использован усредненный параметр, характеризующий эффективность тормозной системы, а именно расчетный тормозной коэффициент [10], определяемый по формуле:

$$\vartheta_p = \frac{\sum K_p}{Q + P_y}, \quad (2)$$

где $\sum K_p$ – сумма расчетных сил нажатия на тормозные оси поезда, тс;

Q – вес состава;

P_y – вес локомотива.

Неточность в определении расчетного тормозного коэффициента по сравнению с его фактическим значением приведет к значительному отклонению фактического тормозного пути от расчетного значения, а значит, создаст предпосылки к нарушению безопасности движения поездов. Для повышения качества управления в системе предусмотрена процедура идентификации параметров тормозной системы, а также сопротивления движению поезда, для чего использован расширенный фильтр Калмана [8]. Разработанная процедура идентификации является многоступенчатой, предполагающей многократную поэтапную корректировку идентифицированных параметров поезда по результатам последовательно выполняемых торможений.

На первом этапе расчет выполняется для некоторых средних параметров системы, принятых при проектировании. Известно, что расчетный коэффициент трения колодки о колесо определяется по формуле [10]:

$$\varphi_{кр} = a \frac{v + b}{cv + d}, \quad (3)$$

где a, b, c, d – коэффициенты, определяемые опытным путем для каждого типа тормозных колодок.

Указанные коэффициенты являются средними значениями многих опытов. Для конкретного состава они могут заметно отличаться и изменяться даже в течение одной поездки. Очевидно, что знание действительных значений этих коэффициентов повысит качество управления. Для увеличения точности расчета в состав системы введено устройство для идентификации параметров тормозной системы ПУ2. Для их оценки в ПУ2 используется алгоритм ЕKF (расширенный фильтр Калмана) [8].

Рассмотрим работу блока ПУ2. Представим поезд в режиме торможения как систему, эволюционирующую по следующему закону:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), t) + w(t), \\ z(t) = h(x(t), t) + v(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $x(t)$ – вектор состояния системы;

$f(x(t), t)$ – вектор-функция эволюции системы;

$w(t)$ – случайное отклонение модели от действительности с ковариационной матрицей $G(t)$;

$h(t)$ – вектор-функция измерений;

$z(t)$ – выходной измеряемый параметр системы (скорость поезда);

$v(t)$ – случайный шум измерений с ковариационной матрицей $R(t)$.

Вектор состояния системы задан следующим образом:

$$x(t) = \begin{pmatrix} v \\ a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Как видно, первый элемент вектора содержит величину скорости поезда, а оставшиеся представляют собой четыре коэффициента из формулы расчетного коэффициента трения (2) тормозных колодок о колесо.

Уравнение движения поезда как материальной точки в режиме торможения имеет следующий вид:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{(W + B_{\tau})}{M(1 + \gamma)}, \quad (6)$$

где B_{τ} – тормозная сила поезда, определяемая как

$$B_{\tau} = 1000 \varphi_{\text{кр}} K(p_{\text{тн}}), \quad (7)$$

где $K(p_{\text{тн}})$ – суммарная сила нажатия колодок на колеса.

Исходя из этого функцию эволюции системы запишем следующим образом:

$$f(x(t)) = \begin{pmatrix} v - \frac{(W_{\text{п}} + B_{\tau})}{M(1 + \gamma)} \\ a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где M – масса поезда,

$W_{\text{п}}$ – сопротивление движению поезда,

В данном случае измеряемой величиной является скорость. Поэтому вектор-функция измерений постоянна и представлена матрицей-строкой:

$$h(t) = H = (10 \ 000). \quad (9)$$

Первым этапом работы фильтра Калмана является прогноз состояния системы:

$$\hat{x}(t) = f(x(t - dt)), \quad (10)$$

где dt – шаг интегрирования. Затем вычисляется ковариационная матрица фильтра:

$$\hat{P}(t) = JPJ^T, \quad (11)$$

где J – якобиан вектор-функции $f(x(t))$. После этого полученный прогноз корректируется с учетом прошедшего от датчиков сигнала скорости $z(t)$. Для коррекции прогноза вычисляется матрица коэффициентов фильтра:

$$K(t) = \hat{P}(t)H^T (H\hat{P}(t)H^T + R)^{-1}. \quad (12)$$

Полученный прогноз корректируется:

$$x(t) = \hat{x}(t) + K(t) \left(z(t) - H\hat{x}(t) \right), \quad (13)$$

и обновляется ковариационная матрица:

$$P(t) = (I - KH^T) \hat{P}(t). \quad (14)$$

Настраиваемыми параметрами фильтра являются матрицы Q и R . За R в данной работе принята дисперсия шума датчика скорости $0,01 \text{ (км/ч)}^2$. Матрица Q подбирается исходя из отклонений реальных параметров от расчетных.

Для иллюстрации работы фильтра был смоделирован режим торможения поезда, состоящего из 70 полувагонов, с начальной скоростью движения 70 км/ч . На рис. 3 приведены результаты расчетов, иллюстрирующих работу устройства ПУ2, а именно определение коэффициентов формулы расчетного коэффициента трения (3) (рис. 3, а–г), величины давления в тормозном цилиндре первого вагона (рис. 3, д) и тормозной силы поезда (рис. 3, е). Фильтр включается в работу после достижения в ТЦ давления

0,05 МПа. В данном исследовании начальные значения коэффициенты уравнения были приняты следующими: $a = 0,46$, $b = 145$, $c = 1,5$, $d = 155$. При этом истинные значения коэффициентов приняты равными приведенным в правилах тяговых расчетов (ПТР) [10]: $a = 0,36$, $b = 150$, $c = 2$, $d = 150$ [10].

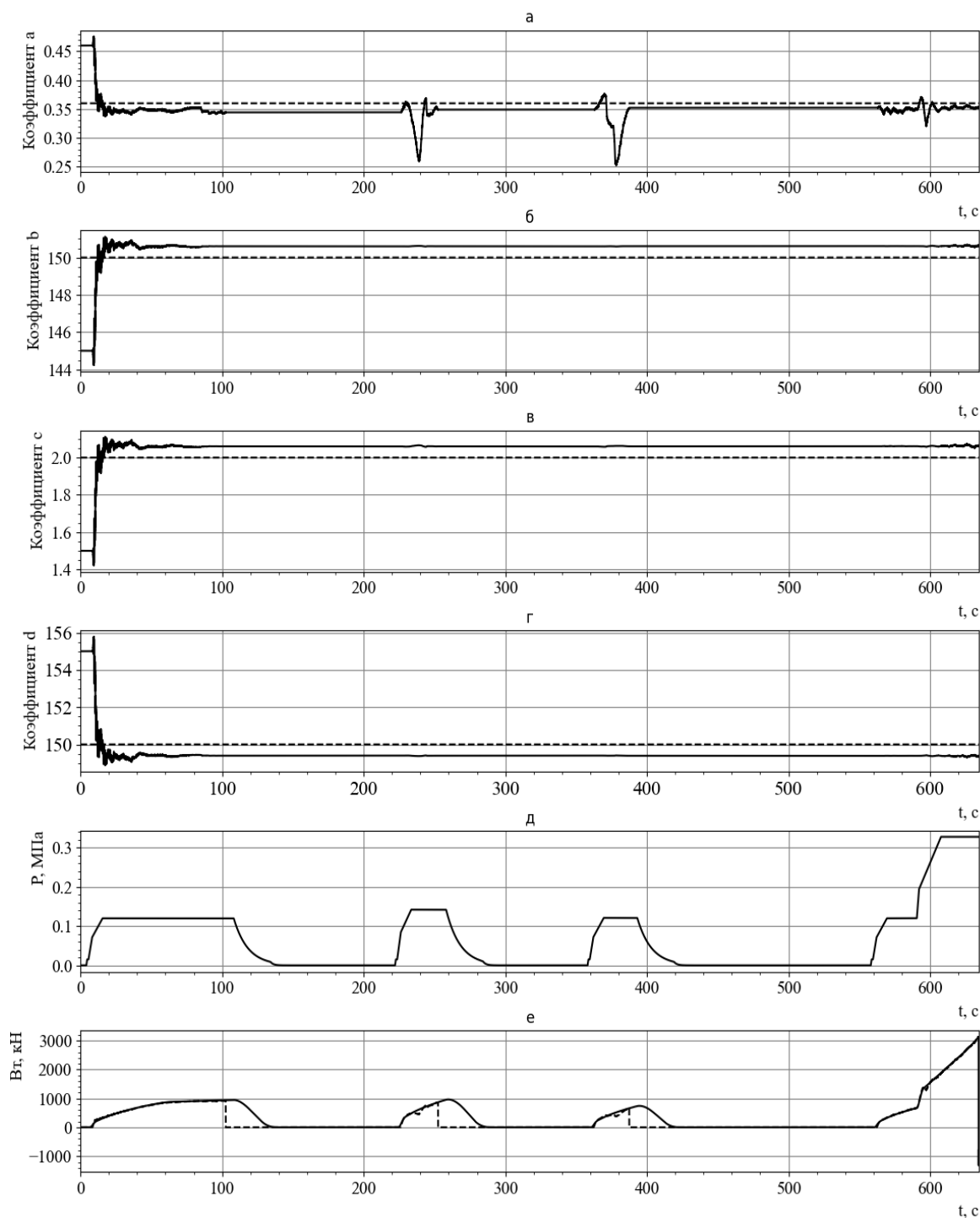


Рис. 3. Результаты работы фильтра Калмана в процессе торможения поезда

Как видно из приведенных на рис. 3 графиков, в результате работы фильтра оценочные значения коэффициентов (сплошные линии) приближаются к их реальным значениям (пунктирные линии). В оценке присутствуют незначительные отклонения (в пределах 5 %), обусловленные влиянием продольных колебаний в поезде и связанными с этим изменениями скорости движения поезда и рядом других факторов.

Было выполнено исследование работы системы автоматического управления с использованием разработанной ее имитационной модели. Для этого было рассмотрено движение поезда общей массой 6780 тонн и состоящего из 70 вагонов, оборудованных воздухораспределителями, работающими в

«груженом» режиме, авторежимами и композиционными тормозными колодками [6]. Моделировалась работа САУ в режиме прицельного торможения, обеспечивающего снижение скорости перед ограничением скорости с последующей стабилизацией, а также остановочное торможение в фиксированной точке пути. В начальный момент времени поезд движется по площадке со скоростью 70 км/ч, с последующим переходом на спуск со средней величиной уклона $-4,2\%$ и далее снова на площадку. Координата 7700 м соответствует заданной точке остановки.

Продольный профиль пути, совмещенный со значениями ограничения скорости, приведен на рис. 4 (кривая 1 и 2 соответственно).

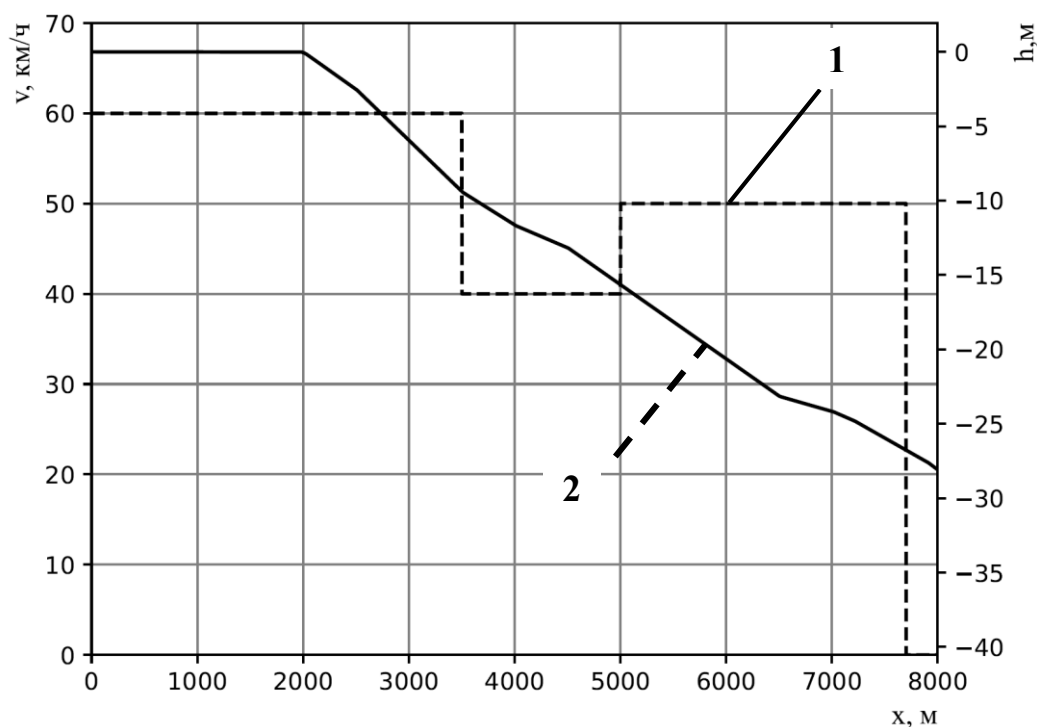


Рис. 4. Высота профиля и ограничение скорости

Оценим влияние применения алгоритма идентификации параметров поезда на качество управления. Для этого выполним две серии расчетов: без использования фильтра и с фильтром. Результаты расчета скорости движения v , давления в тормозном цилиндре РТЦ с алгоритмом ЕКФ приведены на рис. 5, на рис. 6 приведены аналогичные кривые, рассчитанные без использования алгоритма ЕКФ.

Рассмотрим подробнее результаты моделирования с использованием фильтра ЕКФ. В начальный момент времени поезд движется со скоростью 70 км/ч. После того как на вход системы управления тормозом поступает сигнал о снижении скорости до 60 км, начинается разрядка тормозной магистрали на величину равную 0,05 МПа (рис. 5, б). После этого давление в тормозных цилиндрах локомотива начинает расти и через 20 секунд достигает величины 0,12 МПа. Вследствие этого тормозная сила поезда возрастает, что сопровождается соответствующим снижением скорости. Одновременно в блоке промежуточного устройства ПУ1 выполняется выбор точки отпуска тормоза по критерию не превышения фактическим значением скорости величины ограничения при движении в процессе отпуска тормоза, выбега и начала последующего торможения. Выбор координаты данной точки осуществляется в блоке ПУ1 путем выполнения упреждающего тягового расчета с периодичностью 2,5 с. Как было отмечено, результатом данного расчета является кривая скорости поезда $v(x)$, рассчитанная для режима отпуска тормозов с последующим движением в течение 60 секунд. Для первого торможения (регулируемого) величины тормозных коэффициентов принимаются равными усредненным значениям, приведенным в ПТР [10]. Одновременно с этим в процессе торможения в блоке ПУ2 происходит процедура идентификации для определения истинных значений тормозных коэффициентов поезда.

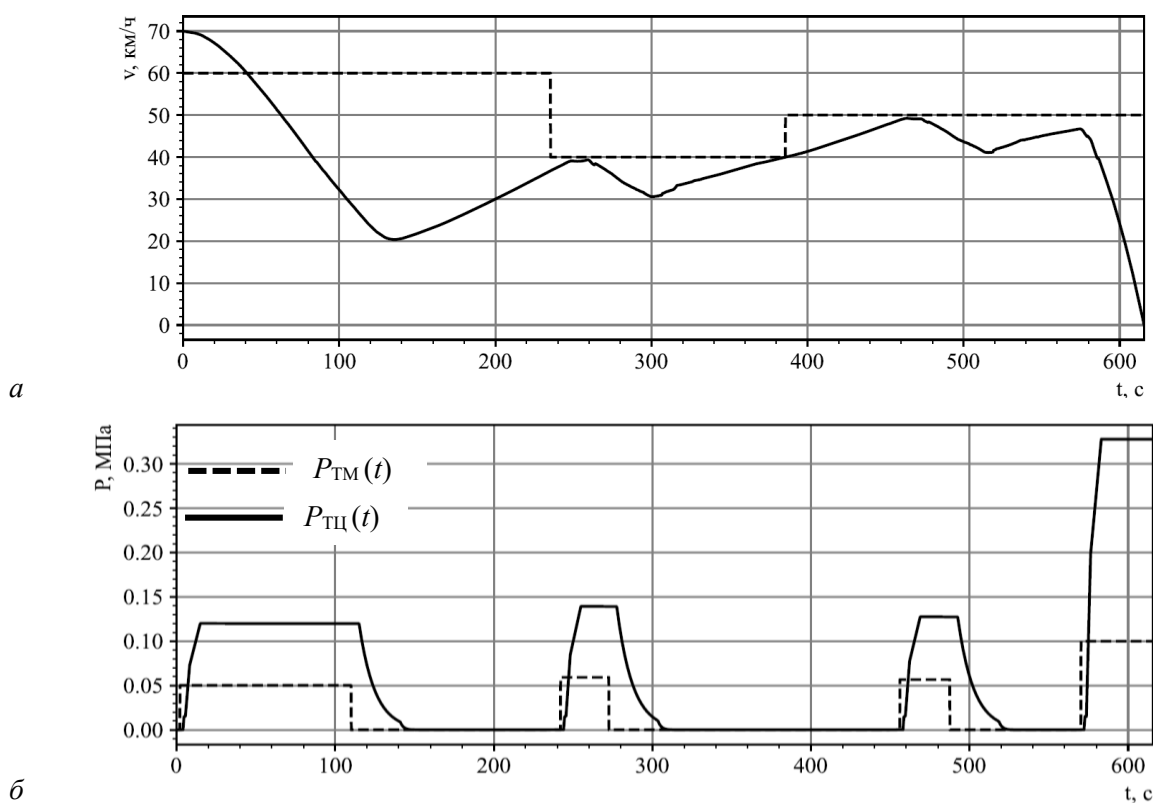


Рис. 5. Результаты расчета скорости движения v , давления в тормозном цилиндре $P_{ТЦ}$ с алгоритмом ЕКФ:

a – скорость движения первого экипажа $v(t)$; *б* – давление: $P_{ТЦ}(t)$ – в тормозном цилиндре первого экипажа; $P_{ТМ}(t)$ – в тормозной магистрали

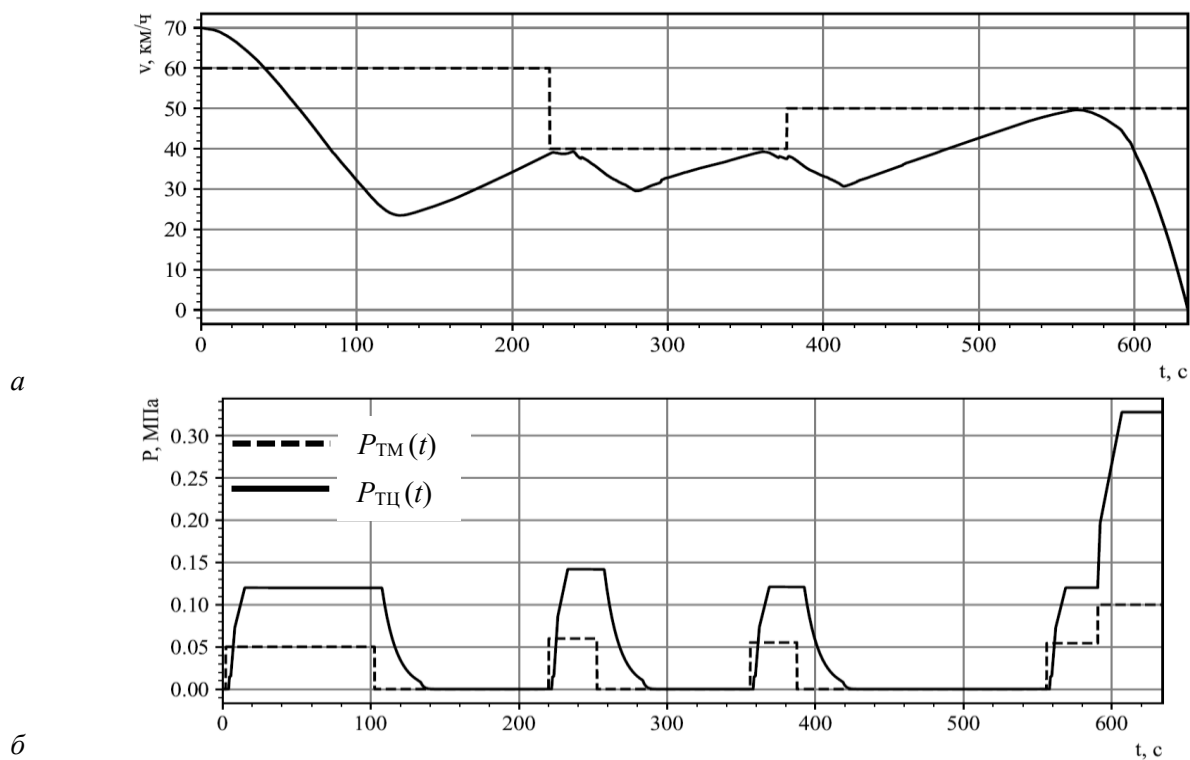


Рис. 6. Результаты расчета скорости движения v , давления в тормозном цилиндре $P_{ТЦ}$ без использования алгоритма ЕКФ:

a – скорость движения первого экипажа $v(t)$; *б* – давление: $P_{ТЦ}(t)$ – в тормозном цилиндре первого экипажа; $P_{ТМ}(t)$ – в тормозной магистрали

После начала торможения при движении по спуску пневматический тормоз находится в режиме перекрыши в течение 100 с, что значительно превышает минимально допустимое значение, равное 30 с [1]. В момент времени 110 с, который определен по результатам упреждающего расчета, формируется команда на отпуск тормозов, в результате чего давление в тормозной магистрали увеличивается до зарядного, после чего через 10 с давление в тормозных цилиндрах начинает снижаться, тормозная сила уменьшается, что сопровождается ростом скорости. Полный отпуск тормозов локомотива завершается через 25 с. Далее состав движется на выбеге в течение 100 с. В момент времени 230 с, когда локомотив находится в точке пути с координатой 3500 м, величина ограничения скорости уменьшается с 60 км/ч до 40 км/ч. Далее, в соответствии с результатами упреждающего расчета, вновь применяется ступень торможения с параметрами, аналогичными рассмотренными ранее, и процесс повторяется. При этом все расчеты по выбору точки начала торможения, движения в режиме торможения и отпуска выполняются с использованием найденных в результате решения задачи идентификации во время предыдущего торможения величин тормозных коэффициентов.

Далее программой исследования предусмотрено остановочное торможение в координате 7700 м. Для осуществления прицельного остановочного торможения осуществляется выбор точки начала торможения, в результате в момент времени 585 с САУ формирует команду на полное служебное торможение, и поезд останавливается в точке с координатой 7678 м за 22 м до целевой координаты. Отметим, что система САУТ-ЦМ/485 имеет точность остановки $[-100; +10]$ м.

Также было выполнено исследование движения поезда при отключенной процедуре идентификации. В целом процессы, происходящие в системе автоматического управления в данном случае, аналогичны рассмотренным ранее. Однако из-за несоответствия расчетных параметров поезда действительным, используемым при выработке управляющих воздействий, ухудшилось качество управления – сократились промежутки времени между последовательным применением тормозов, также для остановочного торможения была применена дополнительная ступень торможения, что привело к снижению технической скорости движения с 44,71 до 43,92 км/ч.

Кроме этого, произошел проезд расчетной точки остановки поезда на 69 м, что является грубым нарушением безопасности движения, так как в реальных условиях эксплуатации может выразиться в проезде на запрещающий сигнал светофора.

Также было выполнено исследование работы алгоритма блокировки отпуска регулировочного торможения при приближении к заданной точке остановки. На рис. 7 приведены результаты расчета, иллюстрирующие работу этого алгоритма.

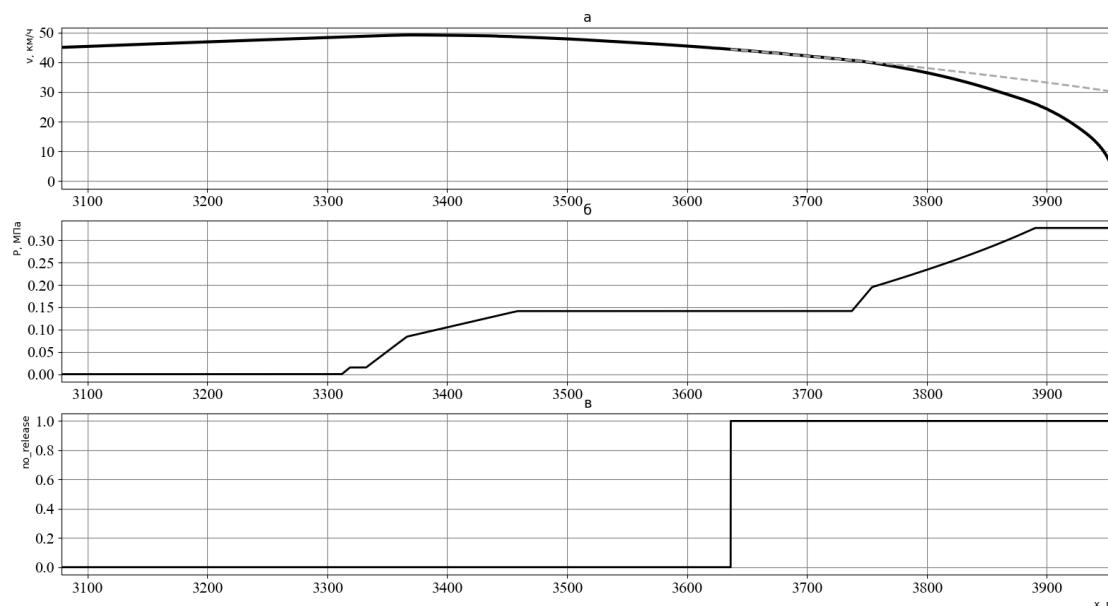


Рис. 7. Формирование сигнала запрета отпуска при регулировочном торможении

В начальный момент времени поезд движется на выбеге по спуску со скоростью 45 км/ч, величина ограничения скорости составляет 50 км/ч. При приближении величины фактической скорости к ограничению в момент времени $t = 18$ с выполняется торможение с разрядкой тормозной магистрали на величину $\Delta P_{\text{тм}}$ в соответствии с (1), в результате чего к моменту времени $t = 28$ с в тормозных цилиндрах ТЦ устанавливается давление 0,15 МПа. На участке пути с координатой 3630 м отпуск тормоза

блокируется по критерию минимального времени нахождения в режиме торможения, а по истечении этого времени – по критерию непревышения скорости во время движения на выбеге в течение минимального допустимого времени до следующего торможения. За 600 м до заданной точки прицельного остановочного торможения в соответствии с описанным ранее алгоритмом начинается выполнение расчета по выбору координаты точки начала торможения. В результате при нахождении поезда в точке с координатой 3750 м применяется ступень торможения $\Delta P_{\text{ТМ}}$ и значение величины разрядки ТМ достигает 0,1 МПа, при этом давление в ТЦ достигает величины 0,35 МПа. Остановка поезда происходит в точке с координатой 3955 м.

Вывод

Таким образом, предложенная система управления пневматическим тормозом с предлагаемой структурой, реализующей процедуру идентификации реальных параметров поезда, обеспечивает высокое качество управления поездом при регулировочном торможении и достаточную точность при остановочном, вместе с тем более энергоэффективно используя ресурсы поезда, при соблюдении всех требований, установленных нормативными документами.

Тем не менее целесообразно провести моделирование движения составов разной длины и массы и исследовать работу предложенной системы при отказах измерительных устройств (датчиков). Для повышения безопасности движения имеет смысл оценить риски при ложной идентификации параметров ЕКФ и предусмотреть алгоритмы компенсации неверной оценки параметров. Также стоит оценить экономические затраты на внедрение предложенного алгоритма в существующие САУТ и провести анализ совместимости с системами типа БЛОК-М.

Список литературы

- 1 Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утверждены Приказом Минтранса России № 151 от 03.06.2014. – Москва, 2015. – 162 с.
- 2 Автоматизированные системы управления электроподвижным составом: учебник для студентов, обучающихся по специальности 190300. 65 «Подвижной состав железных дорог» ВПО : в 3 ч. / под редакцией Л. А. Баранова, А. Н. Савоськина. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на ж.д. транспорте, 2013. – Ч. 1 : Теория автоматического управления / Л. А. Баранов [и др.]. – 398 с. – ISBN 978-5-89035-616-1.
- 3 Пудовиков, О. Е. Совершенствование системы автоматического управления пневматическим тормозом грузового длинносоставного поезда / О. Е. Пудовиков, С. А. Муров // Транспорт : наука, техника, управление. – 2014. – № 4 – С. 21–26. – ISSN 0236-1914.
- 4 Пудовиков, О. Е. Система управления пневматическим тормозом грузового поезда / О. Е. Пудовиков, Г. М. Менакер // Электротехника. – 2023. – № 9. – С. 34–39. – ISSN 0013-5860.
- 5 Пудовиков, О. Е. Автоматическое управление пневматическим тормозом грузового поезда / О. Е. Пудовиков, Г. М. Менакер // Интеллектуальные транспортные системы : материалы II Международной научно-практической конференции. – Москва, 2023. –

References

- 1 Rules for the technical maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock : approved by the Order of the Ministry of Transport of Russia No. 151 dated 03.06.2014. – Moscow, 2015. – 162 p.
- 2 Automated control systems for electric rolling stock : a textbook for students studying in the specialty 190300. 65 “Rolling stock of railways” of higher professional education : in 3 parts / edited by L. A. Baranov, A. N. Savoskin. – Moscow : Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2013. – Part 1 : Theory of automatic control / L. A. Baranov [et al.]. – 398 p. – ISBN 978-5-89035-616-1.
- 3 Pudovikov, O. E. Improvement of the automatic control system of the pneumatic brake of a long freight train / O. E. Pudovikov, S. A. Murov // Transport : science, technology, management. – 2014. – No. 4. – P. 21–26. – ISSN 0236-1914.
- 4 Pudovikov, O. E. Control system of a pneumatic brake of a freight train / O. E. Pudovikov, G. M. Menaker // Electrical Engineering. – 2023. – No. 9. – P. 34–39. – ISSN 0013-5860.
- 5 Pudovikov, O. E. Automatic control of the pneumatic brake of a freight train / O. E. Pudovikov, G. M. Menaker // Intelligent Transport Systems : materials of the II International scientific and practical conference. – Moscow, 2023. – DOI 10.30932/9785002182794-2023-322-329.

DOI 10.30932/9785002182794-2023-322-329.

6 **Асадченко, В. Р.** Автоматические тормоза подвижного состава : учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / В. Р. Асадченко. – Москва : Маршрут, 2006. – 392 с. – ISBN 5-89035-275-X.

7 Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер [и др.] ; под редакцией Е. П. Блохина. – Москва : Транспорт, 1986. – 263 с.

8 **Браммер, К.** Фильтр Калмана – Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – Москва, 1982. – 200 с.

9 **ГОСТ 34434–2018.** Тормозные системы грузовых железнодорожных вагонов. Технические требования и правила расчета : межгосударственный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 ноября 2018 г. № 1036-ст. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 28 с.

10 Правила тяговых расчетов для поездной работы : утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 09.02.2018 № 182/р. – Москва : ОАО «Российские железные дороги», 2018. – 516 с.

11 **Головин, В. И.** Автоматизация управления торможением поездов / В. И. Головин, Б. Д. Никифоров, Ю. Г. Кутыев. – Москва : Транспорт, 1985. – 263 с.

12 **Комков, Е. В.** Учет загрузки поезда метрополитена при автоматическом прицельном торможении / Е. В. Комков // Вестник ВНИИЖТ. – 1984 – № 3. – С. 15–17.

13 **Капустин, М. Ю.** Модель адаптивной системы прицельного электропневматического торможения электропоезда / М. Ю. Капустин, С. И. Краснолобов, П. С. Саркисян // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 4. – С. 33–43. – ISSN 2074-9325.

14 **Патент № 2715915 Российская Федерация, МПК ВО60Т 8/172 (2006.01), В61Л 3/12 (2006.01).** Способ и система управления пневматическими тормозами железнодорожного подвижного состава / Л. М. Жебрак, М. В. Сафро. – № 2017143208 ; заявл. 11.12.2017 ; опубл. 04.03.2020, Бюл. № 7.

15 **Савоськин, А. Н.** Параметрическая оптимизация автоматического регулятора пневматического торможения грузового поезда / А. Н. Савоськин, П. Е. Коваль, В. В. Лосев // Фундаментальные проблемы динамики и прочности подвижного состава : юбилейный сборник научных трудов. Москва : МИИТ, 1997. – № 912. – С. 93–96.

6 **Asadchenko, V. R.** Automatic brakes of rolling stock : a textbook for higher education institutions of railway transport / V. R. Asadchenko. – Moscow : Marshrut, 2006. – 392 p. – ISBN 5-89035-275-X.

7 Calculations and testing of heavy trains / E. P. Blokhin, L. A. Manashkin, E. L. Stambler [et al.] ; edited by E. P. Blokhin. – Moscow : Transport, 1986. – 263 p.

8 **Brammer, K.** Kalman – Busey filter / K. Brammer, G. Siffling. – Moscow, 1982. – 200 p.

9 **GOST 34434–2018.** Brake systems of freight railway cars. Technical requirements and calculation rules : interstate standard : put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 27, 2018 No. 1036-art. – Moscow : Standartinform, 2018. – 28 p.

10 Rules for traction calculations for train operation. Approved by the Order of JSC Russian Railways dated 12.05.2016 No. 867r as amended by the Order of JSC Russian Railways dated 09.02.2018 No. 182/r. – Moscow : JSC Russian Railways, 2018. – 516 p.

11 **Golovin, V. I.** Automation of train braking control / V. I. Golovin, B. D. Nikiforov, Yu. G. Kutyev. – Moscow : Transport, 1985. – 263 p.

12 **Komkov, E. V.** Accounting for the loading of a metro train with automatic targeted braking / E. V. Komkov // The Russian Railway Science Journal. – 1984. – No. 3 – P. 15–17.

13 **Kapustin, M. Yu.** A model of the adaptive system of targeted electropneumatic braking of an electric train / M. Yu. Kapustin, S. I. Krasnolobov, P. S. Sargsyan // Science and Technology of Transport. – 2011. – No. 4. – P. 33–43. – ISSN 2074-9325.

14 **Patent No. 2715915 Russian Federation, IPC BO60T 8/172 (2006.01), B61L 3/12 (2006.01).** Method and system for controlling pneumatic brakes of railway rolling stock / L. M. Zhebrak, M. V. Safro. – No. 2017143208 ; declared 11.12.2017 ; published 04.03.2020, Bull. No. 7.

15 **Savoskin, A. N.** Parametric optimization of automatic regulator of pneumatic braking of a freight train / A. N. Savoskin, P. E. Koval, V. V. Losev // Fundamental problems of dynamics and strength of rolling stock : jubilee collection of scientific papers. – Moscow : MIIT, 1997. – No. 912. – P. 93–96.

G. M. Menaker, O. E. Pudovikov

ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE PNEUMATIC BRAKE OF A FREIGHT TRAIN

Abstract. A functional scheme of the automatic control system for the pneumatic brake of a freight train with the possibility of identifying the actual braking parameters of the train and the resistance to movement is proposed, which along with other means of automatic train control ensures the safety of transportation on railway transport. The extended Kalman–EKF filter was used as an algorithm for identifying the braking parameters of the train, as well as the resistance to movement. The results of modeling with the use of algorithm EKF and without it are presented. The advantage of using the proposed system in terms of ensuring high-quality control by increasing the intervals between braking on a “harmful” descent is shown, which contributes to increase of section speed of movement, as well as sufficiently accurate implementation of the algorithm of target braking.

Keywords: automatic control, pneumatic brake, longitudinal mathematical modeling, parameter identification.

For citation: Menaker, G. M. Adaptive automatic control system for the pneumatic brake of a freight train / G. M. Menaker, O. E. Pudovikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 132–144. DOI 10.46973/0201–727X_2025_2_132.

Сведения об авторах

Менакер Григорий Максимович

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
аспирант,
e-mail: g.menaker@mail.ru

Пудовиков Олег Евгеньевич

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: olegep@mail.ru

Information about the authors

Menaker Grigory Maksimovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair “Electric Trains and Locomotives”,
Postgraduate Student,
e-mail: g.menaker@mail.ru

Pudovikov Oleg Evgenievich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair “Electric Trains and Locomotives”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of the Chair,
e-mail: olegep@mail.ru

Е. В. Сорокина

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА ДЛЯ ЕГИПЕТСКИХ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Аннотация. Рассмотрены проблемы деформации крыши кузовов пассажирских вагонов от воздействия избыточной солнечной радиации и влияния воздействия внешних факторов на прочность и устойчивость металлоконструкции кузова вагона. Приведены результаты натурного моделирования температурного воздействия на крышу кузова вагона модели 61-4514 с приложением ремонтных нагрузок, а также зависимости изменения микродеформаций (напряжений) крыши вагона в зависимости от значений температурного воздействия и сочетания испытательных ремонтных нагрузок. Проведен расчет критических напряжений для разных поперечных сечений гофров. Исследованы пять различных вариантов поперечных сечений, и выбран наиболее благоприятный с точки зрения устойчивости вариант. Приведены мероприятия для обеспечения устойчивости обшивки кузова.

Ключевые слова: металлоконструкция кузова, пассажирский вагон, механические нагрузки, тепловое воздействие, крыша вагона.

Для цитирования: Сорокина, Е. В. Совершенствование пассажирского вагона для Египетских национальных железных дорог на основе исследования влияния внешних факторов / Е. В. Сорокина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 145–153. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_145.

Введение

С целью отработки конструкции опытного образца кузова вагона для Египетских национальных железных дорог проведены исследования влияния воздействия внешних факторов на прочность и устойчивость металлоконструкции кузова вагона. К внешним факторам следует отнести температурное воздействие на кузов вагона, приложение к вагону нагрузок, возникающих при ремонтах вагона в депо, а также ветровой нагрузки. Таким образом, требуется решение следующих задач:

- определение зависимости искривления крыши вагона от температуры нагрева при натурном эксперименте;
- определение зависимости искривления крыши от взаимодействия температурных и механических нагрузений;
- расчётный учет воздействия ветровой нагрузки на вагон.

Для решения поставленных задач используются экспериментальные и расчетные методы исследования. Микро- и макродеформации несущей конструкции кузова определялись методом тензометрии. Температура нагрева кузова контролировалась термоэлектрическими преобразователями.

К особенностям климата Египта помимо очень жаркой погоды, от которой исходит ощутимая тепловая нагрузка на вагоны, относятся также и сильные ветровые потоки. Почти весь год ветер активно перемещается по всей стране и лишь изредка меняет свой вектор пути и силу. Такое влияние невозможно не учитывать при эксплуатации вагонов.

Вагон во время своей эксплуатации испытывает сильное давление от ветра. Геометрические параметры объекта напрямую влияют на значение нагрузки от воздушных потоков. Особенно сильно нагружены боковые стены и крыша кузова. Следовательно, уже на проектном этапе создания вагона необходимо рассчитывать силу ветрового давления для более рационального подбора металлоконструкции.

Вагон и в статическом и динамическом состоянии подвергается ветровой нагрузке, которая при расчете прикладывается к середине боковины [6, 9]. Также помимо нагрузки от ветрового давления поперек вагона направлена центробежная сила.

При движении поезд испытывает сильное сопротивление от ветрового давления, при встречном направлении – его скорость уменьшается, при боковом – образуется сдвиг кузова и усложняется перемещение из-за появившихся дополнительных сил трения колеса об рельс, а при том же направлении – скорость подвижного состава увеличивается.

Таким образом, ветер оказывает определенное влияние как на скорость движения вагонов, так

и на напряженно-деформированное состояние обшивки вагона. Из всех вариантов направления ветрового давления наиболее существенным является боковой, поскольку встречное и попутное направления могут заметно повлиять только на скорость подвижного состава, а нагрузка от ветра, действующая под углом $15\text{--}30^\circ$ к вектору движения поезда, сильно нагружает торцевые и боковые стены кузова. Поэтому вагон будет в меньшей степени зависим от воздействия ветра, если у него будет больше масса и меньше площадь соприкосновения с воздушным давлением.

Стоит отметить, что в Египте наблюдается большую часть времени сухой тропический климат с очень жаркой погодой, в которую температура воздуха может достигать больше 50°C , что существенно влияет на вагоны, попадающие под действие температурных нагрузок.

Основная часть

Благодаря опыту использования подвижных составов на железных дорогах Египта [2, 4, 8] было выявлено, что появление негативных изменений в крышах связано с перегревом от солнца.

С целью решения проблемы перегрева крыш были разработаны методические указания по исследованию проблемы деформации крыши кузовов пассажирских вагонов [1, 7], в которых были прописаны условия проверки вагона по допускаемым значениям внутренних силовых факторов в сечении крыши от действия нормативных механических нагрузок и теплового воздействия при разных режимах [3].

Для решения задачи оценки негативного влияния солнечной радиации на кузов требуется экспериментальное исследование фактов появления деформаций крыши от нагрева, являющейся существенным фактором влияния на состояние несущих элементов вагона.

Объектом испытаний был кузов вагона модели 61-4514 (далее – вагон), загруженный до веса тары вместе с весом двух тележек согласно требований EN 12663-1.

Из-за ограничений по габариту подвижного состава и необходимости установки климатических систем и водяных баков крыша выполнена в виде ступенчатой конструкции с понижением ее высоты в консольных частях кузова.

Испытательный процесс был запущен после измерения геометрических параметров крыши согласно карте замеров (рис. 1).

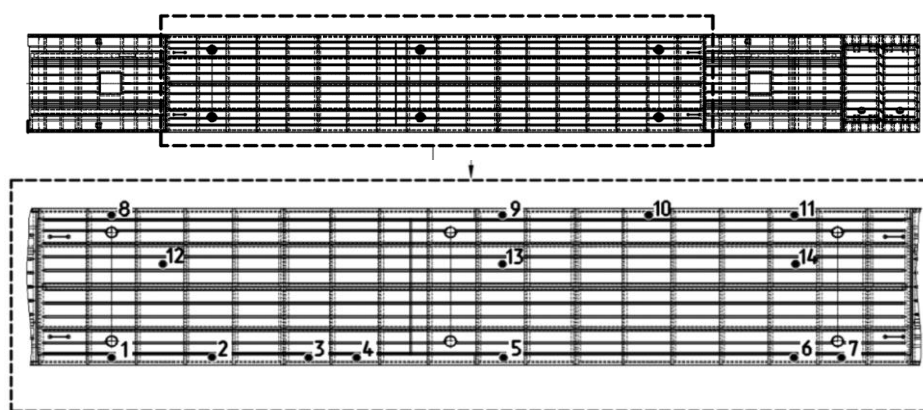


Рис. 1. Карта замеров толщины обшивки скатов (точки 1–11) и средней части крыши (точки 12–14)

Результаты измерений толщины элементов крыши представлены в табл. 1.

Таблица 1

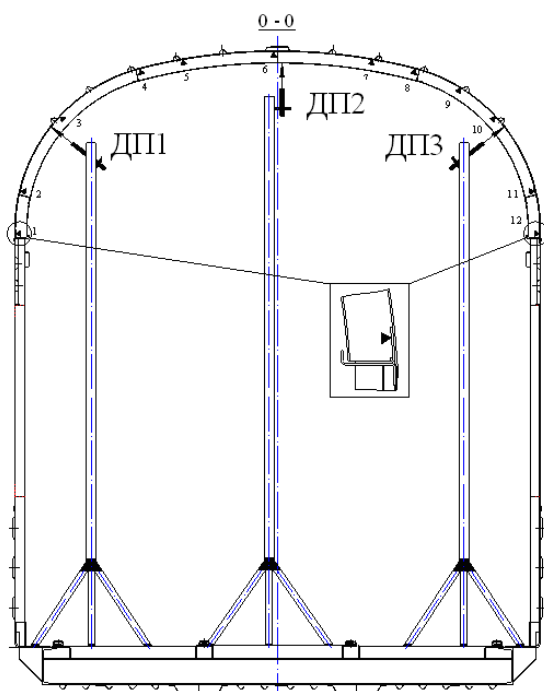
Результаты измерений толщины обшивки скатов и средней части крыши пассажирского вагона модели 61-4514 при скорости ультразвукового колебания 4570 м/с

Номер точки	Толщина, мм	Номер точки	Толщина, мм
1	2,04	8	1,97
2	1,97	9	2,06
3	2,06	10	1,98
4	2,03	11	1,98
5	1,97	12	1,53
6	1,97	13	1,47
7	1,98	14	1,51

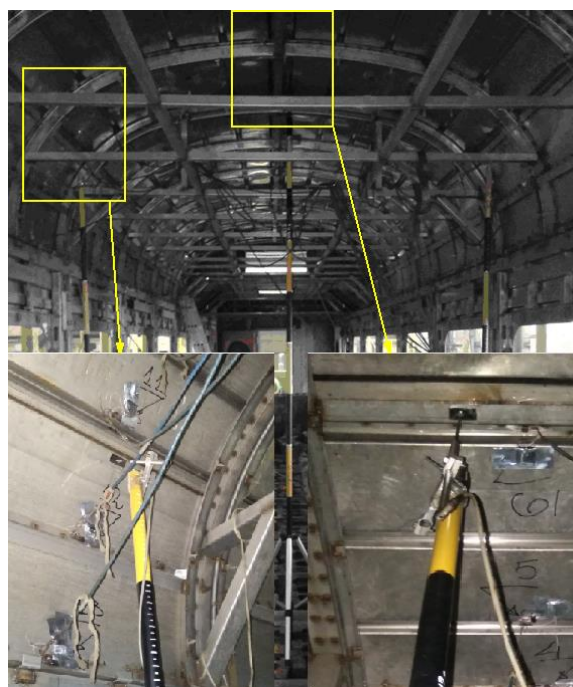
Измерение погиби листов обшивки крыши проведено в исходном состоянии до начала испытаний, а также после нагрева. Дополнительно замеры проводились снаружи кузова на каждом погонном метре длины при базе измерений 1500 мм.

При проведении эксперимента были приняты следующие допущения:

- были использованы три датчика перемещений (схема установки датчиков приведена на рис. 2);
- длительность каждого из циклов температурного нагружения составила от 20 до 50 минут;
- было установлено 12 термоэлектрических преобразователей (рис. 3) внутри кузова, и они дополнительно изолировались, один термоэлектрический преобразователь № 4 устанавливался на металлический настил пола;
- при визуальном выявлении потери устойчивости обшивки крыши испытание не останавливалось, запись контролируемых параметров проводилась непрерывно от минимальной температуры окружающей среды до установления максимальной температуры опыта, а также, после отключения нагревателей, до момента остывания кузова.



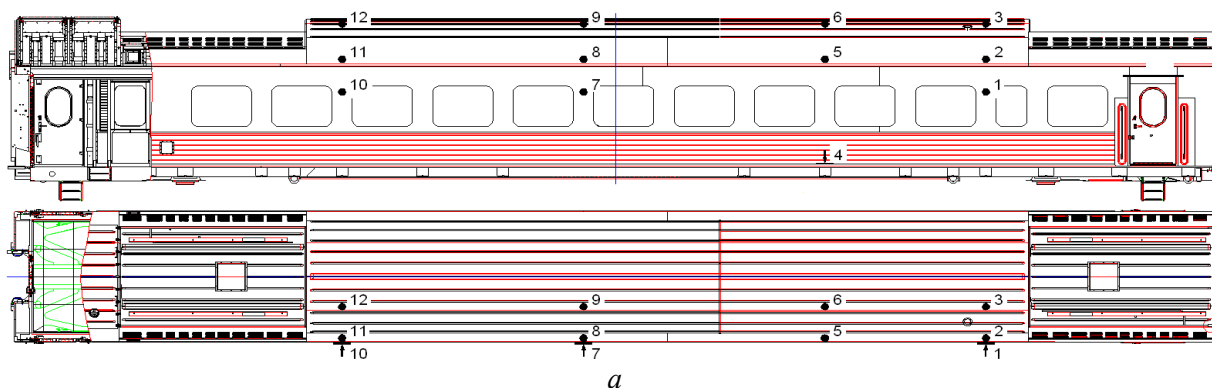
а



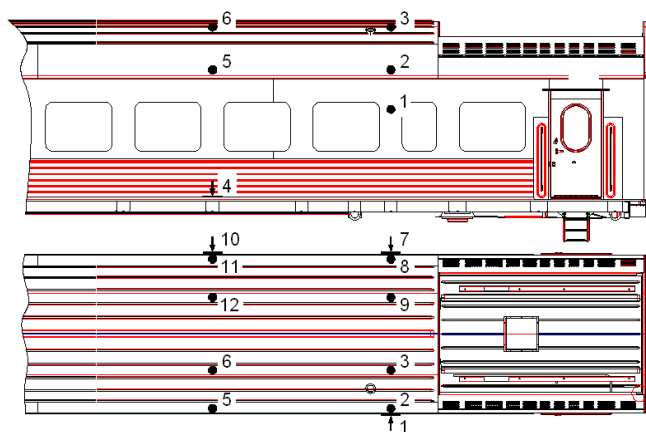
б

Рис. 2. Установка датчиков перемещения:

а – схема; б – монтаж датчиков перемещения на кузове вагона



а



б

Рис. 3. Установка термоэлектрических преобразователей:

а – схема установки и нумерация (нагрев 0,5 вдоль оси *Y*);

б – схема установки и нумерация (нагрев 0,5 вдоль оси *X*)

В течение 50 минут производилось нагревание крыши до максимально допускаемой температуры, равной 95 °С в соответствии с программой и методикой. При этом были зафиксированы деформации крыши, сохраняющиеся после остывания кузова (рис. 4).



Рис. 4. Деформации обшивки крыши, сохраняющиеся после остывания кузова

Появление визуально фиксируемых деформаций происходило при нагреве крыши кузова до температуры 65 °С и выше.

Температурные режимы нагрева:

- 18–25 °С (температура окружающей среды);
- 60–65 °С;
- 70–75 °С;
- 80–85 °С;
- 90–95 °С.

Контроль за состоянием нагрева обшивки поддерживался с помощью термоэлектрических преобразователей, расположенных на крыше и верхнем поясе боковин. Нагреватели включали поочередно отдельными рядами для более контролируемого процесса.

В соответствии с методикой к кузову были приложены испытательные нагрузки в различных сочетаниях при всех температурных режимах нагрева.

Кузов был загружен мерными грузами до веса тары плюс вес двух тележек с учетом требований EN 12663-1. Проводились ремонтные подъемки кузова вагона массой тара по диагоналям 1–4 и 2–3, подъёмки кузова массой тара под буферный брус 5–6 и подъёмки кузова массой тара под штатные места поддомкрачивания 1, 2, 3, 4.

По результатам испытаний выявились численные показатели изменения формы листов обшивки крыши. Значения перемещений фиксировались в сечении 0–0. Результаты приведены в табл. 2. Положительные значения перемещений соответствуют перемещению участка крыши наружу, а отрицательные – внутрь кузова.

Таблица 2

Значения максимальных экспериментальных перемещений, полученных при нагреве крыши и ремонтных нагрузках, мм

Режим нагружения		Сечение 0–0		
		Датчик перемещений № 1	Датчик перемещений № 2	Датчик перемещений № 3
Нагрев 0,5 крыши вдоль оси Y	Ремонтные нагрузки при 18–25 °С	0,2	0,2	1,2
	Ремонтные нагрузки при 60–65 °С	2,6	–1,1	–3,1
	Ремонтные нагрузки при 70–75 °С	–2,1	1,3	2,1
	Ремонтные нагрузки при 80–85 °С	–2,8	4,1	–5,9
	Ремонтные нагрузки при 90 – 95 °С	3,6	–2,5	–4,6
Нагрев 0,5 крыши вдоль оси X	Ремонтные нагрузки при 18–25 °С	0,8	–0,1	–0,6
	Ремонтные нагрузки при 60–65 °С	0,8	1,9	–2,3
	Ремонтные нагрузки при 70–75 °С	1,5	–2,3	–2,4
	Ремонтные нагрузки при 80–85 °С	0,9	–1,4	–1,7
	Ремонтные нагрузки при 90–95 °С	1	–1,8	–1,6

Во время нагревания с двух сторон численные показатели деформаций кузова практически равные. В период подъема по диагоналям в сечении крыши возникают искривления, равные 1 мм, которые проходят после возвращения кузова на 4 опоры.

Согласно программе и методике в качестве испытательного оборудования для нахождения напряжений применялись тензорезисторные датчики и усилитель измерений SPIDER. На рис. 5 показана расстановка тензорезисторных датчиков.

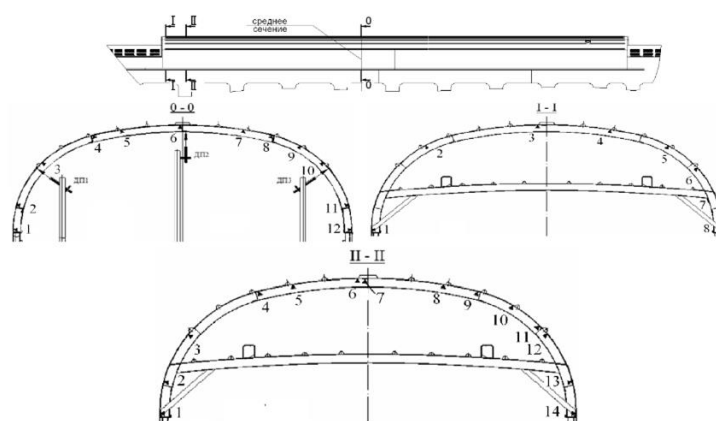


Рис. 5. Расстановка тензорезисторных датчиков

Для надежных результатов за весь период проведения испытаний было произведено несколько циклов с нагревом и остыванием. На рис. 6 приведены зависимости изменения микродеформаций (напряжений) крыши вагона в зависимости от значений температурного воздействия и сочетания испытательных ремонтных нагрузок.

Изучение и оценка полученных результатов испытаний показывает, что при температурах от

18 до 25 °С нагружения кузова не вызывают остаточных деформаций несущих элементов кузова вагона, а также не приводят к потере устойчивости. При этом повышение температуры нагрева больше 95 °С приводит к остаточным деформациям гофров крыши вагона.

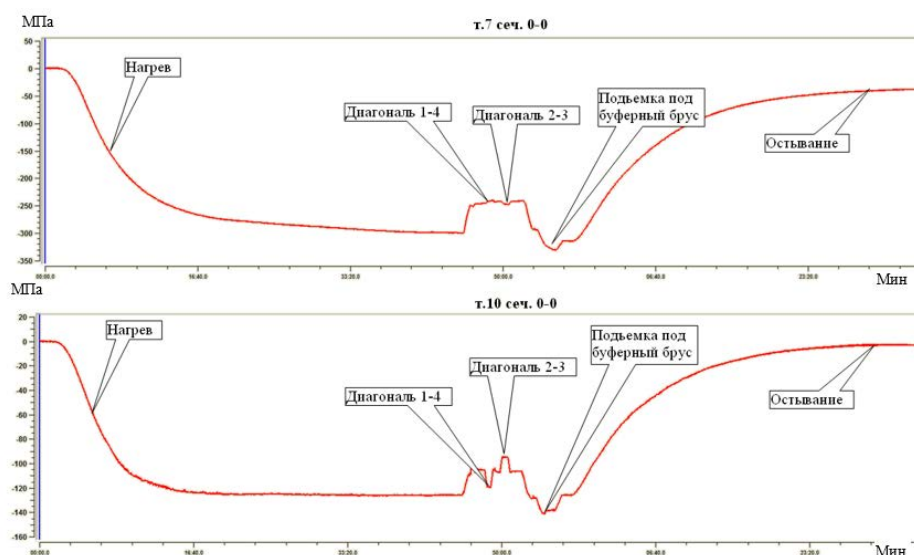


Рис. 6. Зависимости изменения микродеформаций (напряжений), полученные с тензодатчиков в среднем сечении 0–0 при нагреве до 80–90 °С и воздействии нормативных ремонтных нагрузок

Остаточные деформации зафиксированы при нагреве крыши более 65 °С, что обусловлено сложением имеющихся внутренних напряжений с напряжениями от нагрева крыши.

В рамках решения поставленных задач проведен расчет критических напряжений для разных поперечных сечений гофров. Критические напряжения ($\sigma_{крз}$, МПа) при гибкости $\lambda > \lambda_{нц}$ определялись по формуле Эйлера:

$$\sigma_{крз} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2},$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга);

λ – гибкость стержня.

Исследованы пять различных вариантов поперечных сечений и получены следующие результаты расчета для длины пролета $L1 = 600$ мм и $L2 = 900$ мм (модуль Юнга $E = 2,0 \cdot 10^5$ Н/мм² для стали марки 1,4541 EN 10088-2):

– вариант № 1 – гофр 21×1,5 мм, момент инерции: $I_x = 11814$ мм⁴, $\sigma_{кр1} = 291$ МПа > 260 МПа, принимаем 260 МПа для участка крыши $L1$, $\sigma_{кр2} = 150$ МПа для участка крыши $L2$, минимальная длина пролета 682 мм;

– вариант 2 – гофр 16×70×1,5 мм, момент инерции: $I_x = 10537$ мм⁴, $\sigma_{кр1} = 273$ МПа > 260 МПа, принимаем 260 МПа для участка крыши $L1$, $\sigma_{кр2} = 126$ МПа для участка крыши $L2$, минимальная длина пролета 627 мм;

– вариант 3 – гофр 26×47×1,5 мм, момент инерции: $I_x = 20838$ мм⁴, $\sigma_{кр1} = 330$ МПа > 260 МПа, принимаем 260 МПа для участка крыши $L1$, $\sigma_{кр2} = 238$ МПа для участка крыши $L2$, минимальная длина пролета 858 мм;

– вариант 4 – гофр 22,5×70×1,5 мм, момент инерции: $I_x = 21211$ мм⁴, $\sigma_{кр1} = 324$ МПа > 260 МПа, принимаем 260 МПа для участка крыши $L1$, $\sigma_{кр2} = 214$ МПа для участка крыши $L2$, минимальная длина пролета 814 мм;

– вариант 5 – гофр 31×70×1,5 мм, момент инерции: $I_x = 43515$ мм⁴, $\sigma_{кр1} = 354$ МПа > 260 МПа, принимаем 260 МПа для участка крыши $L1$, $\sigma_{кр2} = 309$ МПа для участка крыши $L2$, минимальная длина пролета ≥ 900 мм.

Результаты расчетов показывают, что наиболее благоприятный с точки зрения устойчивости

вариант № 5, но при максимальной длине пролета 850 мм и шаге гофров 112 мм рекомендуется при- менять вариант № 3.

При применении низкоуглеродистых сталей с модулем Юнга $E = 2,1 \cdot 10^5$ Н/мм² и более, кри- тические напряжения и, соответственно, коэффициент запаса устойчивости будут выше.

Анализ полученных результатов позволяет обобщить данные, полученные при испытаниях ва- гона для египетских национальных железных дорог и двухэтажных пассажирских вагонов. Уставлено, что возможность потери устойчивости элементов жёсткости продольного набора от нагрева крыши за счет солнечной энергии связана с несколькими факторами:

- в настоящее время нормативные расчеты продольных элементов крыши на устойчивость не учитывают температурные напряжения;

- сталь марки 1,4541 EN 10088-2, применяемая в несущих конструкциях кузовов вагонов об- ладает повышенным на 33 % коэффициентом линейного расширения по сравнению с низкоуглероди- стой сталью, при использовании которой на старогодних кузовах проблем не возникало;

- кроме того, новая сталь имеет более низкий модуль упругости, что неизбежно влечет за собой снижение изгибной жесткости продольных элементов крыши;

- снижение момента инерции сечения, вызванное снижением толщины стальных листов крыши с 2 мм до 1,5 мм (по коррозионным свойствам) в сочетании с механическими характеристиками кор- розионно-стойкой стали, приводит к снижению изгибной жесткости продольных элементов крыши (гофров 21×1,5 мм);

- увеличение расстояния между дугами крыши вагона более 682 мм для гофров размером 21×1,5 мм влечет снижение коэффициента устойчивости гофра ниже допускаемого значения.

Выводы

На основании анализа результатов, полученных при предварительных расчётах устойчивости [7, 10], а также испытаниях опытного образца вагона для Египетских национальных железных дорог при различных режимах нагрева и нагружений, разработаны и экспериментально подтверждены сле- дующие мероприятия для обеспечения устойчивости обшивки кузова:

- в расчеты устойчивости продольных элементов крыши необходимо включить учет темпера- турных напряжений;

- для несущих элементов крыши рекомендуется использовать стали с пониженным коэффици- ентом линейного расширения и увеличенным модулем упругости;

- увеличить момент инерции продольных несущих элементов крыши;

- для серийного гофра крыши рекомендуется изменить расстояние между дугами до 680 мм и меньше;

- применять светлые цвета краски (например, белой или серебристо-белой) для крыши вагона.

Разработанная обобщенная методика учета влияния избыточной солнечной радиацией крыши на кузова пассажирских вагонов успешно использована при испытании вагона модели 61-4514 [1] ко- леи 1435 мм, двухэтажного пассажирского вагона модели 61-4465 колеи 1520 мм [5].

Результаты работы учтены изготовителем – открытым акционерным обществом «Тверской ва- гоностроительный завод» при постройке пассажирских вагонов для Египетских национальных желе- зных дорог и двухэтажных пассажирских вагонов, что позволило исключить термические деформации крыш вагонов, вызванных солнечной радиацией.

Список литературы

1 Проведение испытаний по имитации облу- чения избыточной солнечной радиацией крыши кузова вагона модели 61-4514 и ре- монтных нагрузок : отчет о работе. – Тверь : ЗАО НО «ТИВ», 2019.

2 **Сорокина, Е. В.** Результаты испытаний ва- гона модели 61-4514 на путях Египетской национальной железной дороги при опытном пробеге / Е. В. Сорокина, К. П. Гурьянов, В. А. Грибин // Труды Ростовского государ- ственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (58). – С. 81–86. – ISSN 1818-5509.

References

1 Conducting tests to simulate exposure to ex- cess solar radiation of the roof of the car body of model 61-4514 and repair loads : report on the work. – Tver : ZAO NO "TIV", 2019.

2 **Sorokina, E. V.** Results of testing the car of model 61-4514 on the tracks of the Egyptian Na- tional Railway during a test run / E. V. Sorokina, K. P. Guryanov, V. A. Gribin // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soob- shcheniya. – 2022. – No. 1 (58). – P. 81–86. – ISSN 1818-5509.

3 Испытания кузова на прочность и устойчивость от воздействия нормативных ремонтных нагрузок при облучении солнечной радиацией крыши / С. Д. Коршунов, Д. И. Гончаров, Д. В. Красивов [и др.] // Сборник научных трудов VIII Всероссийской конференции научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения». – Курск, 2019. – С. 72–75. – ISBN 978-5-907270-40-4.

4 **Гурьянов, К. П.** Предварительные результаты испытаний опытного пробега вагона модели 61-4514.01 на путях Египетской национальной железной дороги / К. П. Гурьянов, Е. В. Сорокина, В. А. Грибин // Сборник научных трудов X международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». – Республика Беларусь, Гомель : БелГУТ, 2020. – С. 45–47.

5 **Сорокина, Е. В.** Исследование влияния избыточной солнечной радиации и боковой ветровой нагрузки на оценку прочности кузова двухэтажного вагона / Е. В. Сорокина, А. П. Болдырев, Ф. Ю. Лозбинец // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 7 (19). – С. 77–85. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-7-77-85.

6 Обоснование прочности несущей конструкции кузова вагона с учетом критических напряжений в гофрах / Е. В. Сорокина, С. Д. Коршунов, Д. И. Гончаров, А. С. Жуков // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 10 (22). – С. 55–61. – ISSN 2782-5957.

7 Методы расчетов на прочность кузовов железнодорожного подвижного состава / Н. П. Бардов, С. Д. Коршунов, Д. И. Гончаров, Е. В. Сорокина // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1 (66). – С. 6–9. – ISSN 1818-5509.

8 Исследование несущей способности пассажирских вагонов при статических и динамических нагрузках / С. Д. Коршунов, А. А. Смирнов, Д. А. Ромашов, Е. В. Сорокина // Материалы XIII международной научно-практической конференции, посвященной году качества «Проблемы безопасности на транспорте». – Республика Беларусь, Гомель : БелГУТ, 2024. – Ч. 1. – С. 99–100.

9 **Сорокина, Е. В.** Методика расчета критических напряжений гофров для учета влияния избыточной солнечной радиации на деформацию кузова вагона / Е. В. Сорокина, С. Д. Коршунов // Материалы XVII международной

3 Tests of the body for strength and resistance to the impact of standard repair loads when exposed to solar radiation of the roof / S. D. Korshunov, D. I. Goncharov, D. V. Kravitsov [et al.] // Collection of scientific papers of the VIII All-Russian scientific and practical conference "Problems and Prospects for the Development of Carriage Building". – Kyrsk, 2019. – P. 72–75. – ISBN 978-5-907270-40-4.

4 **Guryanov, K. P.** Preliminary test results of the trial run of the car model 61-4514.01 on the tracks of the Egyptian National Railway. K. P. Guryanov, S. V. Sorokina, V. A. Gribin // Collection of scientific papers of the X International scientific and practical conference "Problems of transport safety". – Republic of Belarus, Gomel : BelSUT, 2020. – P. 45–47.

5 **Sorokina, E. V.** Study of the influence of excess solar radiation and lateral wind load on the assessment of the strength of the body of a double-decker car / E. V. Sorokina, A. P. Boldyrev, F. Yu. Lozbinev // Transport engineering. – 2023. – No. 7 (19). – P. 77–85. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-7-77-85.

6 Justification of the strength of the supporting structure of the car body taking into account critical stresses in the corrugations / E. V. Sorokina, S. D. Korshunov, D. I. Goncharov, A. S. Zhukov // Transport engineering. – 2023. – No. 10 (22). – P. 55–61. – ISSN 2782-5957.

7 Methods of strength calculations of railway rolling stock bodies / N. P. Bardov, S. D. Korshunov, D. I. Goncharov, E. V. Sorokina // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 1 (66). – P. 6–9. – ISSN 1818-5509.

8 Study of the bearing capacity of passenger cars under static and dynamic loads / S. D. Korshunov, A. A. Smirnov, D. A. Romashov, E. V. Sorokina // Proceedings of the XIII International scientific and practical conference dedicated to the Year of Quality "Problems of transport safety". – Republic of Belarus, Gomel : BelSUT, 2024. – Part. 1. – P. 99–100.

9 **Sorokina, E. V.** Methodology of calculating the critical stresses of corrugations to take into account the effect of excessive solar radiation on the deformation of the wagon body / E. V. Sorokina, S. D. Korshunov // Proceedings of the

научно-практической конференции «Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты». – Санкт-Петербург, 2023. – С. 258–263.

XVII International scientific and practical conference "Rolling stock of the 21st century : ideas, requirements, projects". – Saint Petersburg, 2023. – P. 258–263.

E. V. Sorokina

IMPROVEMENT OF THE PASSENGER CARRIAGE FOR THE EGYPTIAN NATIONAL RAILWAYS BASED ON THE STUDY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS

Abstract. The article discusses the problems of deformation of the roof of passenger car bodies from the effects of excessive solar radiation and the influence of external factors on the strength and stability of the metal structure of the car body. The results of full-scale modeling of the temperature effect on the roof of the wagon body of model 61-4514 with the application of repair loads are presented in the research paper, as well as the dependence of the change in microdeformations (stresses) of the car roof depending on the values of the temperature effect and the combination of test repair loads. The calculation of critical stresses for different cross-sections of the corrugations is carried out. Five different variants of cross-sections are studied, and the most favorable variant in terms of stability is selected. Measures to ensure the stability of car body sheathing are given.

Keywords: metal structure of the body, passenger car, mechanical loads, thermal effects, roof of the car.

For citation: Sorokina, E. V. Improvement of the passenger carriage for the Egyptian National Railways based on the study of the influence of external factors / E. V. Sorokina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 145–153. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_145.

Сведения об авторах

Сорокина Елена Викторовна
Акционерное общество Научная
организация «Тверской институт
вагоностроения»,
отдел кузовов и компонентов
железнодорожной техники,
главный специалист,
e-mail: sorokina.e@tiv.ru

Information about the authors

Sorokina Elena Viktorovna
Joint Stock Company Scientific Organization
“Tver Institute of Carriage Engineering”,
Department of bodies and components
of railway equipment,
Chief Specialist,
e-mail: sorokina.e@tiv.ru

В. Ф. Танаев, Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, М. В. Федотов

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТЕПЛОВЗОВ НОРМАЛИЗАЦИЕЙ МОЩНОСТИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация. Рассмотрена мощность силовой установки тепловоза как один из основных факторов, определяющих его эксплуатационную экономичность. Как показал анализ данных подсистем диагностики 27 секций тепловозов серии 2ТЭ116У и 17 тепловозов серии ТЭП70БС, до 80 % локомотивов эксплуатируются с пониженной на 5...25 % мощностью силовой установки, что приводит к увеличению на 2...5 % расхода топлива на тяговую работу тепловоза. В результате анализа значений параметров дизеля установлено, что основной причиной снижения мощности является нарушение регулировки рычажной передачи привода реек топливных насосов при нормальном техническом состоянии топливной аппаратуры и системы воздухообеспечения дизеля. В этом случае нормальный уровень мощности силовой установки может быть восстановлен микропроцессорной системой управления коррекцией заданного значения положения силового вала исполнительного устройства электронного регулятора дизеля с одновременным контролем температуры отработавших газов по цилиндрам. Показано, что дополнительное снижение расхода топлива на тягу поезда может быть достигнуто выравниванием нагрузок по цилиндрам дизеля.

Ключевые слова: дизель-генераторная установка тепловоза, мощность, температура отработавших газов, равномерность работы цилиндров, электронный регулятор дизеля, рычажная передача, расход топлива.

Для цитирования: Повышение эксплуатационной экономичности тепловозов нормализацией мощности силовой установки / В. Ф. Танаев, Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, М. В. Федотов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 154–162. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_154.

Постановка задачи

Среди множества факторов, определяющих эксплуатационную экономичность и надежность тепловоза, одним из наиболее существенных является эффективная мощность, реализуемая дизелем на фланце коленчатого вала. Ее величина в каждый момент времени определяется мощностью, потребляемой тяговым генератором, и мощностью вспомогательного оборудования тепловоза. Оптимальный уровень мощности дизеля для каждой позиции контроллера машиниста (частоты вращения коленчатого вала дизеля), обеспечивающий его экономичную и надежную работу, устанавливается заводом – изготовителем дизеля и реализуется системой автоматического регулирования напряжения тягового генератора.

Однако, как показывают результаты мониторинга параметров силовых установок тепловозов, реальная мощность, реализуемая ими в эксплуатации, далеко не всегда соответствует требованиям завода-изготовителя.

На рис. 1 приведена диаграмма распределения мощности дизель-генераторной установки (ДГУ) 27 секций тепловозов серии 2ТЭ116У на 11-й позиции контроллера машиниста.

Как следует из рисунка, только три секции (12,5 %) реализуют мощность, близкую к установленной заводом-изготовителем, которая, с учетом среднестатистической мощности включенных вспомогательных агрегатов [1] и атмосферных условий в регионе эксплуатации [2], для 11-й позиции контроллера составляет 1610 кВт [3] (линия 2 на рис. 1). Силовые установки двух секций перегружены, силовые установки (а значит, и дизели) остальных 22 секций (81 %) работают с пониженным уровнем мощности. Среднее значение коэффициента мощности, реализуемого на 11-й позиции контроллера, для этих 22 секций составило 0,882.

Следствием перегрузки дизеля является снижение его ресурса и показателей надежности, которые во многом определяют показатели надежности тепловоза в целом. Работа на пониженной мощности сопровождается повышенным расходом топлива.

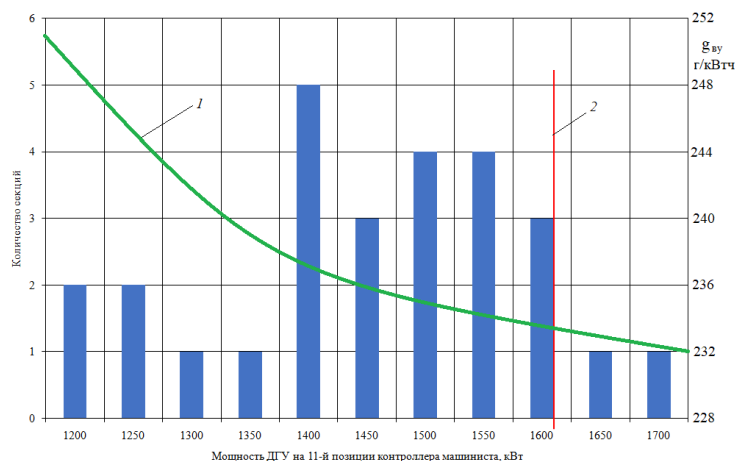


Рис. 1. Группированный статистический ряд распределения секций тепловозов серии 2ТЭ116У по реализуемой мощности ДГУ:

1 – удельный расход топлива $g_{ву}$, приведенный к мощности на выходе выпрямительной установки (г/кВтч); *2* – уровень мощности, установленный заводом-изготовителем

На рис. 2 представлен статистический ряд распределения мощности ДГУ 14 секций тепловозов серии ТЭП70БС.

Как следует из рисунка, только четыре из 14 секций (менее 30 %) реализуют мощность, соответствующую или близкую к установленной с учетом среднестатистических режимов вспомогательного оборудования тепловоза (красная линия на диаграмме). Остальные тепловозы работают с пониженной мощностью дизеля и перерасходом топлива на тягу поездов.

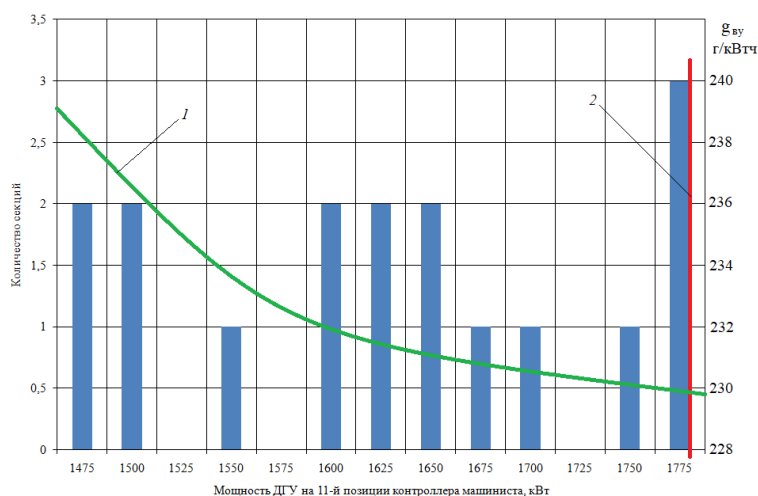


Рис. 2. Группированный статистический ряд распределения секций тепловозов серии ТЭП70БС по реализуемой мощности ДГУ:

1 – удельный расход топлива $g_{ву}$, приведенный к мощности на выходе выпрямительной установки (г/кВтч); *2* – уровень мощности, установленный заводом-изготовителем, статистический ряд распределения секций тепловозов серии ТЭП70БС по реализуемой мощности ДГУ

Таким образом, актуальной является задача повышения надежности и экономичности тепловозов эксплуатируемого парка за счет нормализации мощности силовых установок.

Выбор метода решения

Для решения поставленной задачи прежде всего необходимо установить причины отклонения мощности силовых установок тепловозов в эксплуатации.

На всех отечественных магистральных тепловозах, как выпускаемых в настоящее время, так и выпускавшихся ранее, используются системы автоматического регулирования напряжения тягового генератора (САР ТГ), реализующие принцип объединенного регулирования дизеля и генератора, суть

которого заключается в поддержании заданной постоянной эффективной мощности дизеля на каждой позиции контроллера машиниста. Однако, ввиду невозможности прямого измерения эффективной мощности дизеля в тепловозной силовой установке, контроль эффективной мощности осуществляется косвенно по положению рабочего органа регулятора частоты вращения (РЧВ) коленчатого вала (КВ) дизеля, которое определяет величину выхода реек топливных насосов высокого давления (ТНВД), в свою очередь устанавливающих величину цикловой подачи топлива в цилиндры дизеля.

Таким образом, задача поддержания заданной постоянной эффективной мощности сводится к поддержанию заданного постоянного положения рабочего органа регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля на каждой позиции контроллера.

Структура системы объединенного регулирования сохраняется неизменной на всех магистральных тепловозах, начиная с тепловозов серии ТЭ10, на которых она впервые была применена в 1958 году. Ее реализация для тепловозов серии 2ТЭ116У приведена на рис. 3 [4].

Задачей подсистемы регулирования мощности тягового генератора в системе МСУ-ТП тепловоза 2ТЭ116У является поддержание заданного значения $h_{\text{зад}}$ сигнала h датчика ДЛП положения силового вала исполнительного устройства (ИУ) электронного регулятора дизеля (ЭРД). Величина $h_{\text{зад}}$ вычисляется в управляющей программе УОИ для текущего значения угловой скорости ω вращения КВ и вместе с текущим значением h , получаемым от электронного регулятора дизеля, используется для формирования задания мощности тягового генератора.

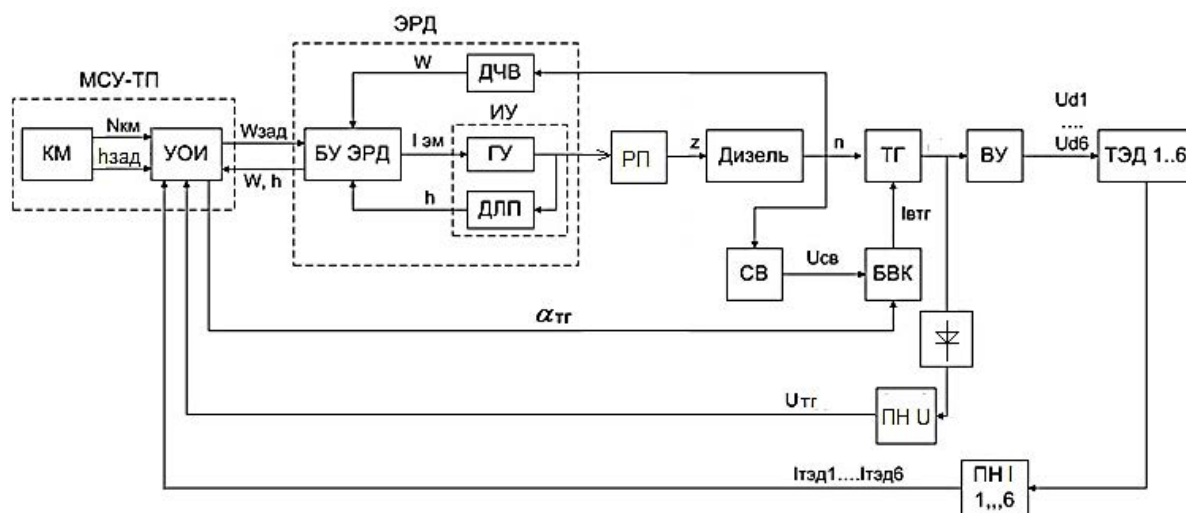


Рис. 3. Функциональная схема объединенной САР ДГУ тепловоза 2ТЭ116У:

КМ – контроллер машиниста (задатчик позиций); УОИ – устройство обработки информации микропроцессорной системы управления МСУ-ТП; БУ ЭРД – блок управления электронного регулятора дизеля; ГУ, ДЛП – гидроусилитель и датчик линейных перемещений исполнительного устройства (ИУ) ЭРД; ТГ – тяговый генератор; ВУ – выпрямительная установка; ТЭД 1...6 – тяговые электродвигатели; СВ – синхронный возбудитель; БВК – управляемый выпрямитель; $W, W_{\text{зад}}$ – заданная и фактическая угловая скорость КВ дизеля; h – сигнал датчика ДЛП; РП – рычажная передача ЭРД; z – положение реек ТНВД дизеля; U_d – напряжение на выходе ВУ, ПН U – датчик напряжения U_d , ПН I 1...6 – датчики тока тяговых электродвигателей (ТЭД), $U_{\text{тг}}$ – сигнал с датчика напряжения генератора, $I_{\text{тэд1}}...I_{\text{тэд6}}$ – сигнал с датчиков тока ТЭД, $\alpha_{\text{тг}}$ – сигнал управления выпрямителями БВК, $N_{\text{км}}$ – сигнал задания позиции контроллера машиниста

Косвенный способ контроля регулируемой величины (эффективной мощности дизеля) существенно снижает точность ее стабилизации на позициях контроллера и увеличивает количество факторов, влияющих на мощность тягового генератора в процессе эксплуатации. Помимо изменения режимов работы вспомогательных агрегатов тепловоза, к ним относятся:

- техническое состояние дизеля и обеспечивающих его работу систем тепловоза;
- температура топлива;
- параметры состояния окружающей среды;
- настройка характеристики датчика линейных перемещений (положения силового вала гидроусилителя) исполнительного устройства ЭРД;

– настройка рычажной передачи РП привода реек ТНВД (см. рис. 3).

При ухудшении качества рабочего процесса дизеля вследствие изменения его технического состояния ЭРД, поддерживая заданную частоту вращения коленчатого вала, перемещает рейки ТНВД в сторону увеличения подачи топлива, повышая тем самым уровень выходного сигнала h датчика положения вала ИУ ЭРД. Для приведения его в соответствие с заданным значением $h_{\text{зад}}$ процессор УОИ снижает мощность тягового генератора, вследствие чего выходной вал ИУ ЭРД возвращается в исходное положение.

Изменение состояния окружающей среды (атмосферного давления, температуры, влажности воздуха) приводит к изменению режима работы системы воздухообеспечения дизеля, качества сгорания топлива в цилиндрах дизеля, и, как следствие, его индикаторной и эффективной мощности. Поддерживая заданное значение частоты вращения коленчатого вала, ЭРД изменяет положение реек ТНВД (уровень выходного сигнала h датчика ДЛП).

К такому же результату, т.е. к изменению выходного сигнала h датчика ДЛП с последующим изменением мощности тягового генератора, приводит нарушение настройки характеристики датчика ДЛП, а также регулировки рычажной передачи привода реек ТНВД.

Во всех перечисленных случаях значение h восстанавливается до $h_{\text{зад}}$ изменением мощности тягового генератора.

В некоторых случаях мощность ДГУ ограничивается системой управления на уровне мощности селективной характеристики (отключение ТЭД, отклонение частоты вращения КВ от заданной для текущей позиции контроллера, отказ датчика линейных перемещений ИУ или датчика давления наддувочного воздуха ЭРД), при этом текущее положение рабочего органа ИУ устанавливается регулятором только с учетом нагрузки дизеля.

Из 27 секций, распределение которых по уровню реализуемой мощности приведено на рис. 1, только на трех положение рабочего органа ИУ ЭРД не соответствовало заданному для 11-й позиции контроллера значению вследствие отключения ТЭД и неисправности датчика давления наддувочного воздуха. На остальных 24 секциях УОИ МСУ-ТП с высокой точностью поддерживала равенство $h = h_{\text{зад}}$.

Поскольку все тепловозы эксплуатировались на одном участке в один и тот же период года, а приведенные на рис. 1 результаты по каждой секции получены усреднением значений параметров силовой установки за 4...5 поездок, изменение температуры топлива и атмосферных условий может быть исключено из перечня факторов, влияющих на разброс мощности ДГУ.

Ухудшение технического состояния топливной аппаратуры высокого давления или системы воздухообеспечения дизеля сопровождается повышением температуры отработавших газов соответственно в отдельных или во всех цилиндрах вследствие ухудшения качества смесеобразования в отдельных цилиндрах или уменьшения суммарного коэффициента избытка воздуха во всех цилиндрах.

Изменение регулировки рычажной передачи привода реек ТНВД или параметров датчика линейных перемещений ИУ ЭРД приводит к изменению мощности ДГУ и давления наддувочного воздуха без существенного изменения температуры ОГ.

На рис. 4 приведены значения мощности ДГУ, максимальной и минимальной температуры ОГ на выходе из цилиндров, а также давления наддувочного воздуха для 24 секций тепловозов с нормальной работой системы регулирования мощности.

Как следует из рисунка, максимальная температура ОГ дизелей 11 секций с пониженной мощностью ДГУ находится на уровне 420...500 °С (предельно допустимое значение составляет 620 °С [2]), что свидетельствует о нормальном техническом состоянии топливной аппаратуры (ТА) высокого давления и системы воздухообеспечения. При этом максимальная разность температуры ОГ по цилиндрам у 11 секций превышает 100 °С, что является нарушением руководства по эксплуатации дизеля и свидетельствует о неравномерной нагрузке цилиндров. В случае выравнивания нагрузки коррекцией цикловой подачи топлива максимальная температура ОГ снизится.

Таким образом, снижение мощности 11 секций тепловозов (т.е. более 57 % от количества секций с пониженной мощностью ДГУ) является следствием снижения цикловой подачи в результате нарушения регулировки рычажной передачи привода реек ТНВД либо характеристики датчика положения вала (ДЛП) ИУ при нормальном техническом состоянии дизеля.

До постановки тепловоза на контрольные реостатные испытания для регулировки рычажной передачи привода реек ТНВД и выравнивания нагрузок по цилиндрам их мощность может быть восстановлена системой управления (УОИ МСУ-ТП) непосредственно в эксплуатации путем увеличения заданного $h_{\text{зад}}$ значения сигнала ДЛП с контролем максимальной температуры ОГ на выходе из цилиндров. Однако реализация такой функции потребует доработки программного обеспечения УОИ.

Максимальная температура ОГ на выходе из цилиндров дизелей девяти секций (в том числе у одной с нормальным уровнем мощности) превышает 550°C , что может свидетельствовать об ухудшении технического состояния системы воздухооборудования или ТА высокого давления дизеля. Однако выполненный анализ показал, что повышенная температура газов наблюдается только в отдельных цилиндрах дизелей (количество указано числом на графике) при одновременном снижении минимальной температуры до $390\ldots 420^{\circ}\text{C}$ и уменьшении давления наддува, что явно указывает на разгрузку остальных цилиндров.

Таким образом, причиной повышения максимальной температуры ОГ в отдельных цилиндрах дизелей восьми секций при одновременном снижении мощности силовой установки у семи из них является перегрузка отдельных цилиндров по цикловой подаче (разность температуры ОГ по цилиндрам достигает 300°C) при одновременном снижении средней цикловой подачи и мощности дизеля вследствие нарушения регулировки рычажной передачи или настройки датчика ДЛП.

Очевидно, что в этом случае коррекция уровня мощности в эксплуатации изменением заданного значения $h_{\text{зад}}$ сигнала ДЛП исключается. Для восстановления нормального уровня мощности силовой установки требуется выполнение регулировки РП привода реек ТНВД и проведение контрольных реостатных испытаний с целью выравнивания нагрузок цилиндров в соответствии с Руководством по эксплуатации дизеля [2].

На рис. 5 приведены значения параметров силовых установок 17 тепловозов ТЭП70БС при работе на 11-й позиции контроллера машиниста.

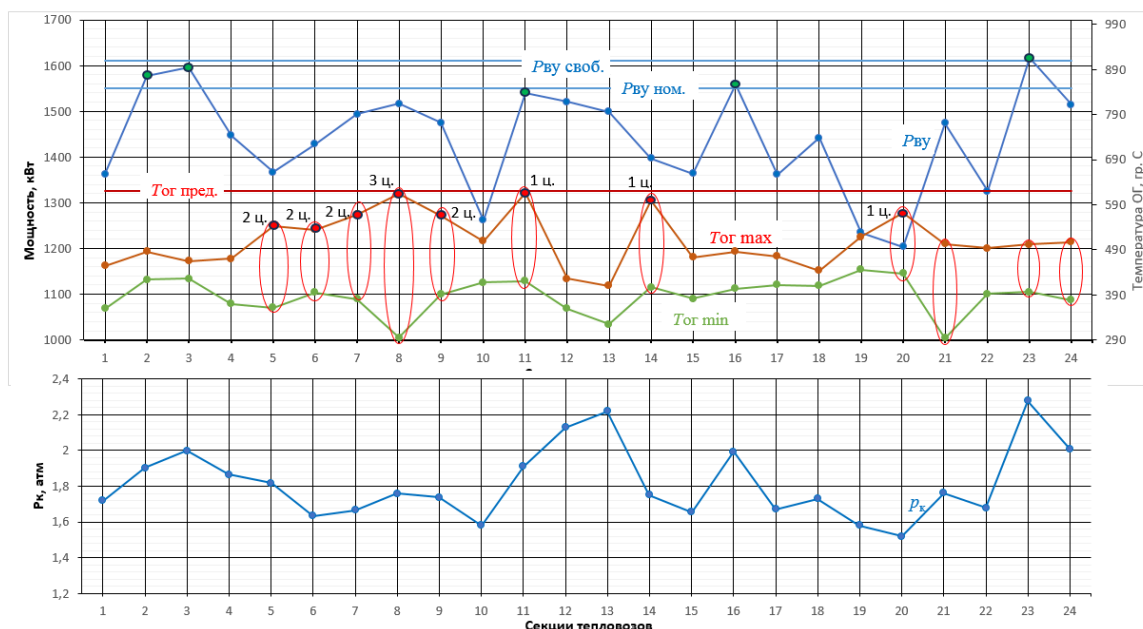


Рис. 4. Значения параметров силовой установки 24 секций тепловозов серии 2ТЭ116У на 11-й позиции контроллера машиниста:

$P_{\text{ву}}$ – средняя мощность на зажимах выпрямительной установки; $P_{\text{ву ном}}$ – номинальная мощность на зажимах ВУ (при всех включенных вспомогательных агрегатах); $P_{\text{ву своб}}$ – свободная мощность на зажимах ВУ (при среднестатистической мощности вспомогательных агрегатов);

$T_{\text{ог пред}}$ – предельная температура ОГ на выходе из цилиндров;

$T_{\text{ог max}}$ – максимальная температура ОГ на выходе из цилиндров дизеля; $T_{\text{ог min}}$ – минимальная температура ОГ на выходе из цилиндров; 1ц...3ц – количество цилиндров дизеля с повышенной температурой ОГ на выходе;

P_k – давление наддувочного воздуха

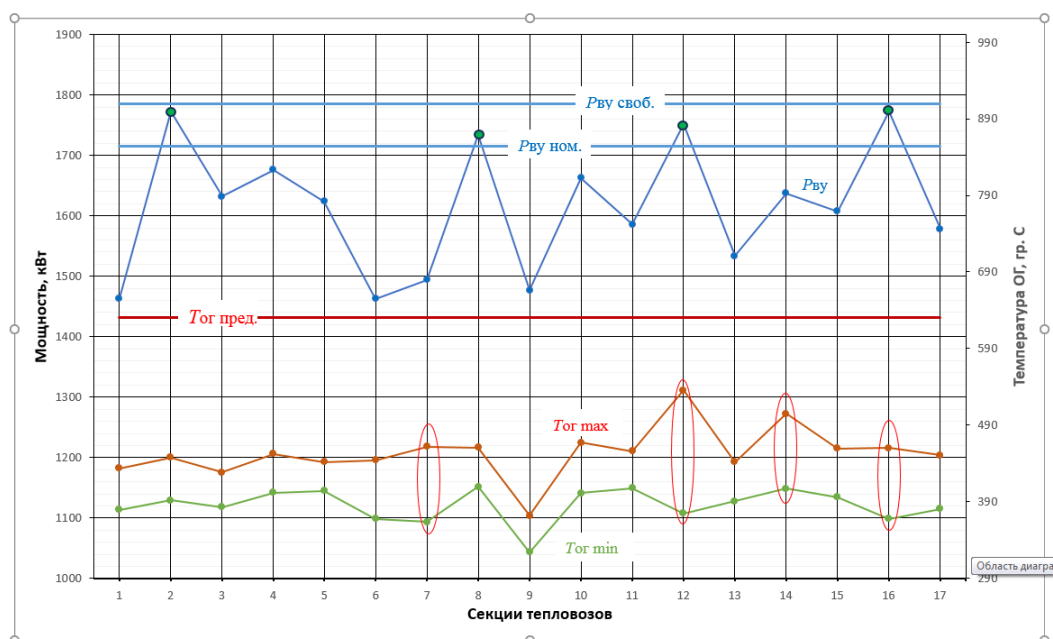


Рис. 5. Значения параметров силовой установки 17 секций тепловозов серии ТЭП70БС
(экспликация приведена на рис. 4)

На всех тепловозах среднее значение сигнала положения ДЛП ИУ ЭРД соответствует заданному для 11-й позиции контроллера машиниста. Как следует из рисунка, техническое состояние топливной аппаратуры высокого давления дизельных двигателей пассажирских тепловозов серии ТЭП70БС существенно лучше, чем у грузовых тепловозов 2ТЭ116У, эксплуатирующихся на том же участке. Температура отработавших газов дизелей всех без исключения секций далека от предельно допустимой, что свидетельствует о нормальном техническом состоянии как системы воздухообеспечения, так и топливной аппаратуры высокого давления.

Тем не менее более 70 % тепловозов работают с пониженной мощностью дизеля, перерасходуя топливо. Причиной снижения мощности является нарушение регулировки рычажной передачи привода реек ТНВД. До выполнения контрольных реостатных испытаний уровень мощности может быть нормализован управляющей программой УОИ путем коррекции заданной величины $h_{\text{зад}}$ сигнала ДЛП при условии доработки программного обеспечения системы МСУ-ТЭ(А) тепловоза ТЭП70БС для реализации такой функции.

Обязательным условием для выполнения коррекции мощности силовой установки управляющей программой является исправное состояние дизельного термокомплекта, обеспечивающего контроль температуры отработавших газов дизеля.

Как следует из рис. 5, на четырех тепловозах разность температуры отработавших газов по цилиндрам дизеля превышает предельное значение, установленное руководством по эксплуатации (100 °С), что свидетельствует о неравномерной нагрузке цилиндров. Выравнивание нагрузок цилиндров также позволит повысить эксплуатационную экономичность тепловозов.

Обсуждение результатов

Таким образом, основной причиной снижения мощности силовой установки тепловозов серий 2ТЭ116У и ТЭП70БС в эксплуатации является нарушение регулировки рычажной передачи привода реек ТНВД или настроек характеристики датчика ДЛП. Если данное нарушение не сопровождается перегрузкой отдельных цилиндров (57 % секций тепловозов 2ТЭ116У и 100 % тепловозов ТЭП70БС с пониженной мощностью ДГУ), то до его устранения во время выполнения технического обслуживания мощность может быть восстановлена системой управления путем коррекции заданного значения $h_{\text{зад}}$ сигнала датчика ДЛП при условии доработки программного обеспечения УОИ системы управления. Следует учитывать, что реализация такой коррекции возможна только при исправной работе системы контроля температуры отработавших газов на выходе из цилиндров дизеля.

У остальных 43 % секций тепловозов 2ТЭ116У с пониженной мощностью силовых установок нарушение регулировок РП и датчика ДЛП сопровождается перегрузкой отдельных цилиндров дизеля по цикловой подаче, которая приводит к увеличению температуры ОГ на выходе из цилиндров до пре-

дельной (620 °С). В этом случае единственным способом восстановления нормального уровня мощности силовой установки является выполнение контрольных реостатных испытаний с выравниванием нагрузок цилиндров в соответствии с руководством по эксплуатации дизеля [2] и последующей регулировкой РП привода реек ТНВД.

Однако, как следует из рис. 3, даже нормальный уровень мощности силовой установки тепловоза в эксплуатации не является достаточным условием ее экономичной работы. У дизелей двух секций тепловозов 2ТЭ116У с нормальной мощностью ДГУ разность температуры отработавших газов цилиндров превышает 100 °С, в отдельных случаях достигая 300 °С, при этом две из этих 11 секций имеют нормальную мощность. Это означает, что за исключением 32 цилиндров дизеля с равномерной нагрузкой цилиндров все остальные цилиндры дизелей остальных 22 секций (91,6 % от количества цилиндров дизелей 24 секций, включая три дизеля секций с нормальной мощностью ДГУ) в большей или меньшей мере недогружены и работают с перерасходом топлива.

На тепловозах ТЭП70БС средняя разница температур по цилиндрам дизелей соответствует требованиям руководства по эксплуатации, однако на четырех из 17 тепловозов температура также превышает предельное значение, установленное руководством по эксплуатации дизеля [2], вследствие чего значительная часть цилиндров дизелей этих тепловозов работает с пониженной мощностью и перерасходом топлива.

Таким образом, в качестве эффективного мероприятия, обеспечивающего снижение расхода топлива на тягу поездов и при этом не требующего никаких дополнительных затрат, может быть рекомендовано ужесточение контроля за выполнением требований руководства по эксплуатации дизеля [2] в части выравнивания нагрузок цилиндров при выполнении плановых и контрольных реостатных испытаний тепловозов.

Выводы

1 В результате анализа данных регистрации подсистем бортовой диагностики установлено, что до 80 % тепловозов 2ТЭ116У, ТЭП70БС эксплуатируются с недоиспользованием мощности дизеля на 5...20 %, что приводит к 2...5 % перерасхода топлива на тяговую работу тепловоза при условии равномерной нагрузки цилиндров дизеля.

2 До 40 % дизелей тепловозов эксплуатируются с превышением установленной руководством по эксплуатации разницы температуры по цилиндрам, что свидетельствует о неравномерной нагрузке цилиндров и увеличенном расходе топлива на работу дизель-генератора.

3 Основной причиной снижения мощности силовых установок тепловозов в эксплуатации является нарушение регулировки рычажной передачи привода реек топливных насосов высокого давления при нормальном техническом состоянии топливной аппаратуры и систем воздухообеспечения дизелей.

4 Существенным резервом повышения эксплуатационной экономичности тепловозов является ужесточение контроля равномерности нагрузок цилиндров по разности температуры отработавших газов и давления вспышки при выполнении контрольных реостатных испытаний тепловозов, а также регулярная проверка регулировки рычажной передачи привода реек топливных насосов высокого давления и настроек датчика положения силового вала ИУ ЭРД при выполнении технических осмотров и обслуживаний локомотива.

5 При отсутствии превышения температуры отработавших газов по всем цилиндрам дизеля (45 % тепловозов 2ТЭ116У и 100 % тепловозов ТЭП70БС) нормальная мощность их силовых установок в эксплуатации может поддерживаться системами МСУ посредством коррекции заданных значений сигнала датчика положения силового вала ИУ ЭРД с контролем температуры отработавших газов на выходе из цилиндров.

Список литературы

- 1 Влияние технического состояния вспомогательного оборудования тепловозов на их энергоэффективность в эксплуатации / В. А. Перминов, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин, И. Э. Нестеров // Вестник Научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. – 2015. – № 97. – С. 45–58. – EDN WLQBHH.
- 2 Дизель-генератор 18-9ДГ : руководство по

References

- 1 The influence of the technical condition of auxiliary equipment of diesel locomotives on their energy efficiency in operation / V. A. Perminov, V. V. Grachev, D. N. Kurilkin, I. E. Nesterov // Bulletin of the Scientific Research and Design Technology Institute of Rolling Stock. – 2015. – No. 97. – P. 45–58. – EDN WLQBHH.
- 2 Diesel generator 18-9DG : Operation manual 18-9DG.91RE / Kolomna Diesel Locomotive Plant. –

эксплуатации 18-9ДГ.91РЭ / Коломенский тепловозостроительный завод. – Коломна, 2005. – 418 с.

3 Система микропроцессорная управления, регулирования и диагностики : руководство по эксплуатации 27.Т.156.00.00.000 РЭ. – Коломна : ВНИКТИ, 2007. – 112 с.

4 Принципы работы и диагностика системы регулирования мощности дизель-генератора тепловоза 2ТЭ116У / С. В. Сергеев, В. В. Грачев, С. И. Ким [и др.] // Локомотив. – 2012. – № 11 (671). – С. 23–27. – EDN PEWMPV.

Kolomna, 2005. – 418 p.

3 Microprocessor control, regulation and diagnostic system : Operation Manual 27.Т.156.00.00.000 RE. – Kolomna : VNIKTI, 2007. – 112 p.

4 Principles of operation and diagnostics of the power control system of the diesel generator of the 2TE116U diesel locomotive / S. V. Sergeev, V. V. Grachev, S. I. Kim [et al.] // Locomotive. – 2012. – No. 11 (671). – P. 23–27. – EDN PEWMPV.

V. F. Tanaev, D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, M. V. Fedotov

IMPROVING THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF DIESEL LOCOMOTIVES BY NORMALIZING THE POWER PLANT CAPACITY

Abstract. The power plant capacity of a diesel locomotive is one of the main factors determining its operational efficiency. As shown by the analysis of data from diagnostic subsystems of 27 sections of 2TE116U series diesel locomotives and 17 TEP70BS series diesel locomotives, up to 80 % of locomotives are operated with a power plant capacity reduced by 5...25 %, which leads to an increase of 2...5 % in fuel consumption for traction operation of the locomotive. As a result of the analysis of the diesel parameter values, it was found that the main reason for the decrease in power is a violation of the adjustment of the lever gear of the fuel pump rack drive under normal technical condition of the fuel equipment and the diesel air supply system. In this case, the normal power level of the power plant can be restored by a microprocessor control system for correcting the setpoint of the position of the power shaft of the actuator of the electronic diesel regulator with simultaneous control of the exhaust gas temperature across the cylinders. It is shown that an additional reduction in fuel consumption for train traction can be achieved by equalizing the loads on the diesel cylinders.

Keywords: diesel generator set of a diesel locomotive, power, exhaust gas temperature, uniformity of cylinder operation, electronic diesel regulator, lever transmission, fuel consumption.

For citation: Improving the operational efficiency of diesel locomotives by normalizing the power plant capacity / V. F. Tanaev, D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, M. V. Fedotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 154–162. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_154.

Сведения об авторах

Танаев Валерий Фаритович

ОАО «Российские железные дороги»,
заместитель генерального директора – главный инженер,
e-mail: lt@pgups.ru

Курилкин Дмитрий Николаевич

ФГБОУ ВО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: kurilkin@pgups.ru

Грачев Владимир Васильевич

ФГБОУ ВО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,

Information about the authors

Tanaev Valery Faritovich

JSC “Russian Railways”,
Deputy General Director – Chief Engineer,
e-mail: lt@pgups.ru

Kurilkin Dmitry Nikolayevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Chair “Locomotives and Locomotive Facility”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: kurilkin@pgups.ru

Grachev Vladimir Vasilievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Chair “Locomotives and Locomotive Facility”,

кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры,
e-mail: lt@pgups.ru

Федотов Михаил Владимирович

АО «Научно-исследовательский и
конструкторско-технологический институт
подвижного состава»,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией диагностики
научно-исследовательского конструкторского
бюро,
e-mail: lt@pgups.ru

Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Professor of the Chair,
e-mail: lt@pgups.ru

Fedotov Mikhail Vladimirovich

JSC “Scientific Research and Design Technology
Institute of Rolling Stock”,
Candidate of Engineering Sciences,
Head of the Diagnostic Laboratory
of the Scientific Research Design Bureau,
e-mail: lt@pgups.ru

С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов

ОЦЕНКА ИЗНОСА ГРЕБНЕЙ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗА ЭП2К В ОБЛАСТИ ИХ КОНТАКТА С ГОЛОВКОЙ РЕЛЬСА

Аннотация. Приведены результаты теоретических исследований взаимодействия бандажей колесных пар и рельсов в горизонтальной плоскости при движении электровоза ЭП2К в кривых рельсовой колеи. Сжимающие силы в зоне контакта колеса и рельса определяют смятие материала контактирующих тел.

В кривых радиусов 350–400 м гребни бандажей второй и пятой по ходу электровоза колесных пар будут контактировать с гранью головки внутреннего рельса, что определяет наибольшие затраты энергии на преодоление сил фрикционного трения и наибольший износ гребней бандажей этих колесных пар. Выполнена оценка величины износа материала гребня бандажа по суммарному объему смятия материалов бандажа и рельса в области их контакта с учетом радиуса кривой и протяженности пути проскальзывания колеса.

Полученные формулы позволяют находить величины износа материалов гребня колеса и головки рельса в зависимости от соотношения их твердостей, от радиуса и протяженности кривой и от скорости движения локомотива.

Ключевые слова: электровоз ЭП2К, трехосная тележка, колесная пара, контакт колеса и рельса, фрикционное трение, смятие материала бандажа и рельса, износ гребня бандажа.

Для цитирования: Шантаренко, С. Г. Оценка износа гребней бандажей колесных пар электровоза ЭП2К в области их контакта с головкой рельса / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С 163–170. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_163.

Введение

Односекционный пассажирский электровоз ЭП2К имеет две трехосные тележки с тяговым приводом третьего класса и двухступенчатым рессорным подвешиванием [1]. В кривых малого радиуса технические решения, использованные в ходовой части электровоза, во многом определяют характер движения по рельсам средних колесных пар тележек [2], при котором происходит непрерывное контактное взаимодействие головки рельса и гребня бандажа.

Под действием сжимающих сил формируется распределение напряжений по области контакта. Вращение колеса сопровождается силами фрикционного трения, значения которых позволяют дать оценку износа материала контактирующих тел в зависимости от параметров рельсового пути в кривой и скорости движения локомотива.

Силовое взаимодействие в области контакта гребня бандажа и головки рельса

Напряжения σ в области контакта гребня бандажа и головки рельса распределены по эллипсоиду (рис. 1).

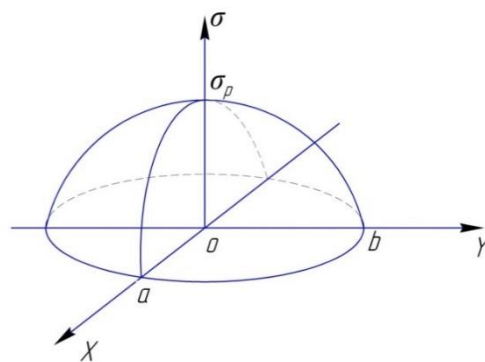


Рис. 1. Распределение напряжений по области контакта гребня бандажа и головки рельса:

a, b – полуоси эллипса, σ_0 – максимальное напряжение

При этом

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = 1,$$

где a – большая полуось; b – малая полуось; σ_0 – наибольшее напряжение.

Сжимающая сила P численно равна половине объема эллипсоида напряжений

$$P = \frac{2}{3} \pi a b \sigma_0.$$

Величины a , b , σ_0 и величина δ смятия материала контактирующих тел зависят от их геометрии и от сжимающей силы P [3].

Геометрия тел в области точки контакта K определяется радиусами кривизны линий, лежащих в сечениях плоскостями, перпендикулярными к касательной \bar{l} (индекс 2) и к бинормали $\bar{\tau}$ (индекс 1).

Вычислим $R_{\delta 2}$, используя рис. 2.

Дуга линии сечения гребня бандажа в окрестности точки K принадлежит окружности

$$x^2 + (y - R_K)^2 = R_{\delta 1}^2.$$

При вращении этой линии вокруг оси OX получаем поверхность тора

$$x^2 + (\sqrt{y^2 + z^2} - R_K)^2 = R_{\delta 1}^2.$$

Часть поверхности гребня лежит на поверхности этого тора. Радиусы кривизны сечений $R_{\delta 2}$ у этих поверхностей в точке K будут одинаковыми.

Для упрощения вычислений преобразуем систему координат таким образом, чтобы нормальное сечение с индексом 2 лежало в координатной плоскости. С этой целью сместим начало координат в точку $K(R_{\delta 1} \cos \alpha; R_K + R_{\delta 1} \sin \alpha, 0)$ и совершим поворот вокруг оси OZ на угол α .

Формулы перехода к координатам в новой системе x_1, y_1, z_1 имеют вид:

$$\begin{cases} x = x_1 \cos \alpha - y_1 \sin \alpha + R_{\delta 1} \cos \alpha; \\ y = x_1 \sin \alpha - y_1 \cos \alpha + R_{\delta 1} \sin \alpha + R_K; \\ z = z_1. \end{cases}$$

Преобразуя эти формулы и принимая $y_1 = 0$, получим уравнение линии сечения нормальной плоскостью:

$$x^2 + y^2 + z_1^2 - 2R_K \sqrt{y^2 + z^2} + R_K^2 - R_{\delta 1}^2 = 0,$$

где

$$x = x_1 \cos \alpha + R_{\delta 1} \cos \alpha;$$

$$y = x_1 \sin \alpha + R_{\delta 1} \sin \alpha + R_K.$$

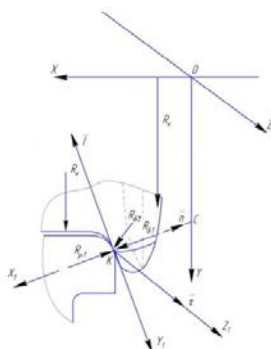


Рис. 2. Схема для вычисления радиуса кривизны $R_{\delta 2}$:

$R_{p1}=15$ мм; $R_{\delta 1}=40$ мм; $R_{p2}=\infty$, где R_p – радиус кривизны головки рельса;

R_{δ} – радиус кривизны гребня бандажа ; R_K – радиус круга катания

Радиус кривизны линии

$$R = \frac{[1 + (x'_{1z})^2]^{2/3}}{x''_{1zz}}.$$

Для определения производных $(x_1)'_z$ и $(x_1)''_{zz}$ продифференцируем уравнение линии сечения нормальной плоскостью

$$\begin{aligned} (xx'_z + yy'_z + z) - R_K \frac{yy' + z}{\sqrt{y^2 + z^2}} &= 0 \\ \text{или} \\ xx'_z + (yy'_z + z)(1 - \frac{R_K}{\sqrt{y^2 + z^2}}) &= 0. \end{aligned}$$

Подставив $x, y, x'_z = x'_1 \cos \alpha$ и $y'_z = x'_1 \sin \alpha$, получаем

$$\begin{aligned} (x_1 \cos \alpha + R_{\delta 1} \cos \alpha)x'_{1z} \cos \alpha + \\ + [(x_1 \sin \alpha + R_{\delta 1} \sin \alpha + R_K)x'_{1z} \sin \alpha + z](1 - \frac{R_K}{\sqrt{y^2 + z^2}}) &= 0. \end{aligned}$$

Подставляя координаты точки K в системе координат $x_1 y_1 z_1$, получаем

$$\begin{aligned} R_{\delta 1} \cos \alpha \cdot x'_{1z} \cos \alpha + x'_{1z} (R_{\delta 1} \sin \alpha + R_K) \sin \alpha \cdot (1 - \frac{R_K}{R_{\delta 1} \sin \alpha + R_K}) = \\ = x'_{1z} R_{\delta 1} \cos^2 \alpha + x'_{1z} R_{\delta 1} \cos^2 \alpha = 0. \end{aligned}$$

Отсюда $x'_{1z} = 0$.

Для определения $(x_1)''_{zz}$ продифференцируем дважды уравнение линии сечения нормальной плоскостью:

$$(\dot{x})^2 + x\ddot{x} + [(\dot{y})^2 + yy' + 1] \left(1 - \frac{R_K}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right) + (y\dot{y} + z) \left(R_K \frac{y\dot{y} + z}{\sqrt{(y^2 + z^2)^3}}\right)$$

$$x''_{zz} = x''_1 \cos \alpha, \quad y''_{zz} = x''_1 \sin \alpha.$$

В точке K

$$x''_{zz} = \frac{\sin \alpha}{R_{\delta 1} \sin \alpha + R_K}.$$

Радиус кривизны в точке K

$$R_{\delta 2} = \frac{1}{x''_{zz}} = R_{\delta 1} + \frac{R_K}{\sin \alpha}.$$

Таким образом, получаем следующие значения главных радиусов кривизны для поверхностей гребня бандажа и головки рельса в точке их контакта в мм: $R_{\delta 2} = 1518$; $R_{\delta 1} = 40$; $R_{p1} = 15$; $R_{p2} = \infty$.

Величины a, b и σ_0 вычисляются как:

$$a = m_a \sqrt[3]{\frac{P}{E(\frac{1}{R_{\delta 1}} + \frac{1}{R_{p2}})}} = m_a \sqrt[3]{\frac{P}{2AE_0}};$$

$$b = a\sqrt{1 - e^2};$$

$$\sigma_0 = m_\sigma \sqrt[3]{PE^2(\frac{1}{R_{\delta 2}} + \frac{1}{R_{p2}})^2} = m_\sigma \sqrt[3]{4PA^2E_0^2}.$$

Величина смятия материала

$$\delta = m_{\delta} \sqrt[3]{\frac{P}{E_0^2} \left(\frac{1}{R_{\delta 2}} + \frac{1}{R_{p2}} \right)} = m_{\delta} \sqrt[3]{\frac{2P^2 A}{E_0^2}}.$$

Модуль упругости стали $E = 2 \cdot 10^4$ кг/мм².

Величины $m_a, m_{\sigma}, m_{\delta}$ и e зависят от отношения $\frac{A}{B}$, где $A < B$ (табл. 1), при этом

$$A = 0,5 \left(\frac{1}{R_{p2}} + \frac{1}{R_{\delta 2}} \right) = \frac{1}{3036};$$

$$B = 0,5 \left(\frac{1}{R_{p1}} + \frac{1}{R_{\delta 1}} \right) = \frac{11}{240};$$

$$\frac{A}{B} = 0,0072.$$

Таблица 1

Величины для расчета напряжений в контакте «колесо – рельс»

$\frac{A}{B}$	e	m_{σ}	m_a	m_{δ}
1	0	0,388	1,109	1,230
0,9	0,35	0,4	1,130	1,256
0,8	0,5	0,42	1,156	1,280
0,7	0,61	0,44	1,180	1,300
0,6	0,7	0,468	1,214	1,330
0,5	0,78	0,49	1,242	1,370
0,4	0,84	0,536	1,282	1,420
0,3	0,89	0,6	1,324	1,470
0,2	0,93	0,716	1,390	1,550
0,1	0,97	0,97	1,500	1,690
0,007	0,999	3,202	1,826	2,142

Получаем расчетные формулы:

$$a = 1,826 \sqrt[3]{\frac{P}{2AE_0}}; b = 0,045a; \delta = 2,142 \sqrt[3]{\frac{2AP^2}{E_0^2}}; \sigma_0 = 3,202 \sqrt[3]{4PA^2E_0^2}.$$

Здесь сжимающая сила P равна нормальной составляющей силы P_r упругого отжатия рельса $P = P_r \cos \alpha$. Для представления качественной картины ограничимся расчетами для летних условий эксплуатации.

Оценка износа материала гребня бандажа

Износ материала гребня бандажа можно оценить по суммарному объему смятия материалов бандажа и рельса в области контакта при движении локомотива в кривой радиуса R_k и протяженностью пути проскальзывания $S_{пр}$.

Все дальнейшие расчеты выполнены для скорости локомотива $V_l = 80 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$.

Время одного оборота колеса

$$t = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{kl}}{V_l} = 0,177 \text{ с},$$

где V_l – скорость движения локомотива.

Скорость проскальзывания гребня по боковой грани рельса

$$V_k = \frac{V_l}{R_{kl}} h_k = 0,356 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

За один оборот колеса путь проскальзывания точки контакта

$$S_k = 2\pi h_k = 0,063 \text{ м}.$$

Время движения в кривых с суммарной длиной $S_{кр}$

$$t = \frac{S_{кр}}{V_{л}}.$$

В табл. 2 приведены значения времени движения в кривых различных радиусов при скорости 80 км/ч.

Таблица 2

Время движения в кривых

$R_k, \text{ м}$	200	230	260	290	320	350	380	400
$S_{кр}, \text{ м}$	143	580	1112	55291	12090	9297	11936	88553
$t, \text{ с}$	6,436	26,103	50,045	2488	544,104	418,365	538,02	3996,45

Суммарный путь проскальзывания

$$S_{пр} = V_k t = \frac{S_{кр}}{R_{kl}} h_k.$$

Расчетные значения суммарного пути проскальзывания при движении в кривых различных радиусов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Суммарный путь проскальзывания

$R_k, \text{ м}$	200	230	260	290	320	350	380	400
$S_{кр}, \text{ м}$	143	580	1112	55291	12090	9297	11936	88553
$S_{пр}, \text{ м}$	2,288	9,28	17,792	884,656	193,44	148,94	191,53	89,95

Объем материала смятия в области контакта

$$V_{см} = \frac{4}{3} \pi a b \delta.$$

Часть этого объема занимает материал гребня бандажа. Эта часть и даст оценку износа гребня. Общий объем материала смятия при движении локомотива в кривой радиуса R_k

$$V_{об} = \pi b \delta S_{пр}.$$

При динамическом вписывании электровоза ЭП2К в кривые малого радиуса проявляется особый характер взаимодействия средних колесных пар тележек с рельсами. В кривых радиусов 350–400 м гребни бандажей второй и пятой по ходу электровоза колесных пар будут контактировать с гранью головки внутреннего рельса, что определяет наибольшие затраты энергии на преодоление сил фрикционного трения и наибольший износ гребней бандажей этих колесных пар [4].

В табл. 4 и 5 представлены значения всех параметров и величин, приведенных выше, для средних колесных пар первой и второй по ходу тележек электровоза ЭП2К.

Таблица 4

Сводная таблица параметров и величин для контакта средней колесной пары первой по ходу тележки

Первая по ходу тележка								
$R_k, \text{ м}$	200	230	260	290	320	350	380	400
$P, \text{ КН}$	37,3	22,29	8,3	0	0	19,58	11,66	7,07
$a, \text{ мм}$	11,98	10,08	7,26	0	0	9,66	8,13	6,88
$b, \text{ мм}$	0,54	0,454	0,33	0	0	0,435	0,37	0,31
$\delta, \text{ мм}$	0,61	0,431	0,22	0	0	0,396	0,28	0,201
$S_{пр}, \text{ м}$	2,3	9,28	17,8	0	0	149	191,5	89,95
$V_{об} 10^3, \text{ мм}$	2,37	5,7	4,08	0	0	80,61	61,66	17,61

Таблица 5

**Сводная таблица параметров и величин для контакта средней колесной пары
второй по ходу тележки**

Вторая по ходу тележка								
$R_k, \text{ м}$	200	230	260	290	320	350	380	400
$P, \text{ КН}$	40,78	16,72	19,58	0	0	46,22	27,73	16,86
$a, \text{ мм}$	12,33	9,16	9,66	0	0	12,86	10,18	9,19
$b, \text{ мм}$	0,56	0,41	0,43	0	0	0,58	0,46	0,41
$\delta, \text{ мм}$	0,64	0,36	0,40	0	0	0,71	0,50	0,36
$S_{\text{пр}}, \text{ м}$	2,3	9,28	17,8	0	0	149	191,5	89,95
$V_{06} 10^3, \text{ мм}$	2,59	4,32	9,6	0	0	192,4	137,5	41,9

На рис. 3 представлены графики зависимости V_{06} от величины радиуса кривой для первой и второй по ходу тележек.

Как показывают расчеты, наибольший объем материала, участвующего в износе, приходится на кривые радиусов 350–400 м.

Этот результат хорошо согласуется с полученными ранее оценками по величинам работ сил фрикционного трения в зоне контакта колеса и рельса [4].

Следует понимать, что полученный объем не определяет точного значения износа материала гребня колеса, а является лишь его частью. Для определения объема материала, подверженного смятию, используем значения твердостей материалов контактирующих тел.

Общую величину смятия δ можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$\delta = \delta_p + \delta_k,$$

где δ_p и δ_k – смятие материалов рельса и колеса соответственно.

Эти величины можно вычислить из соотношения твердостей материалов рельса и колеса, определенных по методу Роквелла:

$$H_p = 100 - \frac{\delta_p}{e};$$

$$H_k = 100 - \frac{\delta_k}{e}.$$

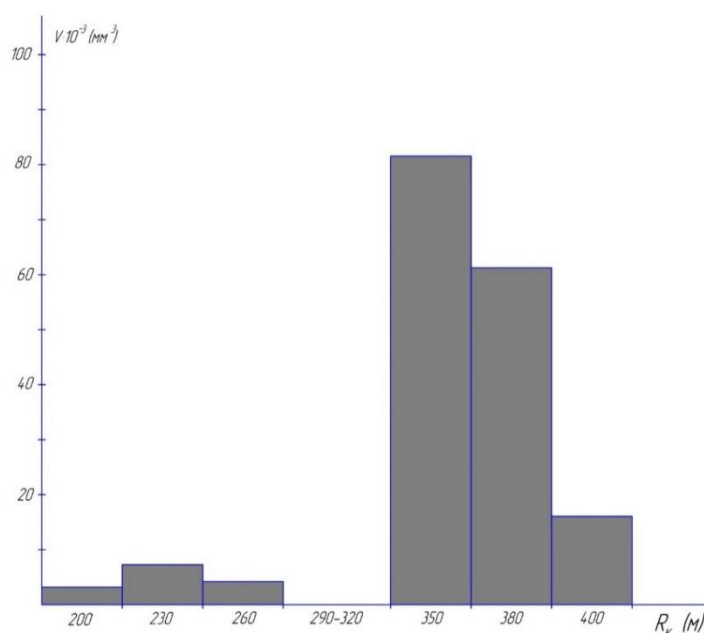


Рис. 3. Зависимость объема смятого материала от радиуса кривой рельсовой колес

Отсюда находим

$$\begin{aligned}\delta_k &= e(100 - H_k); \\ \delta_p &= e(100 - H_p).\end{aligned}$$

Обозначим

$$K = \frac{\delta_k}{\delta_p} = \frac{e(100 - H_k)}{e(100 - H_p)}.$$

Так как

$$\delta_k = \delta - \delta_p,$$

то получаем

$$\begin{aligned}\delta_k &= \frac{K\delta}{K+1}, \\ \delta_p &= \frac{\delta}{K+1}.\end{aligned}$$

Суммарный объем материала, подверженного смятию в области контакта колеса и рельса при движении локомотива в кривых участках пути,

$$V_{об} = \pi b \delta S_{пр}.$$

Так как

$$\delta = \delta_p + \delta_k,$$

то общий объем смятия материала можно разбить на две составляющие:

- объем материала рельса $V_p = \pi b \delta_p S_{пр}$;
- объем материала гребня колеса $V_k = \pi b \delta_k S_{пр}$.

$$\text{Здесь } \delta_k = \frac{K\delta}{K+1}; \delta_p = \frac{\delta}{K+1}.$$

Полученные формулы позволяют находить величины износа материалов гребня колеса и головки рельса в зависимости от соотношения их твердостей, радиуса и протяженности кривой и скорости движения локомотива.

Заключение

Результаты теоретических исследований показали, что оценку величины износа материала гребня бандажа можно выполнять по суммарному объему смятия материалов бандажа и рельса в области их контакта с учетом радиуса кривой рельсовой колеи и протяженности пути проскальзывания гребня по боковой грани рельса.

При движении электровоза ЭП2К в кривых малого радиуса проявляется особый характер взаимодействия средних колесных пар тележек с рельсами. Гребни бандажей второй и пятой по ходу электровоза колесных пар будут контактировать с гранью головки внутреннего рельса, при этом наибольший объем материала, участвующего в износе, приходится на кривые радиусов 350–400 м.

Для определения объема материала, подверженного смятию (износу), необходимо использовать значения твердостей материалов контактирующих тел.

Список литературы

- 1 Электровоз ЭП2К. Руководство по эксплуатации. Техническое описание. – Коломна : Коломенский завод, 2006. – 233 с.
- 2 Галиев, И. И. Особенности взаимодействия экипажа и пути при движении электровоза ЭП2К в кривых малого радиуса / И. И. Галиев, В. Н. Ушак // Известия Транссиба. – 2022. – № 2 (50). – С. 108–115. – ISSN 2220-4245.
- 3 Шантаренко, С. Г. Влияние технологических и конструкционных параметров на работоспособность деталей и узлов локомотивов : монография / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, Е. В. Пономарев. – Омск : ОмГУПС, 2024. – 146 с.

References

- 1 Electric locomotive EP2K. Operation manual. Technical description. – Kolomna : Kolomna plant, 2006. – 233 p.
- 2 Galiev, I. I. The peculiarities of the interaction of the crew and the track during the movement of the electric locomotive EP2K in small radius curves / I. I. Galiev, V. N. Ushak // Izvestia Transsiba. – 2022. – No. 2 (50). – P. 108–115. – ISSN 2220-4245.
- 3 Shantarenko, S. G. The influence of technological and structural parameters on the performance of parts and assemblies of locomotives : monograph / S. G. Shantarenko, V. F. Kuznetsov,

4 Шантаренко, С. Г. Динамическое вписывание тележки электровоза ЭП2К в кривые рельсового пути / С. Г. Шантаренко, В. Ф. Кузнецов, Н. С. Бойков // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (65). – С. 80–88. – DOI 10.20291/2079-0392-2025-1-80-88.

E. V. Ponomarev. – Omsk : Omsk State Transport University, 2024. – 146 p.

4 Shantarenko, S. G. Dynamic fitting of the electric locomotive trolley EP2K into the curves of the rail track / S. G. Shantarenko, V. F. Kuznetsov, N. S. Boykov // Herald of the Ural state university of railway transport. – 2025. – No. 1 (65). – P. 80–88. – DOI 10.20291/2079-0392-2025-1-80-88.

S. G. Shantarenko, V. F. Kuznetsov

EVALUATION OF WEAR OF WHEEL SET RIMS OF ELECTRIC LOCOMOTIVE EP2K IN THE AREA OF THEIR CONTACT WITH RAIL HEAD

Abstract. The article presents the results of theoretical studies of the interaction of the wheel set treads and rails in the horizontal plane during the movement of the electric locomotive EP2K in the curves of the rail track.

Compressive forces in the contact zone of the wheel and rail determine the crushing of the material of the contacting bodies. In the curves with radii of 350–400 m, the ridges of the treads of the second and fifth wheel sets along the electric locomotive will contact the edge of the head of the internal rail, which determines the greatest energy consumption to overcome the forces of friction and the greatest wear of the treads of these wheel sets. The wear value of the flange material of the rim is estimated by total volume of crushing of the rim and rail materials in the area of their contact taking into account curve radius and the length of the wheel slip path.

The obtained formulas make it possible to find values of wear of wheel flange and rail head materials depending on the ratio of their hardnesses, the radius and length of the curve and the speed of the locomotive.

Keywords: EP2K electric locomotive, three-axle bogie, wheelset, wheel and rail contact, frictional friction, crushing of the rim and rail material, rim flange wear.

For citation: Shantarenko, S. G. Evaluation of wear of wheel set rims of electric locomotive EP2K in the area of their contact with rail head / S. G. Shantarenko, V. F. Kuznetsov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 163–170. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_163.

Сведения об авторах

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава»,

доктор технических наук, профессор,
e-mail: ShantarenkoSG@omgups.ru

Кузнецов Виктор Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Krupskoi1-301@mal.ru

Information about the authors

Shantarenko Sergey Georgievich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair “Technologies of Transport Engineering and Rolling Stock Repair”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ShantarenkoSG@omgups.ru

Kuznetsov Victor Fedorovich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair “Higher Mathematics”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Krupskoi1-301@mal.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.2

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_171

*В. Л. Герус, А. С. Мишарин***МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ И КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ЕДИНОМ СЕТЕВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ТРАНСПОРТНОГО ХОЛДИНГА**

Аннотация. Статья посвящена моделированию взаимодействия показателей качества обслуживания и ключевых показателей эффективности (КРІ) в рамках Единого сетевого технологического процесса (ЕСТП) грузовых железнодорожных перевозок. Авторы рассматривают системный подход к управлению транспортным холдингом, акцентируя внимание на устранении противоречий между функциональными подразделениями и повышением удовлетворенности клиентов. Для анализа выявленных «разрывов» (Gap) применяется Gap-модель Зейтгамла, которая позволяет оценить расхождения между ожиданиями потребителей и фактическим качеством услуг. Предложены решения для минимизации этих разрывов, включая оптимизацию ЕСТП, внедрение цифровых технологий и модернизацию инфраструктуры. Особое внимание уделено интеграции стратегических целей холдинга с операционными КРІ, что способствует повышению экономической устойчивости и конкурентоспособности. Результаты исследования могут быть полезны для транспортных компаний, стремящихся улучшить качество обслуживания и эффективность управления.

Ключевые слова: транспортный холдинг, качество обслуживания, КРІ, Gap-модель, железнодорожные перевозки, системный подход, стратегия развития железнодорожного транспорта; методологии управления перевозочным процессом; эффективность перевозочного процесса; система сбалансированных показателей; ключевые показатели эффективности; Единый сетевой технологический процесс.

Для цитирования: Герус, В. Л. Моделирование взаимодействия показателей качества обслуживания и ключевых показателей эффективности в Едином сетевом технологическом процессе транспортного холдинга / В. Л. Герус, А. С. Мишарин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 171–178. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_171.

Долгосрочная программа развития транспортного холдинга в качестве одного из основных стратегических приоритетов формулирует перспективное повышение технической и экономической эффективности железнодорожных грузовых перевозок. Реализация этого приоритета предполагает решение таких ключевых вопросов, как «совершенствование технологии организации перевозочного процесса, ликвидацию технических и технологических противоречий, имеющих как внутри филиалов, так и на стыках взаимодействия с другими подразделениями компании» [1].

Транспортный холдинг представляет собой «сложную производственно-экономическую систему, управление которой должно носить преимущественно целевой характер, так как при реактивном управлении невозможно обеспечить координацию работы отдельных подсистем и эффективное использование производственных ресурсов. Элементы реактивного (ситуационного) управления должны подчиняться принятым целям, то есть быть встроенными в систему целевого управления» [2].

Реализуемый таким образом системный подход к управлению транспортным холдингом заключается в представлении его деятельности в форме системы разнообразных функциональных и территориальных подразделений компании, ориентированных на достижение интегрированных стратегических целей. Одним из документов, регламентирующих представление перечисленных подразделений в рамках концепций системного и процессного подходов, является Единый сетевой технологический процесс железнодорожных грузовых перевозок (ЕСТП) [3].

ЕСТП регламентирует «порядок взаимодействия между центрами управления перевозками в границах технологических полигонов управления перевозочным процессом и другими структурными подразделениями и определяет основные принципы, критерии и порядок организации планирования, контроля и управления деятельностью подразделений» [4].

ЕСТП, реализуемый Центральной и региональными дирекциями управления движением, формулирует их целевые стратегические показатели деятельности, из которых к базовым относят:

- прибыль, исчисляемую как EBITDA (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization);
- объем погрузки, исчисляемый в вагонах;
- интегральный уровень удовлетворенности потребителей, определяемый при помощи показателей качества обслуживания;
- уровень безопасности грузовых железнодорожных перевозок.

Положения ЕСТП определяют сквозные принципы технологии планирования, нормирования, управления и мониторинга перевозочного процесса для всех его участников и включают в себя следующие аспекты деятельности:

- взаимодействие транспортного холдинга с потребителями и на основе интеграции планирования ими перевозок грузов на календарный месяц (внутреннее сетевое взаимодействие);
- взаимодействие Центральной и региональных дирекций управления движением с функциональными подразделениями, обеспечивающими выполнение грузовых железнодорожных перевозок (внешнее взаимодействие);
- влияние показателей внутреннего и внешнего взаимодействия на целевые стратегические показатели ЦДИ.

Модель взаимодействия перечисленных аспектов деятельности ЦДИ в рамках ЕСТП представлена на рис. 1, из которого видно, что достижение целевых стратегических показателей зависит как от внутренней эффективности технологических процессов, так и от степени удовлетворенности потребителей перевозочным процессом.

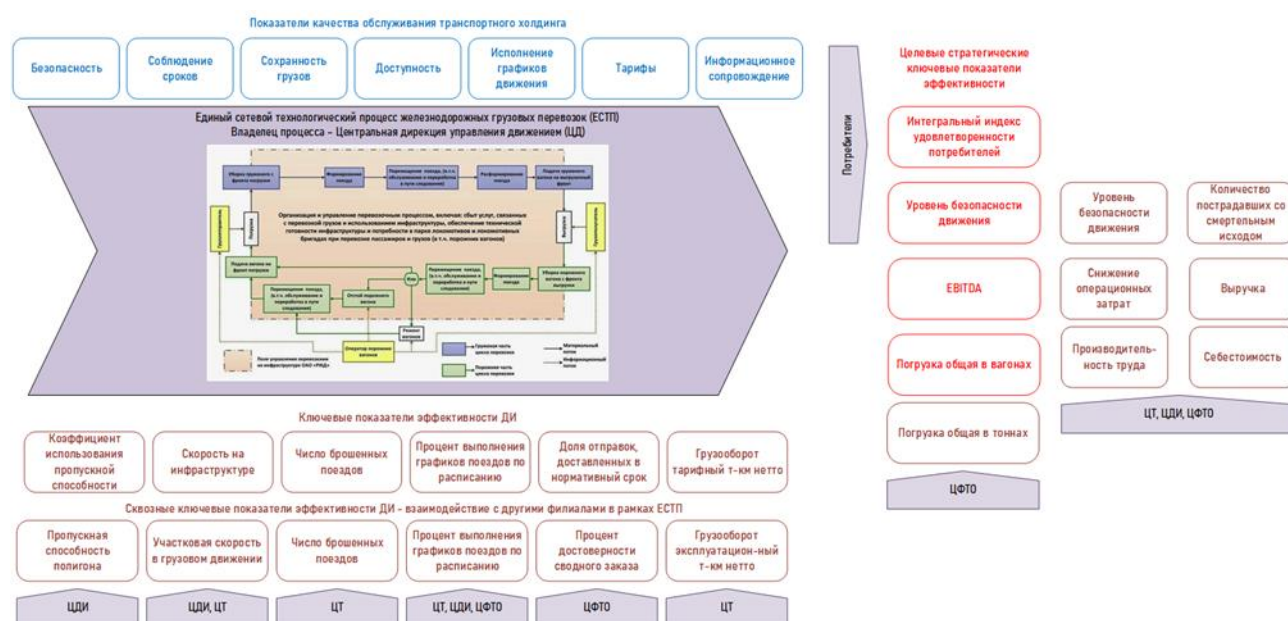


Рис. 1. Модель взаимодействия показателей качества обслуживания и ключевых показателей эффективности в рамках Единого сетевого технологического процесса грузовых перевозок

Таким образом, в качестве двух ключевых задач, решаемых в рамках ЕСТП в ходе достижения целевых стратегических показателей, можно выделить:

- 1 Организацию взаимодействия функциональных и региональных подразделений транспортного холдинга в рамках реализации сквозных технологических процессов – устранение противоречий, возникающих вследствие нарушения принципов единоначалия.
- 2 Организацию взаимодействия с потребителями путем комплексной оценки качества обслуживания в процессе грузовых железнодорожных перевозок.

Для решения обеих этих ключевых задач можно использовать Gap-модель Зейтгамла (Gap-model Zeithaml – «модель разрывов»), позволяющую выявить и проанализировать причины несоответствия между показателями выполнения бизнес-процесса, фактическим качеством выполняемых перевозок и ожиданиями клиентов [5].

Фокусным звеном сквозного технологического процесса, регламентируемого ЕСТП, выступает

Дирекция управления движением (ДИ), так как именно она выполняет основной функционал железнодорожных грузовых перевозок. На рис. 2–3 представлена Гар-модель ключевых показателей эффективности функциональных подразделений транспортного холдинга исходя из двух основных приоритетов фокусного звена ДИ, сформулированных в ЕСТП [3]: «обеспечения доставки» и «обеспечения доставки по графику».

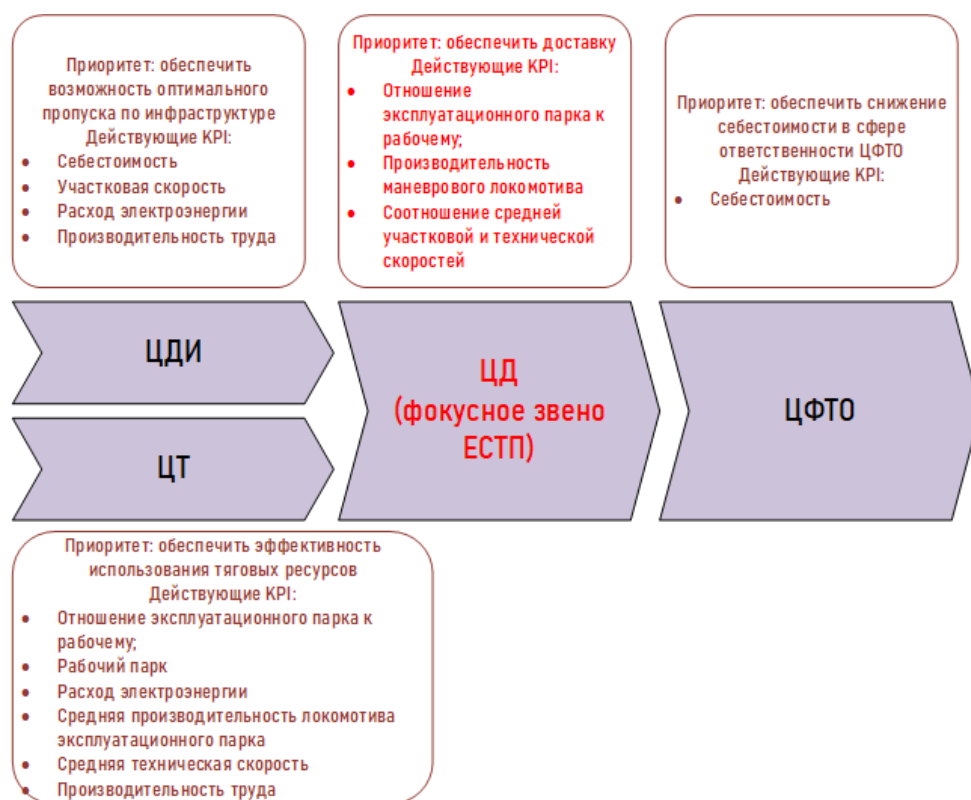


Рис. 2. Гар-модель ключевых показателей эффективности по приоритету «Обеспечить доставку»

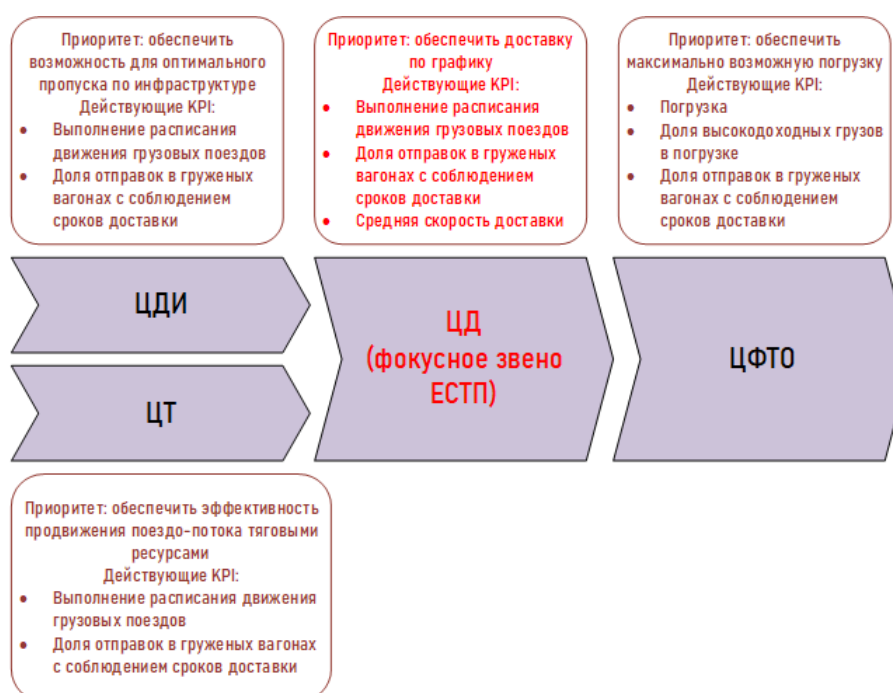


Рис. 3. Гар-модель ключевых показателей эффективности по приоритету «Обеспечить доставку по графику»

Расхождения («разрывы») в ключевых показателях эффективности функциональных подразделений, участвующих в ЕСТП, возникают из-за различий в их целях, приоритетах и операционных задачах. Эти «разрывы» снижают общую эффективность системы и отрицательно влияют на выполнение стратегических целей и их ключевых показателей.

«Разрывы», возникающие в ЕСТП, – естественное следствие сложности сквозного процесса. Основная задача – не полное устранение противоречий, а управление ими путем интеграции данных, балансировки целей и усиления горизонтальных связей между функциональными подразделениями. Такой подход позволит повысить надежность, скорость и экономическую эффективность железнодорожных перевозок в масштабах сети.

Достижение стратегических целевых показателей ЕСТП, в том числе финансово-стоимостных, таких как EBITDA, также зависит от спроса на рынке транспортно-логистических услуг, а значит и от степени удовлетворенности потребителей железнодорожных грузовых перевозок, оцениваемой системой показателей качества транспортной услуги. Взаимодействие показателей качества транспортного обслуживания и ключевых показателей эффективности ЕСТП формирует систему обратной связи, в которой качество услуг напрямую влияет на достижение стратегических и операционных целей транспортного холдинга.

Система ключевых показателей эффективности (KPI) должна содержать показатели достижения стратегических целей и поддерживающие её оперативные показатели системы бизнес-процессов. Показатели эффективности и результативности для каждой компании индивидуальны. В зависимости от вида деятельности, масштаба производства, конкурентной среды и иных факторов, руководство компании может ставить перед собой различные стратегические цели, как например: повышение эффективности деятельности компании; увеличение потенциала и рост бизнеса; создание/укрепление международной репутации и инвестиционной привлекательности компании; повышение эффективности.

Результативность корпоративного управления, основанного на принципах менеджмента качества, находит нормативное обоснование в положениях Национального стандарта РФ ГОСТ Р ИСО 9000-2011, регламентирующего требования к системам качества [6]. Метрическая система ключевых показателей эффективности призвана обеспечить интеграцию стратегических целей транспортного холдинга с операционными показателями, характерными для ее бизнес-процессов. Такие показатели должны не только отражать степень достижения целей, но и выступать инструментом их оперативного регулирования. При этом необходимо так формировать метрики на уровнях управления, чтобы учитывать их функциональные особенности: топ-менеджмент, структурные подразделения и исполнители получают уникальные наборы KPI, соответствующие их функциональным ролям и зонам ответственности.

Измерение качества транспортно-логистических услуг основывается на критериях, используемых потребителям. При этом потребитель, комплексно оценивая качество транспортного обслуживания, сравнивает фактические значения критериев качества с их ожидаемыми значениями, и, если эти ожидания совпадают, качество признается удовлетворительным. Каждый критерий качества транспортного обслуживания характеризуется двумя показателями: первый определяется путем измерения ожиданий потребителя; второй – восприятием обслуживания по конкретному критерию. Разница между ожидаемым и воспринимаемым показателями качества создает так называемый «разрыв» (Gap) и позволяет оценивать уровень удовлетворенности потребителя по каждому из выбранных критериев или по их комплексу.

Распространенная в настоящее время методика оценки качества транспортного обслуживания потребителей грузовых железнодорожных перевозок предполагает определение «разрывов» между ожидаемыми и фактическими показателями, определяемыми в том числе субъективно, на основе интервьюирования и опросов, а также выявления причин возникновения этих «разрывов».

Gap-модель показателей взаимодействия функциональных подразделений ЕСТП и показателей качества транспортного обслуживания, представленная на рис. 4, иллюстрирует возможные причины неудовлетворенности потребителей конечной транспортно-логистической услугой – грузовой перевозкой. Подробный анализ содержания и причин возникновения выявленных «разрывов» представлен в таблице.

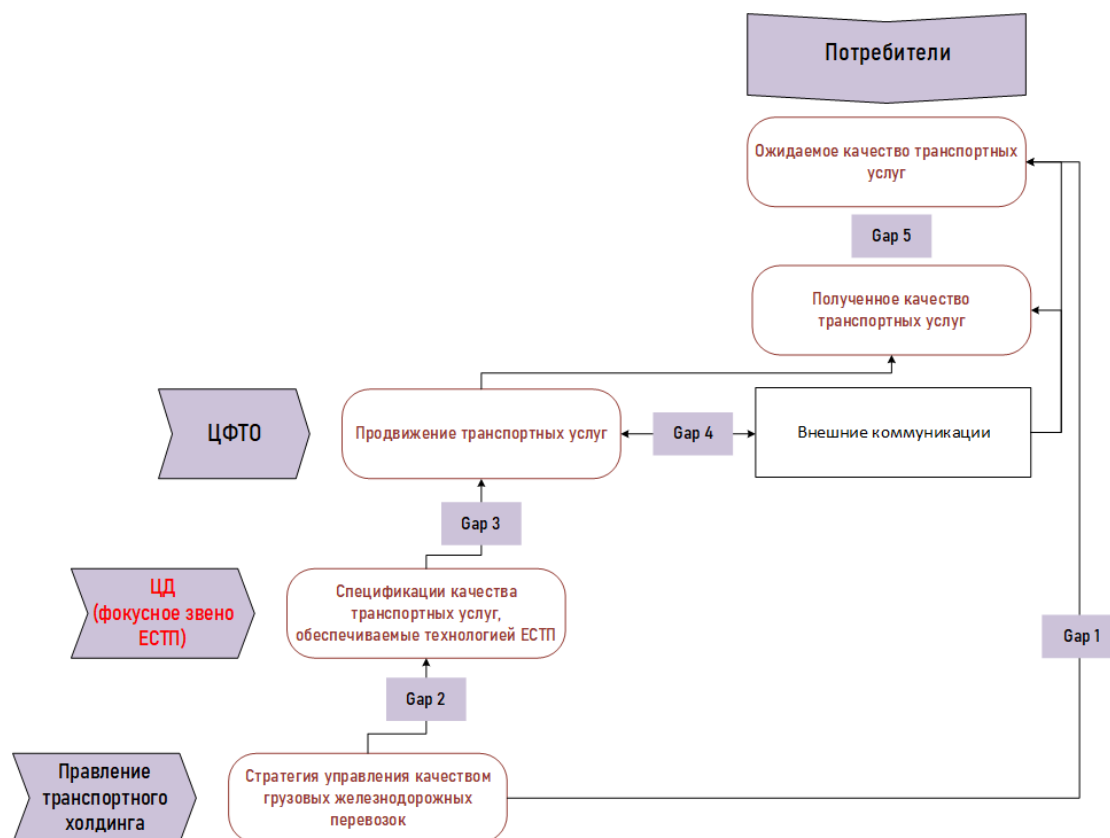


Рис. 4. Гар-модель показателей взаимодействия функциональных подразделений ЕСТП и показателей качества транспортного обслуживания потребителей

Структура Гар-модели показателей взаимодействия функциональных подразделений ЕСТП и показателей качества транспортного обслуживания потребителей

«Разрыв» (Gap)	Причина	Решение
1	2	3
Гар 1. «Разрыв» между ожиданиями клиентов и их восприятием высшим менеджментом	Недостаточный анализ рынка: клиенты требуют усиления цифровизации отслеживания грузов, в то время как транспортный холдинг уделяет большое внимание инфраструктурным проектам; слабая обратная связь с малыми и средними грузоотправителями; ориентация на государственные стандарты, а не на рыночные запросы	Внедрить систему регулярных опросов грузоотправителей и интеграцию их требований в стандарты; разрабатывать и совершенствовать цифровые сервисы
Гар 2. «Разрыв» между восприятием ожиданий и стандартами обслуживания	Жесткость ЕСТП, ограничивающая гибкость; устаревшие нормативы; недостаток ресурсов для внедрения современных технологий (цифровые платформы, IoT для мониторинга грузов)	Оптимизировать ЕСТП за счет ИИ-алгоритмов для прогнозирования загрузки сети; создать единую CRM-систему для работы с клиентами
Гар 3. «Разрыв» между стандартами и фактическим обслуживанием	Износ инфраструктуры; дефицит локомотивов и вагонов в пиковые периоды; человеческий фактор: ошибки диспетчеров, недостаточная квалификация персонала	Модернизировать инфраструктуру

Окончание таблицы

1	2	3
Гар 4. «Разрыв» между обслуживанием и внешними коммуникациями	Маркетинговые обещания о «клиентоориентированности» не подкреплены IT-решениями для клиентов. Противоречия между отделами: коммерческий департамент обещает индивидуальные тарифы, но технические службы не могут их обеспечить	Синхронизировать маркетинговые коммуникации с техническими возможностями; внедрить программу лояльности для крупных грузоотправителей
Гар 5. Итоговый «разрыв» между ожиданиями и восприятием клиентами	Последствия: снижение доли транспортного холдинга на рынке грузоперевозок; рост репутационных рисков: негативные отзывы логистических компаний	Развивать мультимодальные перевозки для повышения комплексности обслуживания

Для повышения интегрального индекса удовлетворенности потребителей транспортного холдинга необходимо создать систему критериев и метрик, позволяющих наиболее комплексно и объективно оценить качество транспортного обслуживания, и управлять этими параметрами таким образом, чтобы свести к минимуму «разрывы» между ожидаемым и фактическим уровнями оценки. Проблема заключается в том, что большинство критериев оценки качества обслуживания для потребителя сложно измерить количественно, то есть получить формализованную оценку. Решение этой проблемы видится в интеллектуальной «оцифровке» опросов и анкет потребителей.

Основным фактором успешного развития любой организации в условиях конкурентной среды является способность адаптировать параметры внутренних технологических процессов так, чтобы максимально учитывать постоянно изменяющиеся и ужесточающиеся требования потребителей [7]. Особую актуальность данный тезис приобретает для железнодорожного транспорта – сложной производственной системы, обладающей высокой стратегической значимостью для национальной экономики. В условиях политических и экономических кризисов усиливается необходимость каскадирования стратегически приоритетов на все уровни управления, а это, в свою очередь, требует внедрения процессно-ориентированного подхода посредством совместной реализации двух инструментов:

- системы менеджмента качества (СМК), обеспечивающей стандартизацию процессов и соответствие транспортно-логистических услуг установленным требованиям;
- процессного подхода к управлению, который определяют взаимосвязь между стратегическими целями и операциями на местах через метрическую систему KPI.

Комплексное использование систем менеджмента качества и ключевых показателей эффективности позволит формализовать влияние каждого функционального и регионального подразделения транспортного холдинга на достижение целевых стратегических показателей; обеспечить прозрачность оценки эффективности бизнес-процессов; создать механизм обратной связи для своевременной корректировки технологии грузовых железнодорожных перевозок в оперативной деятельности и стратегии на верхнем уровне принятия решения, а также эффективно эксплуатировать транспортные машины на протяжении всего жизненного цикла.

Таким образом, метрическая система KPI выступает связующим звеном между долгосрочным стратегическим планированием и тактическим управлением, обеспечивая синергию качества, эффективности и экономической устойчивости транспортного комплекса Российской Федерации, включающего как исследуемый холдинг, так и предприятия транспортного машиностроения.

Список литературы

- 1 **Зобнин, В. Л.** Единый сетевой технологический процесс железнодорожных грузовых перевозок / В. Л. Зобнин, В. В. Панин, Е. С. Прокофьева // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 3. – С. 8–10. – ISSN 0044-4448.
- 2 **Мачерет, Д. А.** Новые возможности повышения эффективности в сфере железнодорожного транспорта в условиях цифровой трансформации отрасли / Д. А. Мачерет //

References

- 1 **Zobnin, V. L.** Single network technological process of railway freight transportation / V. L. Zobnin, V. V. Panin, E. S. Prokofieva // Railway transport. – 2020. – No. 3. – P. 8–10. – ISSN 0044-4448.
- 2 **Macheret, D. A.** New Opportunities for Increasing Efficiency in the Railway Transport Sector in the Context of Digital Transformation of the Industry / D. A. Macheret // Digital Transformation in the

Цифровая трансформация в экономике транспортного комплекса. Сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции. – Москва : РУТ (МИИТ), 2025. – С. 169–173. –

DOI 10.12737/conferencearticle_678931080c6591.42165199.

3 О Едином сетевом технологическом процессе железнодорожных грузовых перевозок. Распоряжение ОАО «РЖД» № 2786р от 28 декабря 2012 г. – URL: <https://base.garant.ru/70442514/> (дата обращения 24.04.2025).

4 Gerus, V. L. Application of the process approach as a methodological basis for formation of a unified network technological process of railway transport / V. L. Gerus, N. F. Sirina // International scientific and practical conference “Railway transport and technologies (RTT–2021): collection of conference materials”. – USA : AIP PUBLISHING, 2023. – Volume 2624, Issue 1. – ISSN 0094-243X ; eISSN 1551-7616.

5 Филиппская, Н. Ю. Анализ Гар-модели Зейтгамла для оценки степени расхождения в параметрах качества логистического сервиса / Н. Ю. Филиппская, В. С. Заряева // Экономика устойчивого развития. – 2016. – № 3 (27). – С. 367–371. – ISSN 2079-9136.

6 Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 9000-2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – URL: <https://rustestm.ru/wp-content/uploads/2021/10/gost-iso-9000-2011-sistemy-menedzhmenta-kachestva-osnovnye-polozeniya-i-slovar.pdf> (дата обращения 24.04.2025).

7 Сирина, Н. Ф. Анализ взаимодействия ключевых показателей эффективности с целевыми результатами деятельности компании / Н. Ф. Сирина, В. Л. Герус // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 57–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_57.

8 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения: 17.04.2025).

9 Техничко-технологические модели управления перевозочным процессом / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Максимова, Е. А. Лаханкин // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 7. – С. 23–27. – ISSN 0044-4448.

Economy of the Transport Complex. Collection of Scientific Papers of the 6th International Scientific and Practical Conference. – Moscow : RUT (MIIT), 2025. – P. 169–173. – DOI 10.12737/conferencearticle_678931080c6591.42165199.

3 About the Single network technological process of railway freight transportation. Order of JSC Russian Railways No. 2786r dated December 28, 2012. – URL: <https://base.garant.ru/70442514/> (date of access: 04/24/2025).

4 Gerus, V. L. Application of the process approach as a methodological basis for formation of a unified network technological process of railway transport / V. L. Gerus, N. F. Sirina // International scientific and practical conference “Railway transport and technologies (RTT–2021): collection of conference materials”. – USA : AIP PUBLISHING, 2023. – Volume 2624, Issue 1. – ISSN 0094-243X ; eISSN 1551-7616.

5 Filippetskaya, N. Y. Analysis of the Zeitgaml Gap model for assessing the degree of discrepancy in the quality parameters of logistics services / N. Y. Filippetskaya, V. S. Zaryeva // Economics of Sustainable Development. – 2016. – No. 3 (27). – P. 367–371. – ISSN 2079-9136.

6 The national standard of the Russian Federation GOST R ISO 9000-2011. Quality management systems. Basic provisions and vocabulary. – URL: <https://rustestm.ru/wp-content/uploads/2021/10/gost-iso-9000-2011-sistemy-menedzhmenta-kachestva-osnovnye-polozeniya-i-slovar.pdf> (date of access: 04/24/2025).

7 Sirina, N. F. Analysis of the interaction of key performance indicators with the target results of the company's activities / N. F. Sirina, V. L. Gerus // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 57–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_57.

8 Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 : Order of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021. No. 3363-R. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (date of access: 04/17/2025).

9 Technical and technological models of transportation process management / A. F. Borodin, V. V. Panin, E. S. Maksimova, E. A. Lakhankin // Railway transport. – 2021. – No. 7. – P. 23–27. – ISSN 0044-4448.

10 Прокофьева, Е. С. Единые принципы организации эксплуатационной работы железнодорожных перевозок / Е. С. Прокофьева, В. В. Панин // Мир транспорта. – 2019. – № 7. – С. 186–198. – ISSN 1992-3252.

10 Prokofieva, E. S. Unified principles for organizing operational work in rail transportation / E. S. Prokofieva, V. V. Panin // World of Transport and Transportation Journal. – 2019. – No. 7. – P. 186–198. – ISSN 1992-3252.

V. L. Gerus, A. S. Misharin

MODELING THE INTERACTION OF SERVICE QUALITY INDICATORS AND KEY PERFORMANCE INDICATORS IN A SINGLE NETWORK TECHNOLOGICAL PROCESS OF A TRANSPORT HOLDING

Abstract. The article is devoted to modeling the interaction of service quality indicators and key performance indicators (KPIs) within the framework of a Single Network Technological Process (ESTP) of freight rail transportation. The authors consider a systematic approach to the management of a transport holding company, focusing on eliminating contradictions between functional divisions units and increasing customer satisfaction. To analyze the identified "gaps", the Zeithaml Gap model is used, which allows assessing discrepancies between consumer expectations and the actual quality of services. The article suggests solutions to minimize these gaps, including the optimization of the ESTP, the introduction of digital technologies and the modernization of infrastructure. Special attention is paid to the integration of the holding's strategic goals with operational KPIs, which contributes to increasing economic sustainability and competitiveness. The results of the study can be useful for transport companies seeking to improve the quality of service and management efficiency.

Keywords: transport holding, service quality, KPI, Gap model, railway transportation, system approach, railway transport development strategy, transportation process management methodologies, transportation process efficiency, balanced scorecard, key performance indicators, Single Network Technological Process.

For citation: Gerus, V. L. Modeling the interaction of service quality indicators and key performance indicators in a single network technological process of a transport holding / V. L. Gerus, A. S. Misharin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 171–178. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_171.

Сведения об авторах

Герус Владимир Леонидович

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: vlgerus10@gmail.com

Мишарин Александр Сергеевич

АО «Синара – Транспортные машины»,
председатель совета директоров,
e-mail: vlgerus10@gmail.com

Information about the authors

Gerus Vladimir Leonidovich

Ural State University of Railway Transport (USURT),
Chair "Operational Work Management",
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: vlgerus10@gmail.com

Misharin Alexandr Sergeevitch

JSC "Sinara – Transport Machines",
Chairman of the Board of Directors,
e-mail: vlgerus10@gmail.com

К. А. Годованый

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУТСОРСИНГ ОПЕРАТОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРОФИЦИТА ВАГОННОГО ПАРКА НА СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Настоящая статья посвящена исследованию механизмов повышения эффективности логистической деятельности операторских компаний в условиях профицита вагонного парка на сети железных дорог. Обоснована необходимость трансформации существующих моделей взаимодействия между участниками перевозочного процесса, в том числе за счёт внедрения технологического аутсорсинга. Под технологическим аутсорсингом понимается передача промышленными предприятиями логистических активов (в частности, путей необщего пользования) в управление операторским компаниям, в том числе и для организации временного размещения порожнего подвижного состава. Представлен расчет вместимости таких путей и выделены группы путей, пригодные для использования в целях отстоя вагонов. Отмечены преимущества подобного подхода для всех сторон: снижение инфраструктурной нагрузки для перевозчика, оптимизация затрат для грузоотправителя и расширение функциональных возможностей для оператора. Выводы подтверждают, что технологический аутсорсинг способен стать инструментом стабилизации перевозочного процесса, повышения адаптивности системы логистики и рационального распределения ресурсов в условиях волатильности транспортного спроса.

Ключевые слова: технологический аутсорсинг, порожний вагон, оператор, пути необщего пользования, профицит вагонного парка, «отстой» вагонов.

Для цитирования: Годованый, К. А. Технологический аутсорсинг операторской деятельности в условиях профицита вагонного парка на сети железных дорог / К. А. Годованый // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 179–187. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_179.

Введение

На предприятиях всех отраслей экономики вопрос эффективности использования основных фондов является ключевым и актуальным в системе оперативного и среднесрочного планирования и управления. Колебания спроса на мощности, связанные изменениями конъюнктуры рынка, требуют решения вопроса по привлечению дополнительных мощностей или решения вопроса организации и управления свободными мощностями. Особенно остро этот вопрос возникает в сфере услуг, отличающейся наибольшей волатильностью. Логистические и операторские услуги находятся в этой области и требуют внимания к эффективности (производительности) использования мощностей (парка транспортных средств).

Следует отметить, что волатильность операторского рынка влияет не только на конкретного участника, но и на весь перевозочный процесс, определяя ценовую нагрузку на транспортно-логистические услуги в экономике. В этой связи вопросы исследования и повышения эффективности логистических услуг на рынке операторской деятельности являются перманентно актуальными, а поиск новых схем повышения эффективности работы рынка в целом является задачей транспортной (логистической) науки.

В работе исследуются вопросы развития технологического аутсорсинга логистической деятельности операторской деятельности, которая в целом может дать положительный синергетический эффект для многоагентного рынка железнодорожных перевозок.

Исследование вопроса

Выделение вагонной составляющей из тарифа дало возможность участникам транспортного рынка приобретать вагоны для сокращения транспортных расходов и обеспечения стабильности перевозок для клиентов. Изначально одной из задач реформы было обновление морально устаревшего подвижного состава, что в целом и произошло, когда крупные промышленные предприятия и экспедиторы для обеспечения качественных и безопасных перевозок стали приобретать новый подвижной состав в собственность. При этом возникновение нового рынка транспортных услуг привлекло новых участников и дало новые возможности старым, что привело к росту числа вагонов на сети железных

дорог. Анализ динамики парка грузовых вагонов указывает на увеличение числа вагонов на 69,2 % в 2024-м по сравнению с 2003 годом (рис. 1).

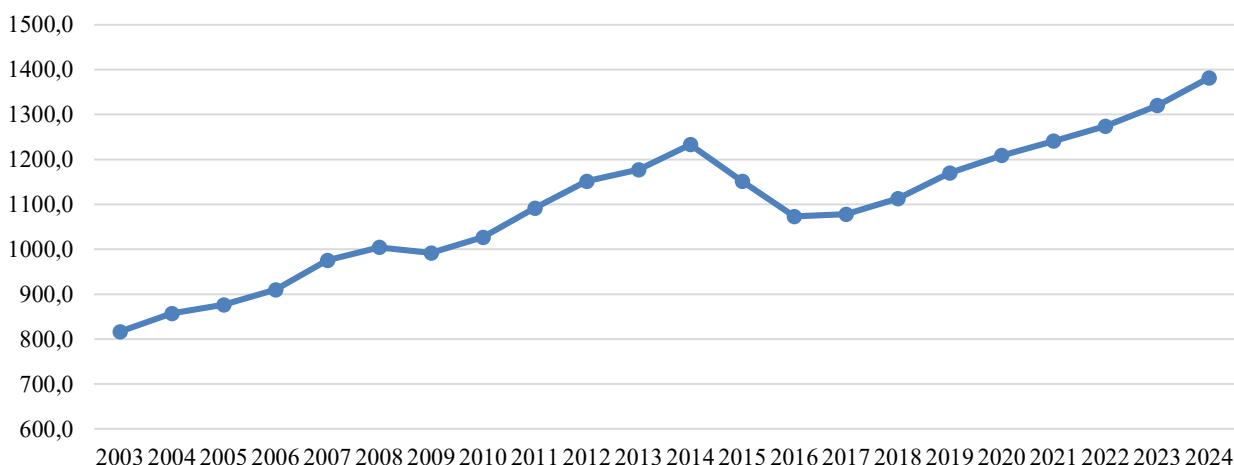


Рис. 1. Динамика парка грузовых вагонов, тыс. ваг.

При этом протяженность путей общего пользования для осуществления перевозок и отстоя порожних вагонов не изменилась и осталась на уровне 87 тыс. км. Постоянный рост числа вагонов усиливает нагрузку на инфраструктуру железных дорог общего пользования и осложняет организацию управления перевозочным процессом, что отражается на ключевых показателях работы сети.

Анализ погрузки на сети железных дорог за последние четыре года показывает ее последовательное снижение (рис. 2). Снижение по отношению к 2023 году составляет 4,3 %, а по сравнению с 2021 годом уже 8 %, что в абсолютных значениях составляет более 100 тыс. тонн грузов, которые были отправлены другими видами транспорта либо не были отправлены вовсе.

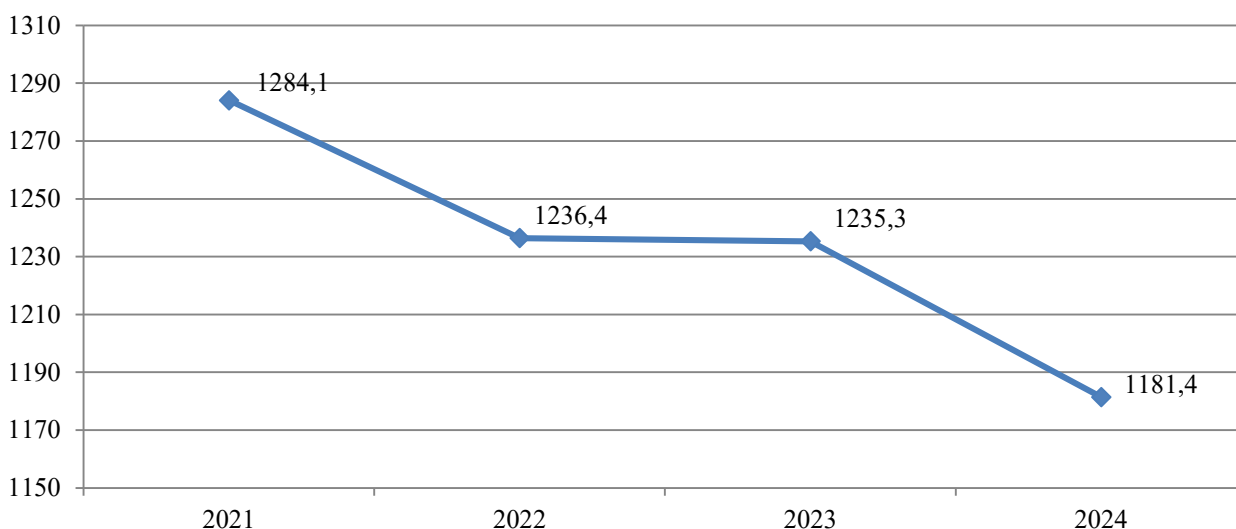


Рис. 2. Динамика погрузки грузов по сети РЖД за 2021–2024 гг., тыс. т

Анализ структуры погрузки по категориям перевозимых грузов показал, что в 2024 году более 80 % всей погрузки приходится на семь позиций: каменный уголь, нефтяные грузы, строительные грузы, руда железная и марганцевая, черные металлы (включая лом), химические и минеральные удобрения, грузы в контейнерах (рис. 3).



Рис. 3. Структура погрузки по категориям грузов за 2024 год

Поэлементный анализ динамики погрузки показал, что общее снижение связано с тем, что ключевые категории имеют отрицательную динамику погрузки (рис. 4), за исключением химических и минеральных удобрений, спрос на которые в 2024 году значительно вырос на мировом рынке, при этом для реализации открыт ряд альтернативных направлений сбыта.

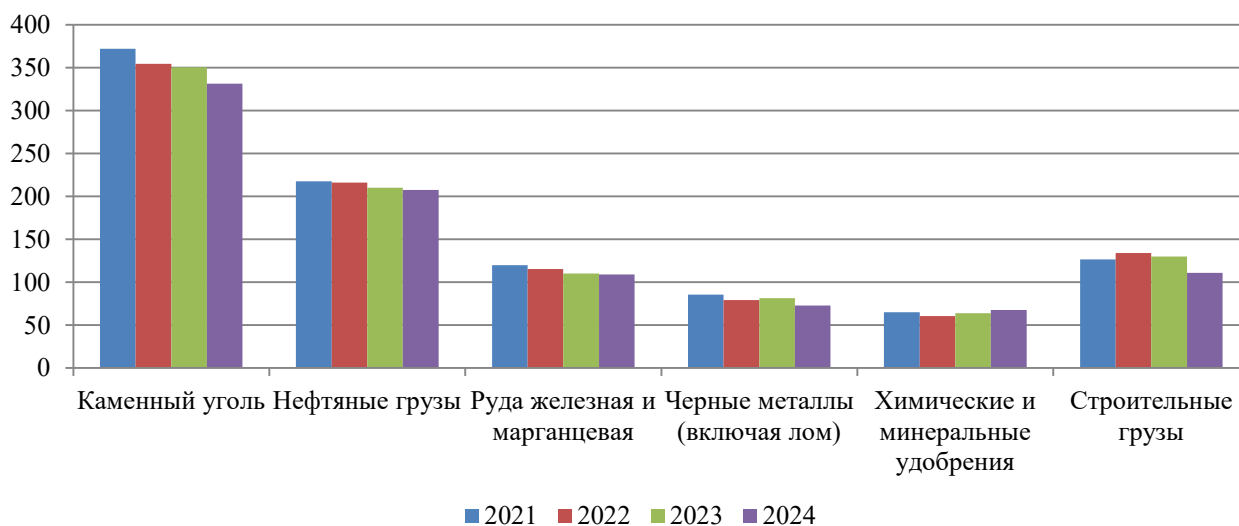


Рис. 4. Динамика погрузки по ключевым категориям грузов, тыс. т

Среди причин снижения погрузки можно выделить причины как экономико-политического характера, которые зачастую определяют направления грузопотоков, так и технико-технологические, которые обеспечивают движение грузопотоков (таблица).

Структура причин снижения погрузки на сети

Грузы	Причины	
	Экономические	Технические
Каменный уголь	Снижение мировых цен	Ограничения пропускной и провозной способности на целевых направлениях
Нефтяные грузы	Запрет на экспорт	Техническое обслуживание и ремонт НПЗ
Руда железная и марганцевая	Снижение спроса, санкционные ограничения	Ограничения пропускной и провозной способности на целевых направлениях
Черные металлы	Запрет на экспорт	Ограничения пропускной и провозной способности на целевых направлениях
Строительные грузы	Завершение строительства крупных государственных проектов	Отказ в согласовании заявок на определенные категории грузов, нехватка локомотивов и рост оборота вагонов, переход на автомобильный транспорт

Ещё одним качественным показателем работы железнодорожного транспорта является оборот вагона. Этот показатель непосредственно связан с эффективностью деятельности операторских компаний. За последние 5 лет наблюдается увеличение оборота с 407,2 ч в 2020 году до 497,9 ч в 2024 году (рис. 5). Поэлементное рассмотрение оборота позволяет определить, что ключевыми (значимыми) в структуре оборота являются «время под грузовыми операциями» и «время на технических станциях». Увеличение «времени под грузовыми операциями» наблюдается в основном за 2024 год и составляет 25,3 ч, а увеличение «времени на технических станциях» относительно 2020 году наблюдается скачкообразно в 2022 и 2024 годах на 26,2 и 18,8 ч соответственно.

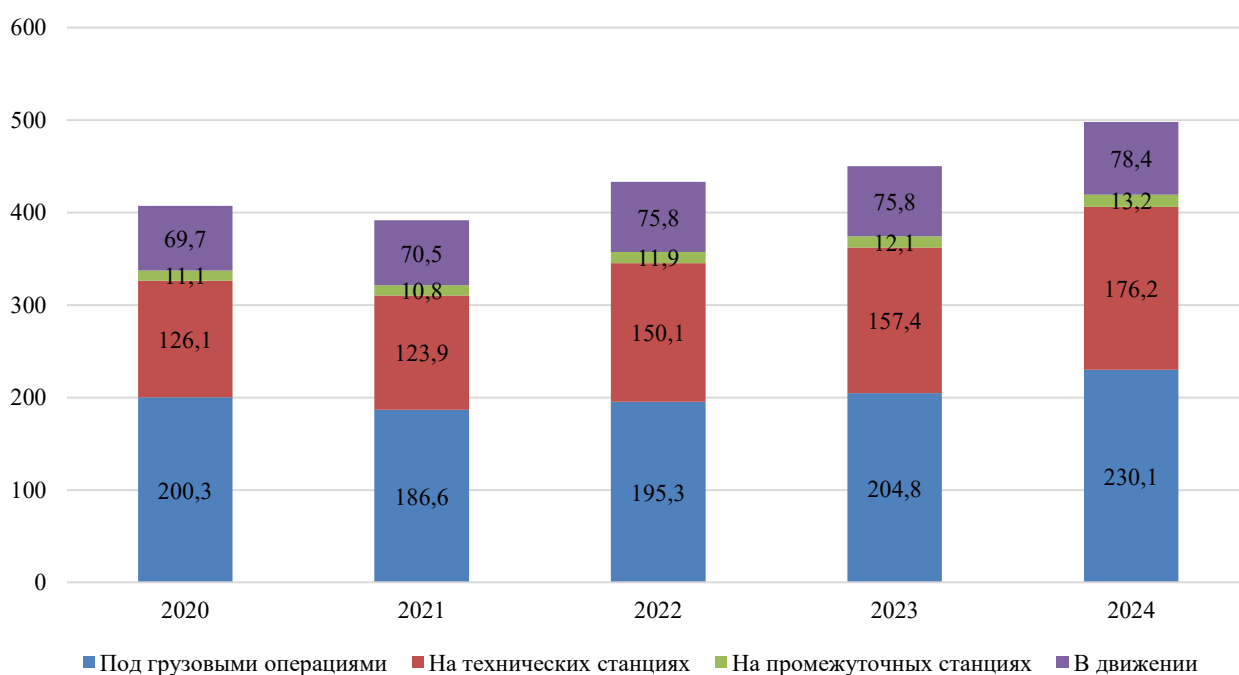


Рис. 5. Динамика оборота грузового вагона по элементам, ч

Рост времени простоя в структуре оборота зависит от ряда факторов:

- неэффективное управление вагонным парком операторскими компаниями после выгрузки;
- несоблюдение технологического времени погрузочно-разгрузочных работ грузовладельцем;
- несоответствие мощности технического обеспечения перевозчика потребностям клиента.

Несоответствие может выражаться как в отсутствии тягового подвижного состава (или бригад, обслуживающих его), так и в ограничениях инфраструктуры перевозчика. В настоящий момент ограничения связаны с профицитом порожнего подвижного состава, который занимает (блокирует) пути станций, которые необходимы для выполнения основных операций. А несогласованное перемещение частного подвижного состава запрещено.

Таким образом, наблюдаемые изменения в экономике отрасли требуют реализации определенных моделей трансформации деятельности участников производственно-транспортных процессов, в том числе и логистических операторов, для которых вагонный парк в настоящий момент является ключевым, а в некоторых ситуациях и единственным средством реализации логистических функций. В условиях внешних и внутренних изменений подход внедрения инноваций может включать как фондоемкие решения, которые предполагают изменение структуры активов компании или номенклатуры услуг, так и малозатратные, которые позволяют оптимизировать технологию управления логистическими процессами [4, 5]. Возможна комбинированная реализация подходов для достижения синергетического эффекта.

Технологический аутсорсинг промышленных предприятий как модель формирования новых технологических цепочек взаимодействия «промышленное предприятие – оператор – сетевой перевозчик» позволит снизить нагрузку на инфраструктуру общего пользования, а также расширить ассортимент предлагаемых услуг и клиентскую базу операторских компаний [6, 7].

В условиях профицита порожнего подвижного состава значение емкости инфраструктуры железнодорожной сети значительно выросло. При этом всю сеть можно разделить на пути общего и необщего пользования. На первых обеспечивается реализация основных функций сетевого перевозчика, таких как перемещение грузов и станционные операции по обработке вагонов до и после перевозки, а на вторых обеспечивается транспортная работа для производственного цикла промышленных предприятий. На наш взгляд, в настоящее время реализация функций на станциях сети затрудняется в виду наличия большого количества порожнего подвижного состава на путях, который невозможно перемещать без разрешения собственника [9, 10].

Технологический аутсорсинг предполагает передачу логистических активов промышленного предприятия (пути необщего пользования и прилегающие строения) в управление операторской компании, с целью сокращения логистических издержек [1]. Целесообразность применения аутсорсинга для промышленных предприятий определяется неравенством

$$Z_{\text{п}} \geq Z_0,$$

где $Z_{\text{п}}$ – затраты промышленного предприятия по реализации логистических функций,

Z_0 – затраты на оплату услуг логистического оператора.

Сокращение эксплуатационных расходов для операторской компании возможно за счет современных технологий и оборудования, высококвалифицированного персонала, а также за счет эффекта масштаба [2, 3].

С получением права управления логистическими активами промышленного предприятия операторская компания сможет оценить полную (конструкционную) ($W_{\text{ппп}}$) и потребную (W_1) вместимость путей необщего пользования, необходимую для реализации основной деятельности (погрузка-выгрузка, маневровая работа и выставочные пути) предприятия. Разница ($W_2 = W_{\text{ппп}} - W_1$) будет невостребованной вместимостью, которая может быть использована как пути временного размещения (отстоя) порожнего подвижного состава, что открывает для операторских компаний новый функционал использования клиентских логистических активов – выступить в роли посредника между собственниками подвижного состава и сетевым перевозчиком (см. рис. 6).

Добавление возможности использования невостребованной вместимости для временного хранения порожнего подвижного состава повысит эффективность и экономическую привлекательность технологического аутсорсинга.

Для оценки возможности использования путей необщего пользования в качестве мест временного размещения порожнего подвижного состава стоит поэлементно изучить типологию путей необщего пользования. Во-первых, согласно Уставу ЖДТ «...железнодорожные пути необщего пользования – железнодорожные подъездные пути, примыкающие непосредственно или через другие железнодорожные подъездные пути к железнодорожным путям общего пользования и предназначенные для обслуживания определенных пользователей услугами железнодорожного транспорта на условиях договоров или выполнения работ для собственных нужд» [8]. Из данного определения можно понять, что существуют соединительные пути необщего пользования, на которых осуществляется перемещение подвижного состава на (с) подъездные пути промышленных предприятий. Такие пути использовать для размещения порожнего подвижного состава возможно в том случае, если пути промышленного предприятия закрыты для грузовых операций, но при этом их техническое состояние способно обеспечивать технические операции с подвижным составом. Вторая группа путей по функциональному

признаку – это пути необщего пользования промышленных предприятий. Основной задачей существования этих путей является обслуживание транспортных нужд промышленного предприятия:

- внутрипроизводственное перемещение грузопотоков;
- обслуживание внешних входных и выходных грузопотоков.

Внутренние грузопотоки являются частью технологического производственного процесса, поэтому размещение на путях этой категории «внешних» («чужих») элементов, может привести к замедлению или остановке производственных циклов. Поэтому основное внимание стоит уделить путям обслуживания внешних грузопотоков. Условно их можно разделить на зону погрузочно-разгрузочных работ, зону маневров и выставочные пути (при наличии).

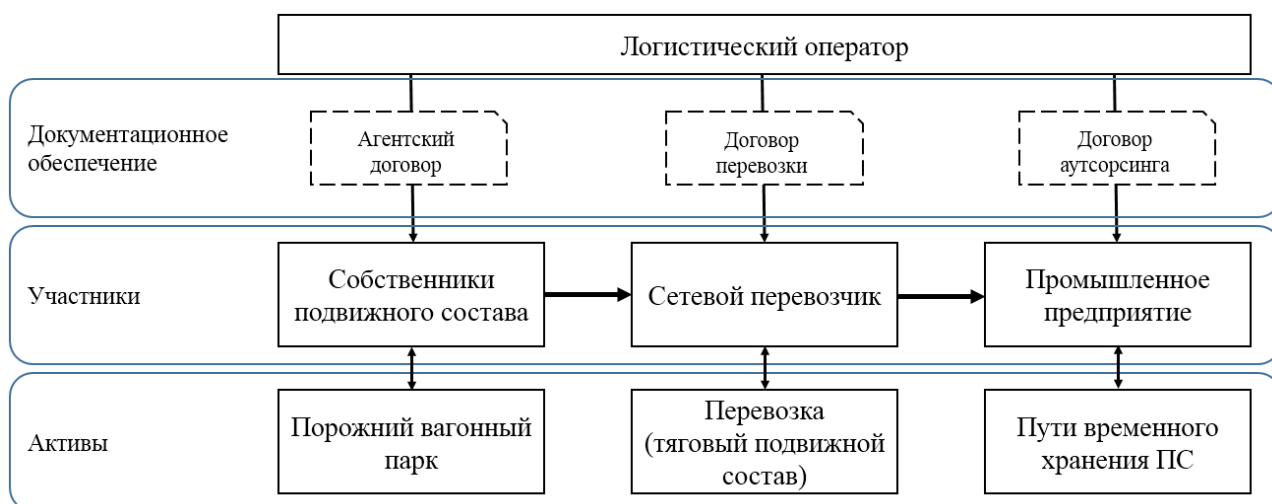


Рис. 6. Схема организации временного размещения порожних вагонов

Расчет потребной (полезной) длины пути для реализации основной деятельности опирается на мощность и протяженность погрузочно-выгрузочного фронта. Согласно уставу железнодорожного транспорта, норма подачи вагонов на пути необщего пользования определяется по вместимости погрузочно-выгрузочного фронта промышленного предприятия: «...количество одновременно подаваемых вагонов на железнодорожный путь необщего пользования определяется по полезной длине путей, на которых расположены места погрузки, выгрузки грузов» [8]. При этом, если общая вместимость путей позволяет осуществлять подачи, превышающие вместимость путей погрузочно-выгрузочного фронта, то размер единовременной подачи определяется «в договоре на эксплуатацию железнодорожного пути необщего пользования или на подачу и уборку вагонов» [8].

Таким образом, вместимость пригодных для «отстоя» путей можно определить как

$$W_2 = \frac{\Delta L}{l_{\text{ваг}}},$$

где ΔL – протяженность путей необщего пользования, не вовлеченных в маневровую деятельность, м;
 $l_{\text{ваг}}$ – средняя длина вагона, м.

$$\Delta L = L_{\text{общ}} - L_{\text{гр.фр.}} - L_{\text{соед}},$$

где $L_{\text{общ}}$ – общая протяженность путей необщего пользования согласно техническому паспорту подъездного пути, м;

$L_{\text{гр.фр.}}$ – длина путей грузового фронта, м;

$L_{\text{соед}}$ – длина участков путей необщего пользования соединяющих станцию примыкания и сами пути промышленного предприятия (расстояние от стрелки примыкания до знака «граница подъездного пути»), м.

$$L_{\text{гр.фр.}} = \frac{Q_{\text{сут}}}{q_{\text{ст}}} \cdot l_{\text{ваг}} + 2 \cdot l_{\text{лок}} + 10,$$

где $Q_{\text{сут}}$ – суточный объем погрузки, тонн;
 $q_{\text{ст}}$ – статическая нагрузка на вагон, тонн;
 $l_{\text{лок}}$ – средняя длина маневрового локомотива, м.

Выводы

Преимущество посредничества в распоряжении путями необщего пользования (ПНП) состоит в том, что в отличие от путей общего пользования можно самостоятельно регулировать и планировать загрузку, имея четкое представление о емкости парков отстоя. Учитывая общую протяженность путей необщего пользования, которая составляет порядка 35 тыс. км, общая их вместимость, при значении средней длины вагона в 13,92 м, составляет чуть более 2,5 млн условных вагонов. С учетом потребности промышленных предприятий в осуществлении эксплуатационной работы для реализации функций снабжения-распределения и расчетов сетевого перевозчика, согласно которым профицит вагонного парка на сети в настоящий момент составляет порядка 400 тыс. вагонов, хватит и 20 % общей вместимости ПНП, чтобы закрыть эту разницу. Трудности для операторов могут заключаться в неравномерности размещения ПНП на сети дорог, так как может возникнуть дистанционный разрыв между точками возникновения грузопотоков и концентрации порожнего подвижного состава.

Использование технологического аутсорсинга позволит получить положительные эффекты для всех участников перевозочного процесса:

- для перевозчика – это разгрузит инфраструктуру для осуществления перевозок;
- для клиента – позволит передать непрофильную деятельность специалистам и сократить логистические издержки;
- для оператора – обеспечит постоянных клиентов и наличие грузопотока для вагонов, а также укрепит позиции компании на рынке за счет расширения функционала и повышения доходности.

Список литературы

- 1 Годованый, К. А. Технологический аутсорсинг как инструмент развития рынка операторских компаний / К. А. Годованый, М. В. Колесников // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 97–107. – ISSN 2220-4245.
- 2 Мамаев, Э. А. Методические аспекты оценки рынка операторской деятельности на железнодорожном транспорте / Э. А. Мамаев, К. А. Годованый // Сборник научных трудов IV международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика : пространственно-технологическая синергия развития», Ростов-на-Дону, 03–04 февраля 2020 года. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2020. – С. 184–187. – ISBN 978-5-907295-09-4.
- 3 Методические подходы к организации перевозочного процесса на основе технико-технологических параметров / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Максимова, Е. А. Лаханкин // Транспорт Урала. – 2023. – № 1 (76). – С. 33–36. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-1-33-36.
- 4 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 (93). – С. 55–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_55.
- 5 Покровская, О. Д. Принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к

References

- 1 Godovany, K. A. Technological outsourcing as a tool for the development of the operator companies market / K. A. Godovany, M. V. Kolesnikov // Izvestiya Transsiba. – 2020. – No. 3 (43). – P. 97–107. – ISSN 2220-4245.
- 2 Mamaev, E. A. Methodological aspects of assessing the operator activity market in railway transport / E. A. Mamaev, K. A. Godovany // Collected papers of the IV International Scientific and Practical Conference «Transport and Logistics : Spatial and Technological Synergy of Development», Rostov-on-Don, February 03–04, 2020. – Rostov-on-Don : RSTU, 2020. – P. 184–187. – ISBN 978-5-907295-09-4.
- 3 Methodological approaches to organizing the transportation process based on technical and technological parameters / A. F. Borodin, V. V. Panin, E. S. Maksimova, E. A. Lakhankin // Transport of the Urals. – 2023. – No. 1(76). – P. 33–36. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-1-33-36.
- 4 On models of transformation of logistics operator activities / K. A. Godovany, V. V. Zyryanov, A. I. Kolobov, E. A. Mamaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 1 (93). – P. 55–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_55.
- 5 Pokrovskaya, O. D. Principles for the implementation of integrated transport and logistics services in railway transport and requirements for

ним / О. Д. Покровская // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 288–303. – DOI 10.20295/1815-588X-2020-3-288-303.

6 **Сергеева, Т. Г.** Оптимизация деятельности логистических провайдеров в условиях построения новых цепей поставок / Т. Г. Сергеева, Л. А. Зяткова // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 197–214. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-2-197-214.

7 **Сергеева, Т. Г.** Процесс принятия решения о передаче работ и услуг на аутсорсинг / Т. Г. Сергеева, В. А. Самарин, И. Р. Химач // Техник транспорта : образование и практика. – 2022. – Т. 3, № 2. – С. 196–201. – DOI 10.46684/2687-1033.2022.3.196-201.

8 Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» (ред. от 14.06.2012 г.) // СПС «КонсультантПлюс». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40444/?ysclid=maz3hermh369609852 (дата обращения: 19.05.2025).

9 **Ходыкин, Д. А.** Способы определения технологически допустимого парка вагонов по операторам / Д. А. Ходыкин // Экономика железных дорог. – 2024. – № 7. – С. 27–34. – ISSN 1727-6500.

10 **Югрина, О. П.** Особенности работы железнодорожного полигона с порожним вагонопотоком / О. П. Югрина, Л. С. Жарикова // Транспорт Урала. – 2022. – № 1 (72). – С. 24–29. – DOI 10.20291/1815-9400-2022-1-24-29.

them / O. D. Pokrovskaya // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2020. – Vol. 17, No. 3. – P. 288–303. – DOI 10.20295/1815-588X-2020-3-288-303.

6 **Sergeeva, T. G.** Optimization of logistics providers' activities in the context of building new supply chains / T. G. Sergeeva, L. A. Zyatikova // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Vol. 13, No. 2. – P. 197–214. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-2-197-214.

7 **Sergeeva, T. G.** The process of making a decision on the transfer of works and services to outsourcing / T. G. Sergeeva, V. A. Samarin, I. R. Khimach // Transport technician : education and practice. – 2022. – Vol. 3, No. 2. – P. 196–201. – DOI 10.46684/2687-1033.2022.3.196-201.

8 Federal Law dated 10.01.2003 No. 18-FZ «Charter of Railway Transport of the Russian Federation» (as amended on 14.06.2012) // SPS “ConsultantPlus”. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40444/?ysclid=maz3hermh369609852 (date of access: 19.05.2025).

9 **Khodykin, D. A.** Methods for determining the technologically permissible wagon fleet by operators / D. A. Khodykin // Railway Economics. – 2024. – No. 7. – P. 27–34. – ISSN 1727-6500.

10 **Yugrina, O. P.** Features of operation of railway polygon with empty car traffic / O. P. Yugrina, L. S. Zharikova // Transport of the Urals. – 2022. – No. 1 (72). – P. 24–29. – DOI 10.20291/1815-9400-2022-1-24-29.

K. A. Godovany

TECHNOLOGICAL OUTSOURCING OF OPERATOR ACTIVITIES IN CONDITIONS OF A SURPLUS OF WAGON FLEET ON THE RAILWAY NETWORK

Abstract. This article is devoted to the study of mechanisms for improving the efficiency of logistics activities of operator companies in the context of a surplus of car fleet in the railway network. The necessity of transforming existing models of interaction between participants in the transportation process is substantiated, including through the introduction of technological outsourcing. Technological outsourcing refers to the transfer of logistical assets (in particular, non-public tracks) by industrial enterprises to the management of operator companies, including for the organization of temporary storage of empty rolling stock. A capacity calculation for such tracks is presented, and groups of tracks suitable for purposes of wagon layover are identified. The advantages of this approach for all parties are highlighted: reduced infrastructure load for the carrier, cost optimization for the shipper, and expanded functional capabilities for the operator. The conclusions confirm that technological outsourcing can become a tool for stabilizing the transportation process, increasing the adaptability of the logistics system, and enabling rational resource allocation in the context of volatility of transport demand.

Keywords: technological outsourcing, empty wagon, operator, non-public railway tracks, surplus of car fleet, wagon layover.

For citation: Godovany, K. A. Technological outsourcing of operator activities in conditions of a surplus of wagon fleet on the railway network / K. A. Godovany // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 179–187. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_2_179.

Сведения об авторах

Годованый Кирилл Александрович
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Логистика и управление
транспортными системами»,
старший преподаватель,
e-mail: godcorp@yandex.ru

Information about the authors

Godovany Kirill Alexandrovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Logistics and Management of Transport
Systems”,
Senior Lecturer,
e-mail: godcorp@yandex.ru

Б. Ю. Калмыков, П. В. Харламов, О. М. Калмыкова

ПРИМЕНЕНИЕ КЛАССИЧЕСКИХ МИКРОМОДЕЛЕЙ ТЕОРИИ СЛЕДОВАНИЯ ЗА ЛИДЕРОМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. Представлен анализ математической нелинейной модели следования за автомобилем-лидером в транспортном потоке с целью рациональной организации дорожного движения на улично-дорожной сети городов. Авторами на основе классических микромоделей теории следования за лидером предложены математические выражения для расчета ускорений, скоростей движения и расстояний для ведомого автомобиля в транспортном потоке с учетом сдвига по времени, связанного со временем реакции водителя. Получены графики зависимостей указанных параметров от времени движения автомобиля. Предложена математическая зависимость, устанавливающая связь между ускорениями автомобиля-лидера и ведомого автомобиля в анализируемой схеме движения.

Ключевые слова: математическое моделирование, теория следования за лидером, транспортные потоки, автомобиль.

Для цитирования: Калмыков, Б. Ю. Применение классических микромоделей теории следования за лидером при моделировании дорожного движения / Б. Ю. Калмыков, П. В. Харламов, О. М. Калмыкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 188–194. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_188.

При моделировании дорожного движения для его рациональной организации на улично-дорожной сети городов можно использовать классические микромодели теории следования за лидером.

В работе В. В. Зырянова [1] предложена классификация моделей следования за лидером, в числе первых рассмотрены классические модели, разработанные Л. Эдай, Р. Фут, Р. Херман и Р. Ротери. Данными исследователями была выведена следующая математическая нелинейная модель следования за лидером:

$$a_{n+1}(t + T) = \frac{\alpha_0 \cdot V_n(t)}{[X_n(t) - X_{n+1}(t)]^2} [V_n(t) - V_{n+1}(t)], \quad (1)$$

где $a_{n+1}(t + T)$ – ускорение ведомого автомобиля, м/с² (рис. 1), рассчитано для текущего времени t , с, с учетом времени реакции водителя $T = 0,5 \div 1,5$ с;

α_0 – чувствительность водителя ведомого автомобиля, зависящая в основном от дистанции между автомобилем-лидером и ведомым автомобилем, м;

$V_n(t), V_{n+1}(t)$ – скорости движения соответственно автомобиля-лидера и ведомого автомобиля, м/с;

$X_n(t), X_{n+1}(t)$ – расстояния, пройденные соответственно автомобилем-лидером и ведомым автомобилем, м.

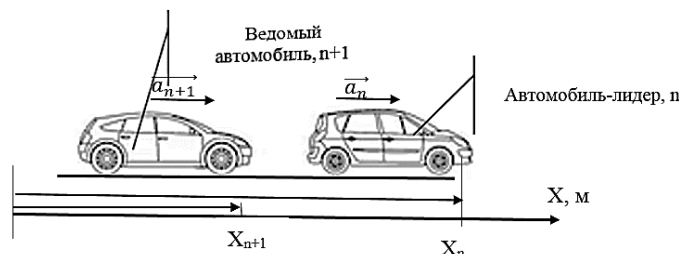


Рис. 1. Схема движения автомобилей

Введем допущение, что автомобили (см. рис. 1) двигаются с равнопеременным ускорением, т.е. $a_n = \text{const}$.

Тогда основные параметры движения связаны между собой следующими выражениями:

$$V(t) = V_0 + a(t) \cdot t; \quad (2)$$

$$X(t) = X_0 + V_0 \cdot t + \frac{a(t) \cdot t^2}{2}, \quad (3)$$

где V_0, X_0 – начальные условия движения, соответственно начальная скорость, м/с, и путь, с которого начал движение автомобиль, м.

Подставим выражения (2), (3) в модель (1), приняв начальные условия движения равными нулю, т.е. $V_0 = 0, X_0 = 0$:

$$a_{n+1}(t) = \frac{\alpha_0 \cdot a_n(t) \cdot t}{\left[\frac{a_n(t) \cdot t^2}{2} - \frac{a_{n+1}(t) \cdot t^2}{2} \right]^2} [a_n(t) \cdot t - a_{n+1}(t) \cdot t], \quad (4)$$

где $a_n(t)$ – ускорение автомобиля лидера, м/с².

Таким образом, установлена взаимосвязь между ускорениями автомобиля-лидера и ведомого автомобиля.

Задаваясь значениями ускорений автомобиля-лидера, можно определить ускорение ведомого автомобиля в любой момент времени t , с, а затем определить параметры движения автомобилей по формулам (2), (3).

Упростив уравнение (4), получим

$$a_{(n+1)}(t)_{1,2} = \frac{a_n(t)}{2} \pm \frac{\sqrt{t^2 \cdot a_n(t)^2 - 16 \cdot \alpha_0 \cdot a_n(t)}}{2t}. \quad (5)$$

Таким образом, взаимосвязь между значениями ускорений $a_n(t)$ и $a_{n+1}(t)$ согласно выражению (5) может быть установлена при соблюдении следующих условий:

- 1) при $t \neq 0$;
- 2) при $a_n(t) > 0$ – равноускоренное движение, тогда

$$a_{(n+1)}(t)_1 = \frac{a_n(t)}{2} + \frac{\sqrt{t^2 \cdot a_n(t)^2 - 16 \cdot \alpha_0 \cdot a_n(t)}}{2t}, \quad (6)$$

- 3) при $a_n(t) = 0$ – равномерное движение, тогда

$$a_{(n+1)}(t) = 0; \quad (7)$$

- 4) при $a_n(t) < 0$ – равнозамедленное движение, тогда

$$a_{(n+1)}(t)_2 = \frac{a_n(t)}{2} - \frac{\sqrt{t^2 \cdot a_n(t)^2 - 16 \cdot \alpha_0 \cdot a_n(t)}}{2t}. \quad (8)$$

На рис. 2 представлена зависимость ускорений $a_n(t)$ и $a_{n+1}(t)$ при $\alpha_0 = 0,5$ и следующих исходных данных, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

t, s	$a_n, m/s^2$	t, s	$a_n, m/s^2$
0	0	15	–0,05
1	0,05	16	–0,15
2	0,1	17	–0,2
3	0,15	18	–0,25
4	0,2	19	–0,3
5	0,25	20	–0,3
6	0,3	21	0
7	0,35	22	0
8	0,4	23	0
9	0,5	24	0
10	0,5	25	0,2
11	0	26	0,4
12	0	27	0,6
13	0	28	0,8
14	0	29	1

Как видно из заданного режима движения автомобиля-лидера, ускорение ведомого автомобиля начинает принимать действительные значения только с 6-й секунды, так как в интервале с 1-й по 5-ю

секунду подкоренное выражение уравнения (5) отрицательно, следовательно, корни этого выражения будут мнимыми. В интервалах с 6-й по 10-ю секунду и с 25-й по 29-ю секунду автомобиль-лидер ускоряется, с 11-й по 14-ю секунду и с 21-й по 24-ю секунду движется равномерно, а с 15-й по 20-ю секунду замедляется.

Далее вернемся к формуле (1) и обратим внимание на то, что ведомый автомобиль начинает ускоряться (замедляться) со сдвигом во времени (задержкой), который зависит от времени реакции водителя T , с.



Рис. 2. Зависимость ускорений $a_n(t)$ и $a_{n+1}(t)$ при $\alpha_0 = 0,5$

В ряде литературных источников [2, 3] представлена обратно пропорциональная связь между чувствительностью водителя ведомого автомобиля α_0 и временем его реакции T :

$$\alpha_0 = 1/T. \quad (9)$$

Из выражения (9) определим время реакции водителя при $\alpha_0 = 0,5$: $T = 2$ с. Исходные данные для расчетов такие же, как в табл. 1 (рис. 3).



Рис. 3. Зависимость ускорений $a_n(t)$ и $a_{n+1}(t + T)$ при $\alpha_0 = 0,5$

Как видно из рис. 3, действительные значения выражения (5) получаются с 5-й секунды. Остальные параметры остались практически без изменений.

Далее определим, какое влияние оказывает коэффициент чувствительности, если его увеличить до значения $\alpha_0 = 2,0$. Приведем график зависимости ускорений при исходных данных, представленных в табл. 1, и $\alpha_0 = 2,0$ (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость ускорений $a_n(t)$ и $a_{n+1}(t + T)$ при $\alpha_0 = 2,0$

Учитывая, что на рис. 3 и 4 разница между значениями ускорений начиная с 10-й секунды практически не видна, приведем табл. 2, в которой представлены расчеты этих значений для отдельных периодов времени.

Таблица 2

Сравнительный анализ ускорений

$t, \text{ с}$	$a_n, \text{ м/с}^2$	$a_n + 1$ при $\alpha_0 = 0,5$	$a_n + 1$ при $\alpha_0 = 2,0$
9	0,5	0,483	0,385
10	0,5	0,486	0,412
15	-0,05	-0,056	-0,073
16	-0,15	-0,156	-0,175
19	-0,3	-0,304	-0,320
20	-0,3	-0,304	-0,318
29	1	0,998	0,991
30	1	0,998	0,991

Из табл. 2 видно, что водитель с коэффициентом чувствительности 0,5 на 10-й секунде движения ускорится на 0,074 м/с² быстрее, чем водитель с $\alpha_0 = 2,0$. Замедляется на 16-й секунде водитель с $\alpha_0 = 0,5$ быстрее на 0,016 м/с², чем водитель с $\alpha_0 = 2,0$.

Следовательно, чем меньше коэффициент чувствительности, тем ближе значение ускорения ведомого автомобиля к ускорению автомобиля-лидера.

Более наглядно этот процесс заметен при расчете скоростей движения автомобиля-лидера по формуле (2) (рис. 5–8).

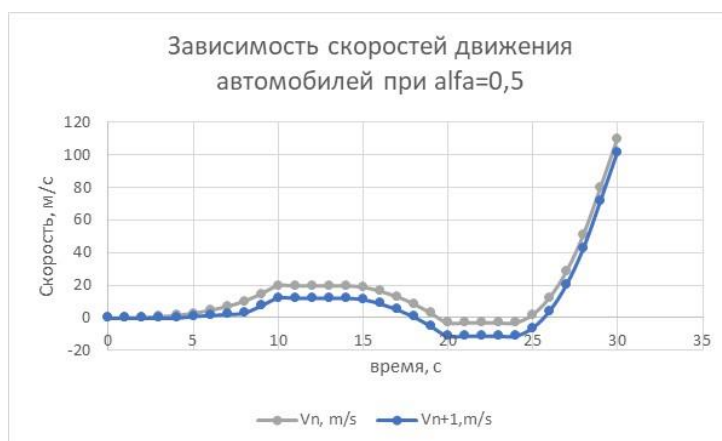


Рис. 5. Зависимость скоростей $V_n(t)$ и $V_{n+1}(t)$ при $\alpha_0 = 0,5$

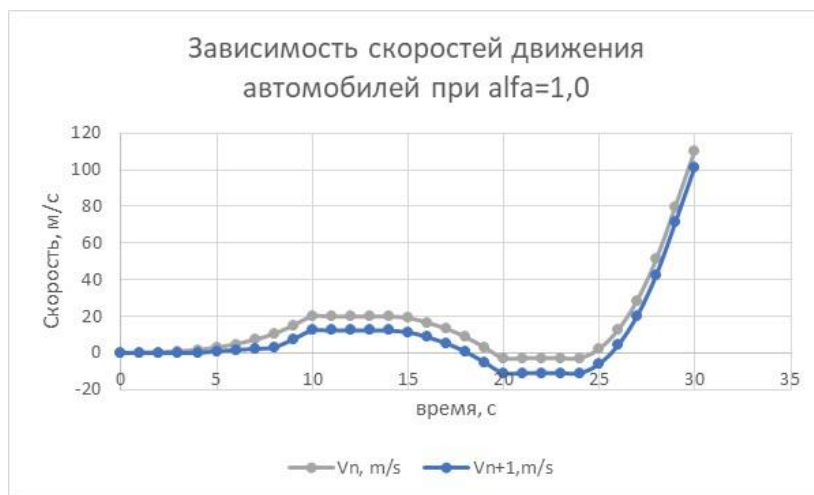


Рис. 6. Зависимость скоростей $V_n(t)$ и $V_{n+1}(t)$ при $\alpha 0 = 1,0$

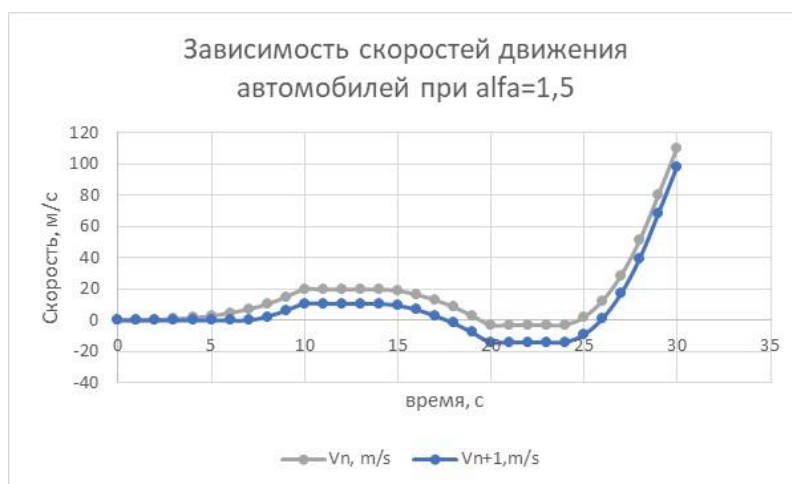


Рис. 7. Зависимость скоростей $V_n(t)$ и $V_{n+1}(t)$ при $\alpha 0 = 1,5$

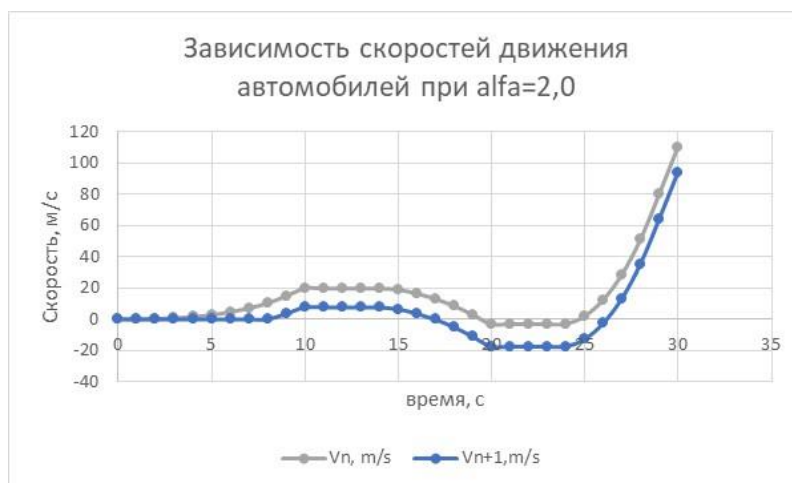


Рис. 8. Зависимость скоростей $V_n(t)$ и $V_{n+1}(t)$ при $\alpha 0 = 2,0$

Таким образом, формулу (5) можно представить в следующем виде, используя кусочно-постоянную функцию вещественного аргумента $\text{sng}(x)$:

$$a_{(n+1)}(t) = \frac{a_n(t)}{2} + \text{sng}\left(\frac{\sqrt{t^2 \cdot a_n(t)^2 - 16 \cdot \alpha_0 \cdot a_n(t)}}{2t}\right). \quad (10)$$

При этом будут справедливы условия (6)–(8).

Список литературы

- 1 **Зырянов, В. В.** Моделирование дорожного движения : монография / В. В. Зырянов. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный строительный университет, 2015. – 163 с. – ISBN 978-5-9525-0141-6.
- 2 **Мамаев, Э. А.** Методические подходы структурирования показателей оценки потенциала международного транспортного коридора / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин // *Логистика и управление цепями поставок*. – 2024. – Т. 21, № 3 (112). – С. 11–24. – ISSN 2587-6775.
- 3 **Gerlough, D. L.** Traffic flow theory : a monograph / D. L. Gerlough, M. J. Huber // *Transpn. Res. Board, Special report*. – 1975. – No. 165. – 220 p. – ISBN 0-309-02459-5.
- 4 **Юнг, А. А.** Моделирование процесса движения средств индивидуальной мобильности в городской среде / А. А. Юнг, А. Г. Шевцова // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. – 2022. – № 1 (31). – ISSN 2409-7217.
- 5 **Жанказиев, С. В.** Современное представление о маршрутном ориентировании участников дорожного движения в интеллектуальных транспортных системах / С. В. Жанказиев // *Средства и технологии телематики на автомобильном транспорте : сборник научных трудов МАДИ (ГТУ)*. – Москва : Издательство МАДИ (ГТУ), 2008. – С. 220–232.
- 6 Expert methods for assessing the quality of transportation services / G. Chekmareva, D. Khamurova, S. Matyashchuk, E. Fillimonova, E. Mamaev // *Transportation Research Procedia : Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure : Territory Development and Sustainability*. – Krasnoyarsk, 2023. – P. 98–108. – DOI 10.1016/j.trpro.2023.02.012.
- 7 Развитие методики цифрового аксиоматного моделирования объекта транспортной инфраструктуры / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко, В. В. Хан, Н. М. Магомедова // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. – 2024. – № 1 (68). – С. 22–32. – ISSN 1815-9265.

References

- 1 **Zyryanov, V. V.** Traffic modeling : monograph / V. V. Zyryanov – Rostov-on-Don : Rostov State University of Civil Engineering, 2015. – 163 p. – ISBN 978-5-9525-0141-6.
- 2 **Mamaev, E. A.** Methodological approaches to structuring indicators for assessing the potential of an international transport corridor / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // *Logistics and supply chain management*. – 2024. – Vol. 21, No. 3 (112). – P. 11–24. – ISSN 2587-6775.
- 3 **Gerlough, D. L.** Traffic flow theory : a monograph / D. L. Gerlough, M. J. Huber // *Transpn. Res. Board, Special report*. – 1975. – No. 165. – 220 p. – ISBN 0-309-02459-5.
- 4 **Jung, A. A.** Modeling the process of movement of individual mobility vehicles in an urban environment / A. A. Jung, A. G. Shevtsova // *Automobile. Road. Infrastructure*. – 2022. – No. 1 (31). – ISSN 2409-7217.
- 5 **Zhankaziev, S. V.** Modern concept of route orientation of road users in intelligent transport systems / S. V. Zhankaziev // *Telematics tools and technologies in automobile transport : collection of scientific papers of MADI (STU)*. – Moscow : Publishing house of MADI (STU), 2008. – P. 220–232.
- 6 Expert methods for assessing the quality of transportation services / G. Chekmareva, D. Khamurova, S. Matyashchuk, E. Fillimonova, E. Mamaev // *Transportation Research Procedia : Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure : Territory Development and Sustainability*. – Krasnoyarsk, 2023. – P. 98–108. – DOI 10.1016/j.trpro.2023.02.012.
- 7 Development of the methodology of digital axiomat modeling of a transport infrastructure object / O. N. Chislov, N. M. Luganchenko, V. V. Khan, N. M. Magomedova // *The Siberian Transport University Bulletin*. – 2024. – No. 1 (68). – P. 22–32. – ISSN 1815-9265.

B. Yu. Kalmykov, P. V. Kharlamov, O. M. Kalmykova

APPLICATION OF CLASSICAL MICROMODELS OF FOLLOW-THE-LEADER THEORY IN MODELLING ROAD TRAFFIC

Abstract. The article presents an analysis of a mathematical nonlinear model of following a leader vehicle in a traffic flow for the purpose of rational organization of traffic on the city road network. Based on classical micromodels of the follow-the-leader theory, the authors propose mathematical expressions for calculating accelerations, speeds, and distances for a follower vehicle in a traffic flow, taking into account the time shift associated with the driver's reaction time. Graphs of the dependences of these parameters on the time of vehicle movement

are obtained. A mathematical dependence is proposed that establishes a connection between the accelerations of the leader and follower vehicles in the analyzed traffic pattern.

Keywords: mathematical modeling, follow-the-leader theory, traffic flows, automobile.

For citation: Kalmykov, B. Yu. Application of classical micromodels of follow-the-leader theory in modelling road traffic / B. Yu. Kalmykov, P. V. Kharlamov, O. M. Kalmykova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 188–194. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_2_188.

Сведения об авторах

Калмыков Борис Юрьевич

Институт сферы обслуживания
и предпринимательства (филиал) ФГБОУ
«Донской государственный технический
университет» в г. Шахты Ростовской области,
кафедра «Автомобильный транспорт
и технологическое оборудование»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: doc_tea@sssu.ru

Харламов Павел Викторович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Проектирование и технология
производства машин»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: kcharlamov@yandex.ru

Калмыкова Ольга Михайловна

Институт сферы обслуживания
и предпринимательства (филиал) ФГБОУ
«Донской государственный технический
университет» в г. Шахты Ростовской области,
кафедра «Автомобильный транспорт
и технологическое оборудование»,
кандидат философских наук, доцент,
e-mail: doc_tea@sssu.ru

Information about the authors

Kalmykov Boris Yuryevich

Institute of Service and Entrepreneurship (branch)
of DGTU (the FSBEI "Don State Technical
University") in Shakhty, Rostov Region,
Chair "Automobile Transport and Technological
Equipment",
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of Chair,
e-mail: doc_tea@sssu.ru

Kharlamov Pavel Viktorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair "Design and Technology of Machine
Production",
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of Chair,
e-mail: kcharlamov@yandex.ru

Kalmykova Olga Mikhailovna

Institute of Service and Entrepreneurship (branch)
of DGTU (the FSBEI "Don State Technical
University") in Shakhty, Rostov Region,
Chair "Automobile Transport and Technological
Equipment",
Candidate of Philosophical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: doc_tea@sssu.ru

А. А. Климов

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ ПУТЕЙ СОРТИРОВОЧНОГО ПАРКА *

Аннотация. Приведен обзор современных работ по исследованию конструкции продольного профиля сортировочных парков. Выполнен анализ действующих нормативных требований к конструкции продольного профиля сортировочных путей и способов регулирования скорости скатывания отцепов при роспуске с горок. Представлено описание имитационной модели процесса заполнения путей накопления составов при роспуске, используемой для исследования конфигурации продольного профиля основной части путей сортировочных парков. Установлены критерии для оценки конфигурации продольного профиля основной части путей сортировочных парков, базирующиеся на расчете вероятностей, характеризующих показатели процесса заполнения путей накопления составов при расформировании. Сформирована методика оценки конструктивных параметров и конфигурации продольного профиля основной части сортировочных путей на основании имитационного моделирования процесса заполнения путей накопления составов при использовании режима интервально-прицельного регулирования скорости скатывания отцепов. Выполнено исследование различных вариантов конфигурации продольного профиля основной части путей сортировочного парка для существующих и новых значений основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с горки.

Ключевые слова: основное удельное сопротивление движению, сортировочный парк, имитационное моделирование процесса заполнения, скорость соударения вагонов, дальность пробега отцепов, режимы регулирования скорости скатывания, конфигурация продольного профиля.

Для цитирования: Климов, А. А. Метод исследования конфигурации продольного профиля основной части путей сортировочного парка / А. А. Климов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 195–207. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_195.

Введение

К конструктивным параметрам продольного профиля сортировочных парков относятся значения длин и уклонов элементов, а также конфигурация – очертание сортировочного пути в вертикальной плоскости, определяемое совокупностью взаимного расположения элементов продольного профиля. Указанные параметры продольного профиля во многом определяют качество процесса заполнения путей сортировочных парков при расформировании составов и, как следствие, перерабатывающую способность горки и уровень безопасности сортировочного процесса. Потребные конструктивные параметры продольного профиля сортировочных парков в совокупности с техническими средствами регулирования скорости скатывания отцепов должны обеспечивать реализацию необходимой дальности пробега, которая определяется по условию докатывания отцепа до ближайших вагонов в парке и соединения с допустимой скоростью. При соблюдении указанного условия обеспечивается:

- минимизация дополнительных затрат на выполнение маневровой работы по подтягиванию или осаживанию групп вагонов на сортировочном пути с целью ликвидации образующихся при накоплении составов пространственных промежутков между вагонами («оконов»);
- увеличение перерабатывающей способности сортировочной горки и сортировочной системы в целом за счет сокращения перерывов в работе горки для производства маневровой работы;
- соблюдение требований безопасности сортировочного процесса, за счет исключения случаев соударения вагонов с повышенными скоростями и связанных с этим возможных повреждений вагонов и находящихся в них грузов, а также проследований отцепов или смещений групп вагонов за пределы полезной длины сортировочного пути в выходной части парка.

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

В реальных условиях эксплуатации достижение вышеуказанных целевых ориентиров для всего перерабатываемого вагонопотока возможно при:

- квазинепрерывном регулировании скорости скатывания, заключающемся в использовании точечных вагонных замедлителей, ускорителей и ускорителей-замедлителей на всем маршруте следования или в сочетании с вагонными замедлителями;
- принудительном перемещении вагонов при использовании вагоноосаживателей, робототехники и других технических средств для перемещения групп вагонов вглубь парка;
- совокупности квазинепрерывного регулирования и принудительного перемещения вагонов на разных участках маршрута скатывания.

На большинстве сортировочных горок РФ реализуется режим интервально-прицельного торможения, когда в сортировочных парках нет дополнительных технических средств регулирования скорости скатывания отцепов. В результате общий запас энергии движения отцепа при выходе с парковой тормозной позиции (ПТП) определяется:

- профильной высотой участка сортировочного пути от нижнего конца ПТП до расчетной точки остановки отцепа, зависящей от конфигурации продольного профиля пути;
- скоростью выхода отцепа с ПТП, которая устанавливается по условию обеспечения докатывания отцепа до ближайшей группы вагонов на сортировочном пути с учетом действия сил сопротивления движению.

В реальных условиях эксплуатации именно скорость выхода отцепа с ПТП, рассчитываемая для конкретного продольного профиля пути с использованием подсистемы КЗП (контроль заполнения путей) на автоматизированных горках или определяемая оператором постов управления замедлителями на механизированных горках, а на немеханизированных горках – регулировщиком скорости движения отцепов, во многом определяет достижение потребной дальности пробега отцепов и качество заполнения путей накопления составов. С учетом случайного характера действующих на вагоны сил сопротивления, результаты неуправляемого движения отцепа по сортировочному пути (после выхода с ПТП) могут быть следующие:

1 Отцеп докатился до стоящей в парке группы вагонов и соединился с ней с допустимой скоростью (согласно ПТЭ для большинства вагонов – 5 км/ч), что является целевым ориентиром рассматриваемого процесса.

2 Отцеп докатился до стоящей в парке группы вагонов, но скорость соединения превысила установленное в ПТЭ значение, что является нарушением условий безопасности сортировочного процесса и может приводить к возникновению нештатных ситуаций с серьезными последствиями для экологии, жизни и здоровья людей.

3 Отцеп не докатился до стоящей в парке группы вагонов и остановился ранее точки прицеливания, что привело к образованию «окна» и ухудшению качества процесса заполнения пути накопления. На автоматизированных горках преждевременная остановка, как правило, связана с широким диапазоном возможных значений и случайным характером воздействия на вагоны сил сопротивления движению; на механизированных и немеханизированных горках – с человеческим фактором, когда операторы тормозных позиций или регулировщики скорости скатывания отцепов увеличивают силу торможения на ПТП с целью исключения случаев соударения вагонов с повышенной скоростью. В результате на пути накопления образуются «окна», величина которых определяет потребность в выполнении осаживаний/подтягиваний и объем дополнительной маневровой работы. В зависимости от конфигурации продольного профиля величина «окна» может быть увеличена за счет обратного следования отцепа при его остановке на локальном участке сортировочного пути с противоуклоном, что также имеет место на реальных горках вследствие просадок участков путей, образующихся в процессе эксплуатации.

Результат скатывания каждого отцепа определяется с учетом действия удельных сил сопротивления движению, которые, являясь случайными величинами, могут изменяться в течение процесса скатывания. Дальность пробега отцепов во многом зависит от ходовых свойств отцепов – величины основного удельного сопротивления движению (w_0). Используемые в настоящее время параметры для расчета случайной величины w_0 [1] определены на основании исследований, выполненных в 70-х годах прошлого века. В связи с обновлением парка вагонов специалистами СГУПС выполнены исследования динамики скатывания одиночных вагонов с использованием системы «Компьютерное зрение» – разработкой ростовского филиала АО «НИИАС» [2]. В результате выполненных исследований определены новые значения и параметры распределений величины w_0 , которые существенно отличаются от существующих значений [3, 4], что также необходимо учитывать при решении рассматриваемой задачи.

Оборудование сортировочных парков системами квазинепрерывного регулирования скорости скатывания или принудительного перемещения вагонов связано со значительными затратами на установку и содержание дополнительных технических средств, которые отечественными производителями пока не производятся. Поэтому на ближайшую и среднесрочную перспективу следует ожидать, что большинство сортировочных горок по-прежнему будут функционировать с реализацией режима интервально-прицельного торможения.

Целью данного исследования является разработка методики оценки конфигурации продольного профиля основной части сортировочных путей с учетом современных характеристик ходовых свойств вагонного парка. Объектом исследования является участок пути сортировочного парка (основная часть) – от нижнего конца ПТП до начала участка противоуклона в выходной части парка. Предметом исследования является конфигурация продольного профиля основной части сортировочного пути, определяемая на основании качества процесса заполнения рассматриваемого участка пути накопления при расформировании составов.

Действующие нормативные требования по определению длины и уклонов элементов продольного профиля сортировочных путей являются унифицированными для всех станций сети железных дорог. При этом фактически отсутствуют диапазоны допустимых значений длин и уклонов элементов продольного профиля сортировочных путей (за исключением длины противоуклона в выходной части парка, которая может изменяться в диапазоне 100–150 м) и методики для расчета параметров продольного профиля, что для горок, расположенных в различных климатических зонах, может приводить к затруднениям в эксплуатации и увеличению вероятности возникновения нештатных ситуаций при роспуске.

Исследования проводились с учетом существующих числовых характеристик распределений основного удельного сопротивления движению вагонов, так и для новых значений величины w_0 , полученных по результатам натурных наблюдений и обработки статистических данных о скатывании с горки вагонов современного парка. Для расчета показателей процесса заполнения путей сортировочного парка при расформировании составов использовалась разработанная имитационная модель. В качестве объекта исследования рассмотрена реальная сортировочная горка, расположенная в регионе Западной Сибири.

Действующие нормативы к конструкции продольного профиля путей сортировочного парка [5] устанавливают весьма жесткие требования. В частности, основная часть сортировочного пути должна располагаться на уклоне 0,6 ‰ по направлению скатывания отцепов, что способствует продвижению отцепов вглубь парка. Выходная часть пути длиной 100–150 м проектируется на противоуклоне – 2,0 ‰, что должно ограничивать возможность выхода отцепов или смещения групп накапливаемых вагонов вследствие возникающих динамических нагрузок за пределы полезной длины сортировочных путей. Таким образом, продольный профиль сортировочных парков должен быть двухэлементным. При этом указанные требования относятся ко всем сортировочным паркам вне зависимости от технического оснащения горки и используемого режима регулирования скорости скатывания отцепов; особенностей расположения станции и метеорологических условий местности; структуры перерабатываемого вагонопотока и других факторов, что вызывает вопросы об объективности использования указанного подхода при проектировании.

Результаты исследований конструкции продольного профиля сортировочных путей и ее влияния на эксплуатационные показатели и безопасность процесса расформирования отражены в ряде научных трудов. Так, в работах [6, 7] изложен новый подход к оценке конструкции продольного профиля сортировочных парков, а также приведен анализ вероятностных показателей процесса заполнения путей накопления состава для варианта, соответствующего нормативным требованиям. В работах [8, 9] исследуются значения скоростей движения отцепов по сортировочному пути для различных условий, в том числе анализируются причины преждевременной остановки отцепов и случаев обратного следования – навстречу очередным отцепам. Установлено, что отклонение конфигурации продольного профиля сортировочного пути от проектного оказывает значительное влияние на скорость скатывания отцепов и дальность пробега в сортировочном парке. При этом скатывание по таким путям «очень хороших» и «хороших» бегунов при попутном ветре создает наихудшие условия для обеспечения безопасности сортировочного процесса.

Особенности технологии роспуска вагонов с опасными грузами с учетом продольного профиля сортировочных парков анализируются в работе [10]. Установлено, что при аттестации железнодорожных станций с автоматизированными горками на возможность безопасного роспуска вагонов-цистерн

должны учитываться следующие критерии, относящиеся к конфигурации продольного профиля сортировочных парков:

- соответствие установленным требованиям значений как поэлементного, так и усредненного продольного профиля;
- наличие переломов продольного профиля основной части сортировочного пути и противоуклона в выходной горловине;
- коэффициент вогнутости сортировочного пути.

Для поэлементной оценки продольного профиля сортировочного пути предложено использовать балльную систему оценки в градации диапазонов значений уклонов элементов. В данном случае оценивается возможность обеспечения повышенной безопасности для вагонов ЗСГ с учетом соблюдения установленной скорости сцепления вагонов до 3 км/ч. Также установлено, что «ямообразное» очертание продольного профиля сортировочного пути может находиться только в конце основной части пути перед противоуклоном.

В работе [11] определены требования к техническому оснащению и технологии работы железнодорожных станций для обеспечения безопасного роспуска вагонов-цистерн, в числе которых выделены требования к продольному профилю сортировочных парков, *«оказывающему определяющее влияние на скорость следования отцепов»*. А в качестве основных рисков, являющихся причинами запрета роспуска с горок вагонов с опасными грузами, указаны:

- превышение допустимой скорости сцепления вагонов на сортировочных путях;
- существенные отклонения параметров плана и профиля сортировочных парков от норм.

На основании анализа результатов приведенных исследований можно отметить, что именно конфигурация продольного профиля путей сортировочных парков, являющаяся совокупностью длин и значений уклонов участков пути, во многом определяет скорости движения отцепов в парке, дальность их пробега и, как следствие, качество процесса заполнения путей накопления составов при роспуске. Действующие нормативные требования к определению конструктивных параметров продольного профиля сортировочных парков сформировались постепенно, с учетом опыта эксплуатации сортировочных устройств и в настоящее время являются едиными для всех железнодорожных станций сети. При этом установленные нормами параметры продольного профиля не являются расчетными характеристиками, поэтому задача разработки методики оценки конфигурации продольного профиля путей сортировочных парков является актуальной на современном этапе развития железнодорожного транспорта.

Основная часть

В данной работе рассматриваются различные варианты конфигурации продольного профиля основной части сортировочного пути от нижнего стыка ПТП до выходного участка, расположенного на противоуклоне. Сравнение вариантов производится методом имитационного моделирования процесса заполнения путей сортировочных парков при роспуске с использованием «Программы для расчета показателей процесса заполнения путей сортировочного парка» [12]. Для заданных условий производится моделирование движения отцепов по основной части сортировочного пути (принципы которого изложены в работе [13]) и определяются показатели процесса накопления всего состава.

Результаты моделирования могут использоваться для оценки и сравнения вариантов конфигурации продольного профиля сортировочных парков, в том числе для автоматизированных, механизированных и немеханизированных горок, где реализуется режим интервально-прицельного регулирования скорости движения отцепов. В модели скорость выхода отцепа в парк определяется обратным счетом по условию обеспечения потребной (прицельной) дальности пробега, при этом используются средние значения величины w_0 вагонов соответствующей весовой категории:

- легкой (Л): в неблагоприятных условиях;
- тяжелой (Т): в благоприятных условиях.

При этом моделируется накопление состава для отцепов, состоящих из одиночных вагонов.

Фактическая дальность пробега при моделировании определяется как среднее значение для серии из 500–1000 экспериментов по скатыванию одного и того же отцепа, что позволяет получать устойчивые результаты.

Рассмотрены различные варианты конфигурации продольного профиля с понижением значения уклона основной части сортировочного пути, вплоть до размещения всей основной части пути на площадке, а также варианты с постепенным понижением значений уклонов в пределах продольного профиля основной части (рис. 1).

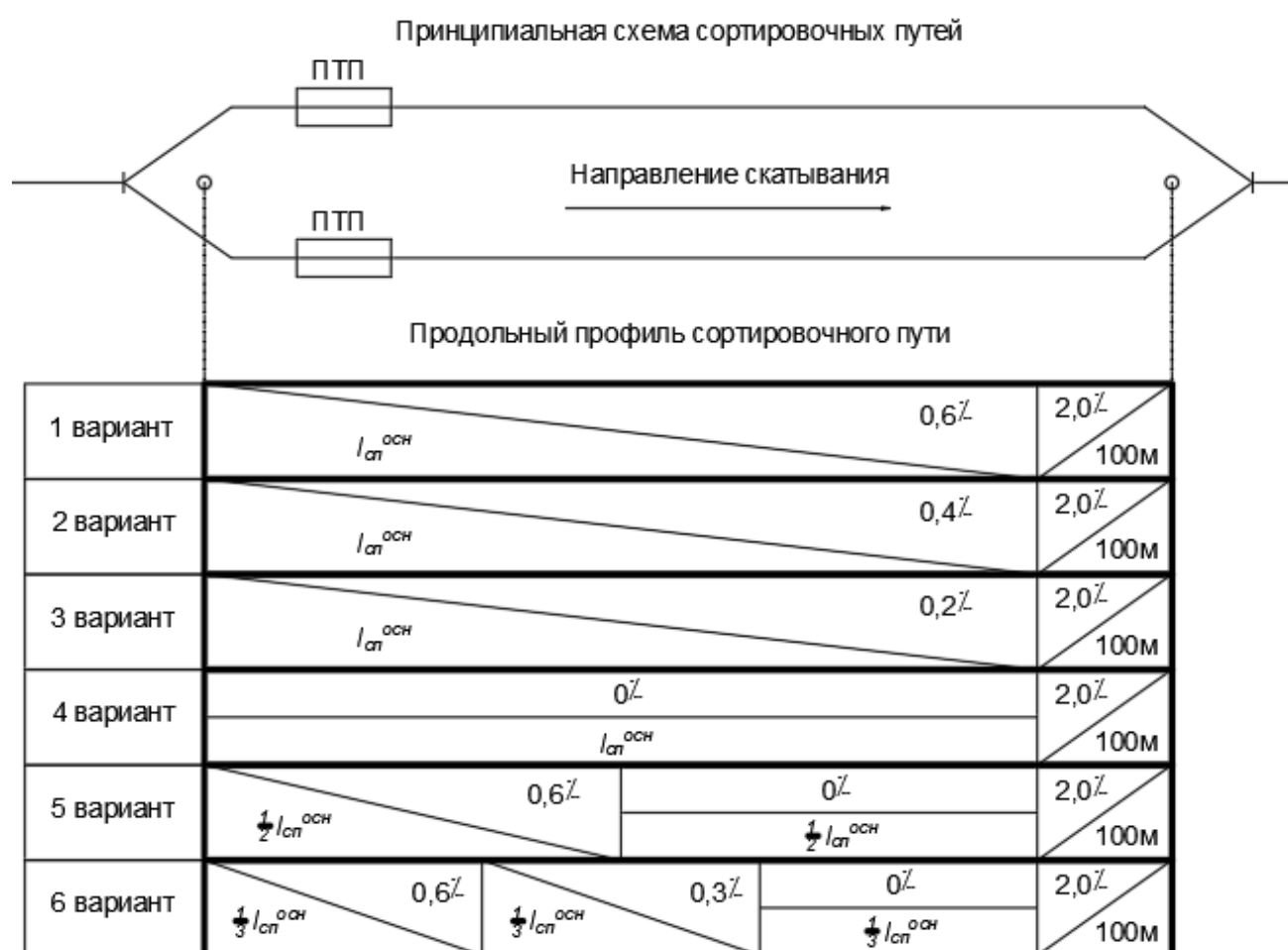


Рис. 1. Варианты конфигурации продольного профиля основной части сортировочного пути

При сравнении вариантов конфигурации продольного профиля основной части сортировочного пути производится скатывание отцепов, как в благоприятных, так и в неблагоприятных метеорологических условиях. При этом расчетные параметры среды и ветра определены по методике правил и норм проектирования сортировочных устройств 1992 года [14] – соответственно для одного расчетного месяца благоприятных и неблагоприятных условий, табл. 1. Принятые условия проведения экспериментов по сравнению вариантов конфигурации продольного профиля основной части сортировочного пути приведены в табл. 2.

Таблица 1

Расчетные метеорологические условия скатывания отцепов

Наименование характеристики	Неблагоприятные условия	Благоприятные условия
Расчетный месяц	Январь	Август
Расчетная температура воздуха, °C	–42,20	30,20
Расчетный румб	СВ	З
Расчетный угол обдувания, °	33,00	12,00
Расчетная скорость ветра, м/с	4,11	4,03

Таблица 2

**Условия проведения сравнения вариантов конфигурации продольного профиля
основной части сортировочного пути**

Наименование	Параметр	Порядок определения	Условия проведения расчетов
Группа общих данных			
Технические характеристики сортировочного пути	План	По существующим или проектным планам и продольным профилям сортировочного пути	Принимается постоянным для всех экспериментов
	Продольный профиль		Задается для каждого эксперимента
Условия неблагоприятные			
Расчетные условия среды и ветра	Температура воздуха, °С	Для расчетного месяца неблагоприятных условий	Принимаются постоянными для всех экспериментов
	Угол обдувания, °		
	Скорость встречного ветра, м/с		
Структура отцепопотока	Число вагонов в отцепе	1	Принимаются постоянным для экспериментов с одним и тем же отцепом
	Весовая категория	Легкая	
	Масса, т	Генерируется в рамках диапазона весовой категории Л	
	Основное удельное сопротивление движению, Н/кН	Генерируется по плотности распределения для категории Л	Определяется для каждого эксперимента
Условия благоприятные			
Расчетные условия среды и ветра	Температура воздуха, °С	Для расчетного месяца благоприятных условий	Принимаются постоянными для всех экспериментов
	Угол обдувания, °		
	Скорость попутного ветра, м/с		
Структура отцепопотока	Число вагонов в отцепе	1	Принимаются постоянным для экспериментов с одним и тем же отцепом
	Весовая категория	Тяжелая	
	Масса, т	Генерируется в рамках весовой категории Т	
	Основное удельное сопротивление движению, Н/кН	Генерируется по плотности распределения для категории Т	Определяется для каждого эксперимента

По результатам моделирования для каждого отцепа определяется результат достижения потребной дальности пробега и показатели скатывания по сортировочному пути. На рис. 2 представлен фрагмент выгрузки программы с результатами скатывания отцепа № 11, состоящего из одного вагона категории Л для разных значений величины w_0 (которые генерируются по заданной плотности распределения), на котором показаны:

- зеленым цветом случаи докатывания отцепа до стоящих в парке вагонов и соединения с ними с допустимой скоростью (значения скоростей соединения вагонов для каждого эксперимента в данном случае составили – 0,53, 0,56, 0, 87 и 1,01 м/с);
- желтым цветом случаи недокатывания отцепа до стоящей в парке группы вагонов с указанием средней длины образующегося окна (в приведенном примере – 5 м);
- красным цветом случаи соединения вагонов со скоростью, превышающей допустимое значение (значение скорости соударения также приводится для каждого результата моделирования – в приведенном примере 1,42 м/с).

Отцеп 11 из 1 вагонов		Результаты моделирования					
Суммарный вес отцепа т	27,00	g'	9,23				
Характеристики вагонов в отцепе (тип вес)	0,00	27,00					
Планируемая точка остановки м	128,00						
Движение 11 отцепа с начальной скоростью	2,77						
Основное удельное сопротивление движению отцепов	1,75	1,85	0,85	1,61	1,59	1,38	1,25
Точка остановки 1 оси отцепа м		123,00	128,00	128,00	128,00	128,00	128,00
Скорость отцепа м в с		0,00	1,42	0,53	0,56	0,87	1,01
Размер окна между отцепами м		5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
В среднем останавливается на 120 метре							
Процент столкновений с повышенной скоростью	5,60						
Процент остановок раньше точки прицеливания	45,40						
Процент соударений с допустимыми скоростями	49,00						

Рис. 2. Фрагмент файла выгрузки программы на примере скатывания отцепа № 11

Всего на путь поступило 67 отцепов из одиночных вагонов. Результаты моделирования скатывания отцепа № 11 (1000 итераций) представлены следующими показателями (см. рис. 2):

– вероятность p_1 (доля столкновений с повышенной скоростью) = 0,056 (здесь необходимо уточнить, что на автоматизированных горках в реальных условиях эксплуатации вероятность соударения вагонов с повышенной скоростью будет несколько ниже за счет более точного определения скорости выхода отцепов с ПТП, в том числе за счет использования результатов скатывания отцепа по спускной части до парковой тормозной позиции);

– вероятность p_2 (доля остановок раньше точки прицеливания) = 0,454;

– вероятность p_3 (доля случаев соединения вагонов с допустимыми скоростями) = 0,490.

Для каждой итерации (одного эксперимента по скатыванию отцепа) выполняется проверка условия распределения вероятностей, для данного примера:

$$0,056 + 0,454 + 0,490 = 1,000.$$

В целом для состава также определяются значения указанных вероятностей – соответственно P_1 , P_2 и P_3 . Пример распределения вероятностей, приходящихся в целом на накапливаемый состав, для варианта 1 (нормативного продольного профиля) соответственно для существующих и новых значений величины w_o вагонов легкой категории приведен на рис. 3.

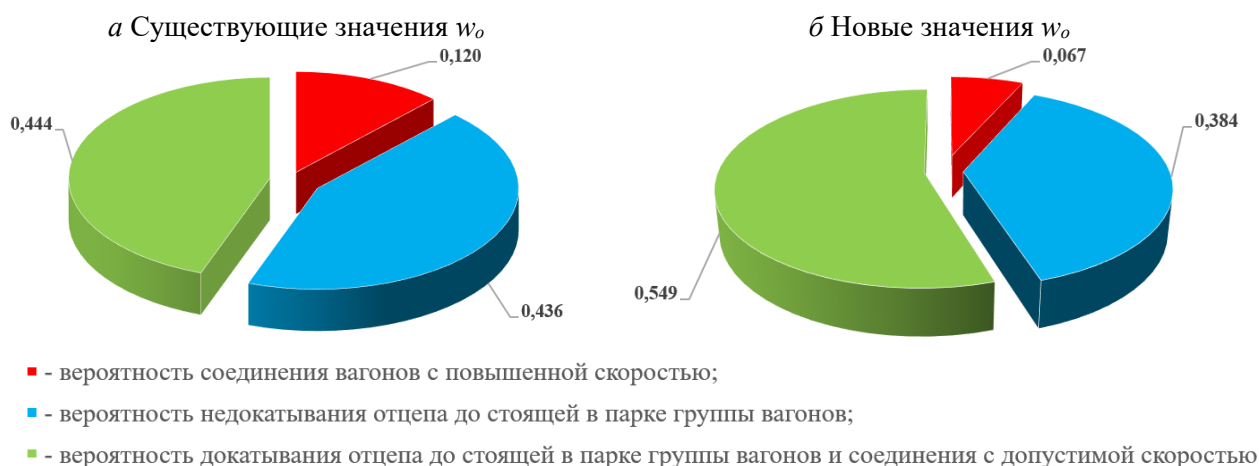


Рис. 3. Распределение показателей процесса накопления всего состава, (вариант 1, весовая категория Л, отцепы из одиночных вагонов)

По окончании имитации – полном заполнении сортировочного пути определяется среднее число осаживаний, приходящееся на один состав (N_{oc}), которое можно рассматривать в качестве комплексного критерия для оценки и сравнения вариантов конфигурации продольного профиля.

Результаты расчета вероятностей, характеризующих качество процесса заполнения путей накопления составов, для рассматриваемых вариантов приведены в табл. 3 (расчет выполнен для су-

существующих [15] и новых [4] значений основного удельного сопротивления движению). Цветом выделены наилучшие значения вероятностей по рассматриваемым вариантам (для соответствующих условий скатывания).

Таблица 3

Показатели процесса заполнения сортировочных путей при накоплении составов по вариантам конфигурации продольного профиля

Номер варианта	P_1		P_2		P_3		N_{oc}	
	w_o – существ.	w_o – новые	w_o – существ.	w_o – новые	w_o – существ.	w_o – новые	w_o – существ.	w_o – новые
Неблагоприятные условия, легкая весовая категория								
1	0,099	0,104	0,315	0,157	0,586	0,739	4	3
2	0,103	0,079	0,352	0,224	0,545	0,697	4	3
3	0,108	0,087	0,376	0,288	0,516	0,625	4	3
4	0,110	0,094	0,386	0,346	0,504	0,560	4	3
5	0,105	0,112	0,324	0,160	0,571	0,728	4	3
6	0,099	0,113	0,315	0,165	0,586	0,723	4	3
Благоприятные условия, тяжелая весовая категория								
1	0,120	0,067	0,436	0,384	0,444	0,549	4	4
2	0,126	0,064	0,439	0,380	0,434	0,557	4	4
3	0,111	0,060	0,458	0,376	0,432	0,564	4	4
4	0,105	0,062	0,443	0,367	0,452	0,571	4	4
5	0,117	0,066	0,436	0,353	0,447	0,581	4	3
6	0,110	0,066	0,440	0,361	0,450	0,573	4	3

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1 По вероятности превышения допустимой скорости соударения (P_1):

– для вариантов 1–4 не наблюдается линейной зависимости от значений уклона (конфигурации путей сортировочного парка);

– разброс значений вероятности в целом незначительный (максимум – 0,015 наблюдается для благоприятных условий);

– использование новых значений w_o приводит к снижению значений вероятности как в неблагоприятных, так и в благоприятных условиях;

– минимальные значения вероятности для новых и существующих значений w_o наблюдаются в соседних (по значениям уклонов) вариантах.

2 По вероятности недокатывания вагонов (P_2):

– с уменьшением значения уклона сортировочного пути вероятность недокатывания вагонов до прицельной точки остановки в целом увеличивается;

– диапазон разброса значений достигает при неблагоприятных условиях наибольшего для всех вероятностей значения 0,189;

– минимальные значения вероятности для новых и существующих значений w_o наблюдаются в одних и тех же (наилучших) вариантах.

3 По вероятности соответствия требованиям к процессу заполнения путей накопления (P_3):

– наилучшие показатели имеют варианты с большими значениями уклонов (варианты 1, 5 и 6);

– диапазон разброса значений достигает при неблагоприятных условиях 0,179.

4 По среднему числу осаживаний, приходящихся на один накапливаемый состав, при использовании новых значений w_o в целом заполнение путей накопления идет более качественно, что подтверждает улучшение ходовых свойств вагонов современного парка. Изменение параметра N_{oc} , наблюдаемое для различных вариантов в благоприятных условиях, приводит к корректировке значений вероятностей P_1 , P_2 и P_3 из-за изменения длины «окон» и оставшейся свободной части сортировочного пути от ПТП для следующего после выполнения осаживания отцепа.

Графическая интерпретация результатов расчета по вероятности превышения допустимой скорости соударения вагонов на примере варианта 5 приведена на рис. 4, согласно которому использование при моделировании параметров основного удельного сопротивления движению современного вагонного парка приводит к более интенсивному заполнению путей накопления составов (среднее число

осаживаний, приходящихся на один накапливаемый состав, по сравнению с существующими значениями w_o сокращается с 4 до 3). После накопления на сортировочном пути каждой группы вагонов вероятность p_1 резко увеличивается, что характерно для скатывания первых отцепов следующей группы вагонов на свободный после выполнения осаживания участок подгорочного пути.

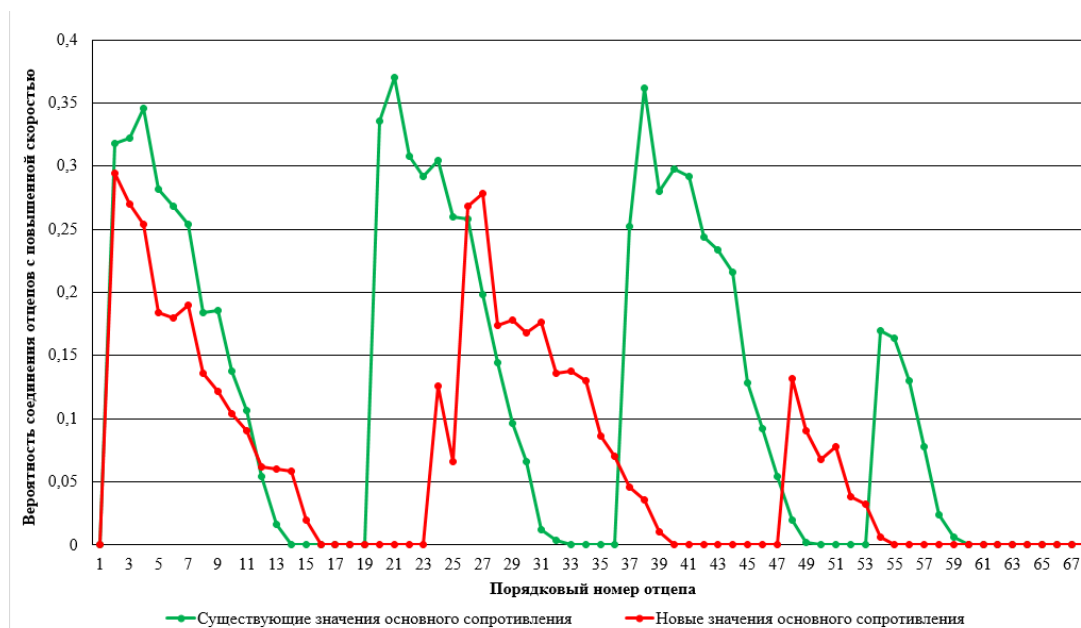


Рис. 4. Вероятность превышения допустимой скорости соударения вагонов (вариант 5 конфигурации продольного профиля, тяжелая весовая категория, условия благоприятные, отцепы из одиночных вагонов)

Согласно приведенным в табл. 3 результатам в целом наилучшие значения вероятностей наблюдаются для:

- варианта 1 при неблагоприятных условиях скатывания (и частично для варианта 6);
- варианта 5 при благоприятных условиях скатывания (в данном случае также учитывается меньшее потребное число осаживаний, необходимых для накопления состава).

Для определения наиболее рационального варианта дополнительно выполнено моделирование процесса заполнения сортировочного пути для вариантов 1, 5 и 6 при использовании расчетной структуры перерабатываемого отцепопотока, определенной на основании статистических данных о переработанных вагонопотоках на рассматриваемой сортировочной горке (при разном числе вагонов в отцепах – при этом для всех вариантов моделируется накопление одного и того же состава). Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Показатели процесса заполнения путей накопления составов для расчетной структуры перерабатываемого отцепопотока, варианты 1, 5 и 6 конфигурации продольного профиля

Номер варианта	P_1		P_2		P_3		N_{oc}	
	w_o – существ.	w_o – новые	w_o – существ.	w_o – новые	w_o – существ.	w_o – новые	w_o – существ.	w_o – новые
Неблагоприятные условия, легкая весовая категория								
1	10,87	8,40	47,74	32,36	41,40	59,25	2	2
5	11,45	8,05	47,21	33,36	41,34	58,60	2	2
6	11,50	8,07	46,87	33,32	41,64	58,62	2	2
Благоприятные условия, тяжелая весовая категория								
1	9,32*	12,00	40,98	16,11*	49,70	71,90	2	2
5	10,18	12,19	36,94	19,07	52,89	68,74	2	1
6	9,91	11,82	36,84	18,98	53,26	69,20	2	1
Примечание: * – вариант не принят в качестве наилучшего из-за меньшего числа осаживаний								

Результаты, приведенные в табл. 4, показывают очень близкие значения показателей по сравниваемым вариантам, при этом при благоприятных условиях для вариантов 5 и 6 среднее число осаживаний сокращается. В целом вариант 6 имеет наилучшие значения по всем показателям и принимается в качестве наиболее рационального варианта конфигурации продольного профиля.

Необходимо отметить, что генерация структуры расчетного отцепопотока и моделирование скатывания отцепов дифференцированной длины приводит к снижению необходимого среднего числа осаживаний, по сравнению с условиями моделирования скатывания отцепов из одиночных вагонов, что в целом соответствует реальным условиям функционирования сортировочных горок. Сравнение графиков изменения вероятности превышения допустимой скорости соударения вагонов для сравниваемых вариантов на примере благоприятных условий скатывания приведено на рис. 5. В данном случае на путь накопления поступило 20 отцепов с разным числом вагонов (общее число вагонов в составе – 67).

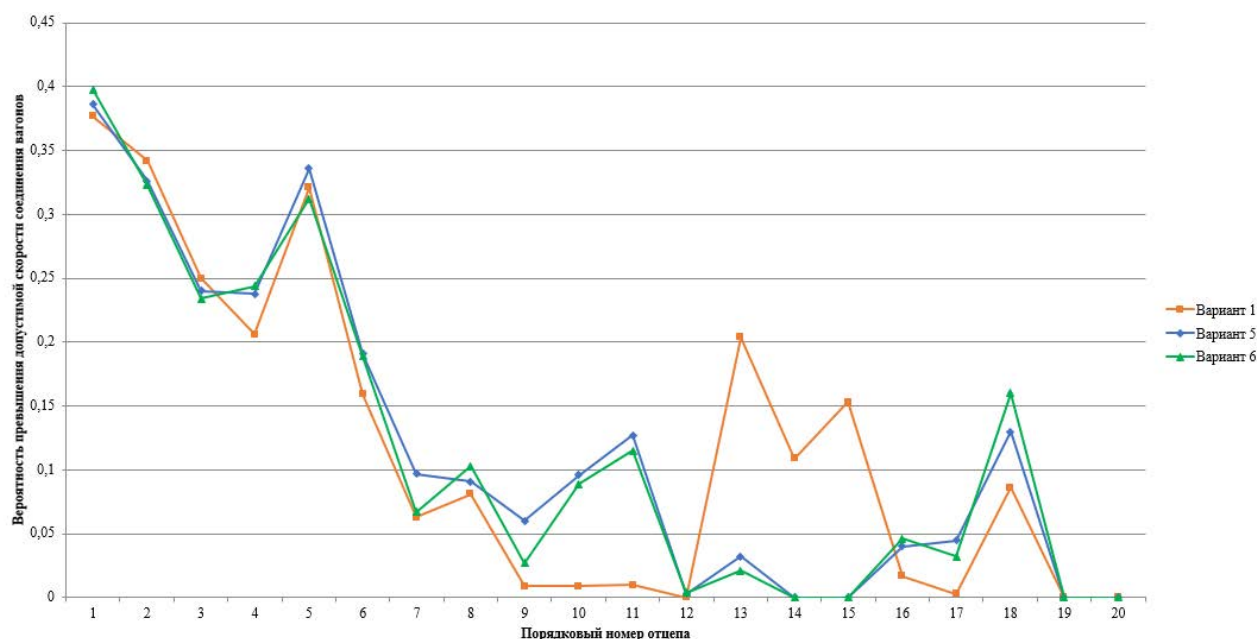


Рис. 5. Сопоставление вероятности превышения допустимой скорости соударения вагонов по вариантам конфигурации продольного профиля (категория Т, условия благоприятные, генерация расчетного отцепопотока по числу вагонов в отцепе, w_o – новые)

На рис. 5 показано, что при заполнении пути накопления вероятность соединения вагонов с повышенной скоростью в целом будет ниже для варианта 6 при одинаковом среднем числе осаживаний, что и подтверждает выбор данного варианта конфигурации продольного профиля в качестве рационального для рассматриваемой сортировочной горки.

Выводы

Разработанный метод оценки конфигурации продольного профиля основной части путей сортировочного парка на основании имитационного моделирования процесса заполнения путей накопления составов позволяет определять следующие показатели, которые могут использоваться для анализа и сравнения конкурирующих вариантов: вероятность соударения отцепов со стоящей на сортировочном пути накапливаемой группой вагонов с повышенной скоростью; вероятность остановки отцепа ранее точки прицеливания; вероятность докатывания отцепа до стоящей в парке группы вагонов и соединения с допустимыми скоростями. В качестве комплексного критерия рекомендуется рассматривать среднее количество осаживаний, приходящееся на один накапливаемый состав. Для определения наиболее рационального варианта рекомендуется производить моделирование процесса заполнения путей накопления как в неблагоприятных, так и в благоприятных условиях скатывания, используя в качестве отцепов одиночные вагоны соответственно легкой и тяжелой весовых категорий. Для принятия окончательного решения при необходимости следует выполнить моделирование процесса заполнения путей накопления составов для расчетной структуры отцепопотока, сформированной на основании анализа статистических данных о переработанном вагонопотоке на рассматриваемой сортировоч-

ной горке. При получении результатов с незначительно отличающимися показателями процесса заполнения сортировочных путей предпочтение целесообразно отдавать варианту с наименьшим значением вероятности превышения допустимой скорости соударения вагонов.

Предложенный метод позволяет определять рациональную конфигурацию продольного профиля сортировочных путей, что подтверждает возможность определения конструктивных параметров сортировочных парков расчетным путем с учетом специфики технического оснащения, особенностей технологии расформирования составов, структуры перерабатываемого отцепопотока и расположения на местности конкретной сортировочной горки.

Список литературы

- 1 Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / В. П. Волков, И. П. Старшов, Е. А. Сотников, А. И. Арбузин ; под редакцией Е. А. Сотникова. – Москва : Транспорт, 1975. – 102 с.
- 2 Компьютерное зрение как способ интеллектуализации систем горочной автоматизации / И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, А. М. Лященко [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 1. – С. 46–53. – DOI 10.52261/02346206_2022_1_46.
- 3 **Бессоненко, С. А.** Исследование основного удельного сопротивления движению отцепов при скатывании с сортировочной горки на основе натурных наблюдений / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (63). – С. 62–68. – DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_62.
- 4 Исследование параметров основного удельного сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки / С. А. Бессоненко, А. А. Гунбин, А. А. Климов [и др.] // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 53–62. – ISSN 2220-4245.
- 5 СП 119.13330.2024. СНиП 32-01-95. Свод правил. Железные дороги колеи 1520 мм: утверждено Министерством утверждено Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 01.07.2024, № 432/пр // Минстрой России : официальный сайт. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/375821/> (дата обращения: 10.06.2025).
- 6 **Климов, А. А.** Анализ уклона сортировочных путей в современных условиях эксплуатации / А. А. Климов // Пятая международная научно-практическая конференция «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах»: сборник научных трудов : в 2 частях / под редакцией О. С. Валинского, А. А. Краснощека, П. К. Рыбина ; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2023. – Ч. 1. – С. 85–94.

References

- 1 Resistance to the movement of freight cars when rolling down humps / V. P. Volkov, I. P. Starshov, E. A. Sotnikov, A. I. Arbuzin ; edited by E. A. Sotnikov. Moscow : Transport, 1975. – 102 p.
- 2 Computer vision as a way to intellectualize hump automation systems / I. A. Olgeizer, A. V. Sukhanov, A. M. Lyashchenko [et al.] // Problems of mechanical engineering and automation, – 2022. – No. 1. – P. 46–53. – DOI 10.52261/02346206_2022_1_46.
- 3 **Bessonenko, S. A.** Study of the main specific resistance to the movement of cuts when rolling down a hump based on field observations / S. A. Bessonenko, A. A. Gunbin, A. A. Klimov // The Siberian Transport University Bulletin. – 2022. – No. 4 (63). – P. 62–68. – DOI 10.52170/1815-9265_2022_63_62.
- 4 Study of the parameters of the main specific resistance to the movement of cars when rolling down a hump yard / S. A. Bessonenko, A. A. Gunbin, A. A. Klimov [et al.] // Journal of Transsib Railway Studies. – 2023. – No. 1 (53). – P. 53–62. – ISSN 2220-4245.
- 5 SP 119.13330.2024. SNiP 32-01-95. Code of rules. 1520 mm gauge railways: approved by Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, 01.07.2024, No. 432/pr // Ministry of Construction of Russia : official website. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/375821/> (date of access: 06/10/2025).
- 6 **Klimov, A. A.** Analysis of the slope of sorting tracks in modern operating conditions / A. A. Klimov // Fifth International scientific and practical conference "Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems" : collection of scientific works : in 2 parts / edited by O. S. Valinsky, A. A. Krasnoshchek, P. K. Rybin ; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. – St. Petersburg, 2023. – Part 1. – P. 85–94.

7 **Климов, А. А.** Оценка качества режима прицельного торможения отцепов при роспуске составов с сортировочных горок / А. А. Климов // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : Труды международной научно-практической конференции. – Москва : Университетская книга, 2023. – С. 56–61.

8 **Корниенко, К. И.** Исследование влияния изменения профиля пути сортировочного парка на качество его заполнения при расформировании составов / К. И. Корниенко // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3 (39). – С. 33–42. – DOI 10.20291/2079-0392-2018-3-33-42.

9 **Корниенко, К. И.** Исследование влияния профиля сортировочного парка на скорость движения отцепа / К. И. Корниенко // Инновационные технологии на транспорте : образование, наука, практика : Материалы XLI Международной научно-практической конференции / под редакцией Б. М. Ибраева. – Том 1. – Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017. – С. 11–15.

10 **Ефимов, Р. А.** Критерии оценки продольного профиля сортировочных путей при аттестации на возможность безопасного роспуска вагонов-цистерн для перевозки опасных грузов 2 класса / Р. А. Ефимов, А. Ю. Тимкова, Л. С. Шорохова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2 (82). – С. 129–136. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_129.

11 **Саврухин, А. В.** Требования к техническому оснащению и технология работы станции для обеспечения безопасного роспуска с горки вагонов-цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов / А. В. Саврухин, Н. А. Коваленко, Р. А. Ефимов // Тенденции развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом : Материалы международной юбилейной научно-технической конференции, посвященной 95-летию кафедр «Железнодорожные станции и транспортные узлы», «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте». – Москва : Российский университет транспорта, 2020. – С. 55–61.

12 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618062 Российская Федерация. Программа для расчета показателей процесса заполнения путей сортировочного парка / А. А. Климов, А. А. Гунбин. – Заявка № 2023616946 от 8.04.2023.

13 **Климов, А. А.** Принципы моделирования процесса заполнения путей сортировочного парка при расформировании составов /

7 **Klimov, A. A.** Evaluation of the quality of the targeted braking mode of uncouplings when breaking up trains from hump yards / A. A. Klimov // Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov – the founder of transport science : Proceedings of the international scientific and practical conference. – Moscow : University Book, 2023. – P. 56–61.

8 **Kornienko, K. I.** Study of the impact of changing the track profile of the marshalling yard on the quality of its filling when breaking up trains / K. I. Kornienko // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2018. – No. 3 (39). – P. 33–42. – DOI 10.20291/2079-0392-2018-3-33-42.

9 **Kornienko, K. I.** Study of the influence of the marshalling yard profile on the speed of the uncoupling / K. I. Kornienko // Innovative technologies in transport: education, science, practice : Materials of the XLI International scientific and practical conference / edited by B. M. Ibraev. – Volume 1. – Almaty : Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev, 2017. – P. 11–15.

10 **Efimov, R. A.** Criteria for assessing the longitudinal profile of sorting tracks during certification for the possibility of safe dissolution of tank cars for the transportation of dangerous goods of class 2 / R. A. Efimov, A. Yu. Timkova, L. S. Shorokhova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2021. – № 2 (82). – P. 129–136. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_129.

11 **Savrukhin, A. V.** Requirements for technical equipment and operating technology of the station to ensure safe hump disbanding of tank cars for transporting liquefied hydrocarbon gases / A. V. Savrukhin, N. A. Kovalenko, R. A. Efimov // Trends in the development of railway transport and transportation process management : Materials of the international jubilee scientific and technical conference dedicated to the 95th anniversary of the departments "Railway stations and transport junction", "Management of operational work and safety in transport." – Moscow : Russian University of Transport, 2020. – P. 55–61.

12 Certificate of state registration of computer program No. 2023618062 Russian Federation. Program for calculating the indicators of the process of filling the tracks of the marshalling yard / A. A. Klimov, A. A. Gunbin. – Application No. 2023616946 dated 08.04.2023.

13 **Klimov, A. A.** Principles of modeling the process of filling the tracks of the sorting park during

А. А. Климов // Политранспортные системы : Материалы XII Международной научно-технической конференции. В 3 ч. Ч. 3. – Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 126–131.

14 Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР : ВСН 207–89 / МПС СССР. – Москва : Транспорт, 1992. – 104 с.

15 Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм : утверждены МПС РФ 10.10.03. – Москва : Техинформ, 2003. – 168 с.

the disbandment of trains / A. A. Klimov // Polytransport systems : Materials of the XII International scientific and technical conference. In 3 parts. – Novosibirsk : Siberian Transport University, 2022. – P. 126–131.

14 Rules and standards for the design of sorting devices on the railways of the USSR : VSN 207-89 / MPS USSR. Moscow : Transport, 1992. – 104 p.

15 Rules and regulations for design of sorting devices on 1520 mm gauge railways : approved by approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation on 10.10.03. – Moscow : Tekhinform, 2003. – 168 p.

A. A. Klimov

THE METHOD OF STUDYING THE CONFIGURATION OF THE LONGITUDINAL PROFILE OF THE MAIN PART OF THE SORTING YARD TRACKS

Abstract. An overview of modern research on the design of the longitudinal profile of marshalling yards is given. The analysis of the current regulatory requirements for the design of the longitudinal profile of the sorting tracks and methods for regulating the speed of rolling off cuts when detaching from the gravity humps is carried out. A description of a simulation model of filling the tracks of train accumulation during detaching is presented, which is used to study the configuration of the longitudinal profile of the main part of the tracks of marshalling yards. Criteria have been established for assessing the configuration of the longitudinal profile of the main part of the marshalling yard tracks, based on the calculation of probabilities characterizing the indicators of the process of filling the tracks of train accumulation during disbandment. A methodology for assessing the design parameters and configuration of the longitudinal profile of the main part of marshalling tracks has been developed based on simulation modeling of the process of filling the tracks for accumulation of trains using the interval-targeted speed control mode for rolling off cuts. A study of various configuration options for the longitudinal profile of the main part of the tracks of the marshalling yard for existing and new values of the main specific resistance to movement of cars when rolling down a hump has been carried out.

Keywords: main specific resistance to movement, marshalling yard, simulation modeling of the filling process, car collision speed, uncoupling range, rolling speed control modes, longitudinal profile configuration.

For citation: Klimov, A. A. The method of studying the configuration of the longitudinal profile of the main part of the sorting yard tracks / A. A. Klimov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 195–207. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_195.

Сведения об авторах

Климов Александр Александрович
Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Железнодорожные станции
и узлы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: a-aklimov@yandex.ru

Information about the authors

Klimov Alexander Alexandrovich
Siberian Transport University (STU),
Chair “Railway Stations and Junctions”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: a-aklimov@yandex.ru

*Е. Е. Мизгирева***ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ В КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА**

Аннотация. В условиях динамичных экономических и геополитических изменений важно предусмотреть механизмы адаптации, позволяющие быстро модифицировать узловые транспортно-технологические процессы работы в соответствии с актуальными требованиями и обстоятельствами. Предварительная и последующая программная оценка параметров узлового инфраструктурно-технологического взаимодействия на всех этапах компоновочных решений позволяет делать выводы о принципах формирования зон и объектов, соответствии видов транспорта и пунктов узлового взаимодействия, а также местах их размещения. Для этих целей проведен сравнительный анализ показателей зон узла в зависимости от степени их воздействия на структуру узла согласно критериям теории принятия решений, методам кластерного анализа, позволяющим оценивать объекты внутри одной зоны (кластера) и выявлять скрытые структуры в наборе данных, определять группы объектов, их схожесть и различия. Разработан программный комплекс выбора рациональных параметров объектов в компоновочных решениях транспортного узла согласно авторской модификации традиционного генетического алгоритма (ГА) в генетический компоновочный алгоритм транспортного узла (ГКА ТУ), учитывающий случайный выбор, нечеткие множества параметров, комбинаторику и вариацию массивов больших данных с использованием аналогий естественного отбора.

Ключевые слова: транспортный узел, узловые зоны, компоновочные решения, кластерный анализ, коэффициент дивергенции, теория принятия решений, генетический компоновочный алгоритм, параметры эффективности размещения, программный комплекс.

Для цитирования: Мизгирева, Е. Е. Программный комплекс выбора рациональных параметров объектов инфраструктуры в компоновочных решениях транспортного узла / Е. Е. Мизгирева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 208–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_208.

Введение

В условиях экономической неустойчивости, санкционных воздействий и политических осложнений меняются номенклатура грузов и транспортно-логистические цепочки, что приводит к нечеткости принципов параметризации узловых транспортно-технологических процессов. Это требует разработки гибких методов компоновки узлов, способных учитывать сложноформализуемые факторы и адаптироваться к рыночным изменениям, минимизируя риски неопределенности. Для оптимизации проектирования и работы транспортных узлов важна интеграция программных средств и анализа больших данных. Также необходимы механизмы быстрой адаптации и новые схемы взаимодействия участников транспортных процессов для повышения эффективности и устойчивости всей узловой системы.

Основная часть

Следует отметить, что для узловой системы управления присуща полиструктурность [1]. Полиструктурность производственно-хозяйственных организаций означает наличие производственной, социальной и технологической структур, а также структуры управления. Применительно к транспортным узлам выделяются селитебная, производственно-заводская, транспортно-складская, защитная и рекреационная зоны, а их совокупность рассматривается как единая организационная структура (табл. 1).

Предварительная перспективная параметризация узлового инфраструктурно-технологического взаимодействия позволяет делать выводы о принципах формирования зон, соответствии видов транспорта и пунктов узлового взаимодействия (аэропорт, порт, вокзал, грузовой терминал и т. п.), а также мест их размещения. Разработка подходов к компоновочным решениям в связи с изменением классификационных признаков узлов и использованием инновационных видов транспорта должна производиться на начальной стадии планирования и проектирования с учетом передовых научных и технологических решений [3].

Таблица 1

Принципы блочно-модульных компоновочных решений узла [2]

Тип зоны	Теоретические основы компоновки территории	Планировочные (географические) требования	Технологические требования
СЗ (селитебная)	Базируется на правильных сетях, статистическом анализе данных о росте и размещении населения (экономико-географический метод, теория графов, сетевые модели и др.)	Размещение от железной дороги или автодороги не менее 200 м, по наветренной стороне по отношению к ПЗЗ; используются прямоугольные и радиальные системы планировки	Согласно правилам и нормам проектирования
ПЗЗ (промышленно-заводская)	Определяется технологией производства и градостроительными правилами (технологические модели, схемы производственных потоков, планировка цехов и т. п.)	Предварительный анализ взаимного расположения с зонами ТСЗ, ЗЗ, СЗ; устраиваются несколько КПП, располагаются в пределах 1,5 км; принцип совместного использования существующих сооружений и устройств	Разделение потоков работников и заводского транспорта, обеспечение доступности рабочих мест
ТСЗ (транспортно-складская)	Базируется на правильных сетях, статистическом анализе данных, прогнозных моделях транзитных и местных грузовых перевозок (теория графов, сетевые модели, задача коммивояжера, транспортная задача в закрытой и открытой формах и др.)	Оценка топографических, естественно-географических и др. условий; блочно-модульный принцип планировки	Последовательность и непрерывность процессов
ЗЗ (защитная)	Определяется градостроительными нормами, «розой» ветров (географические, санитарные, экологические, погодные условия и др.)	Ширина определяется классом вредности: I класс – 1000 м, II класс – 500 м, III класс – 300 м, IV класс – 100 м, V класс – 50 м	Максимальное снижение вредного воздействия предприятий и производств на окружающую среду
РЗ (рекреационная)	Определяется географическими, природно-ландшафтными условиями, экологическими, градостроительными правилами и нормами	Использование уникальных природно-климатических и ландшафтных характеристик территории	Соблюдение требований доступности для населения, охраны окружающей среды

Предлагается следующая стратегия вариантов компоновочных решений узловых объектов с учетом принципа блочно-модульного зонирования территории (рис. 1).

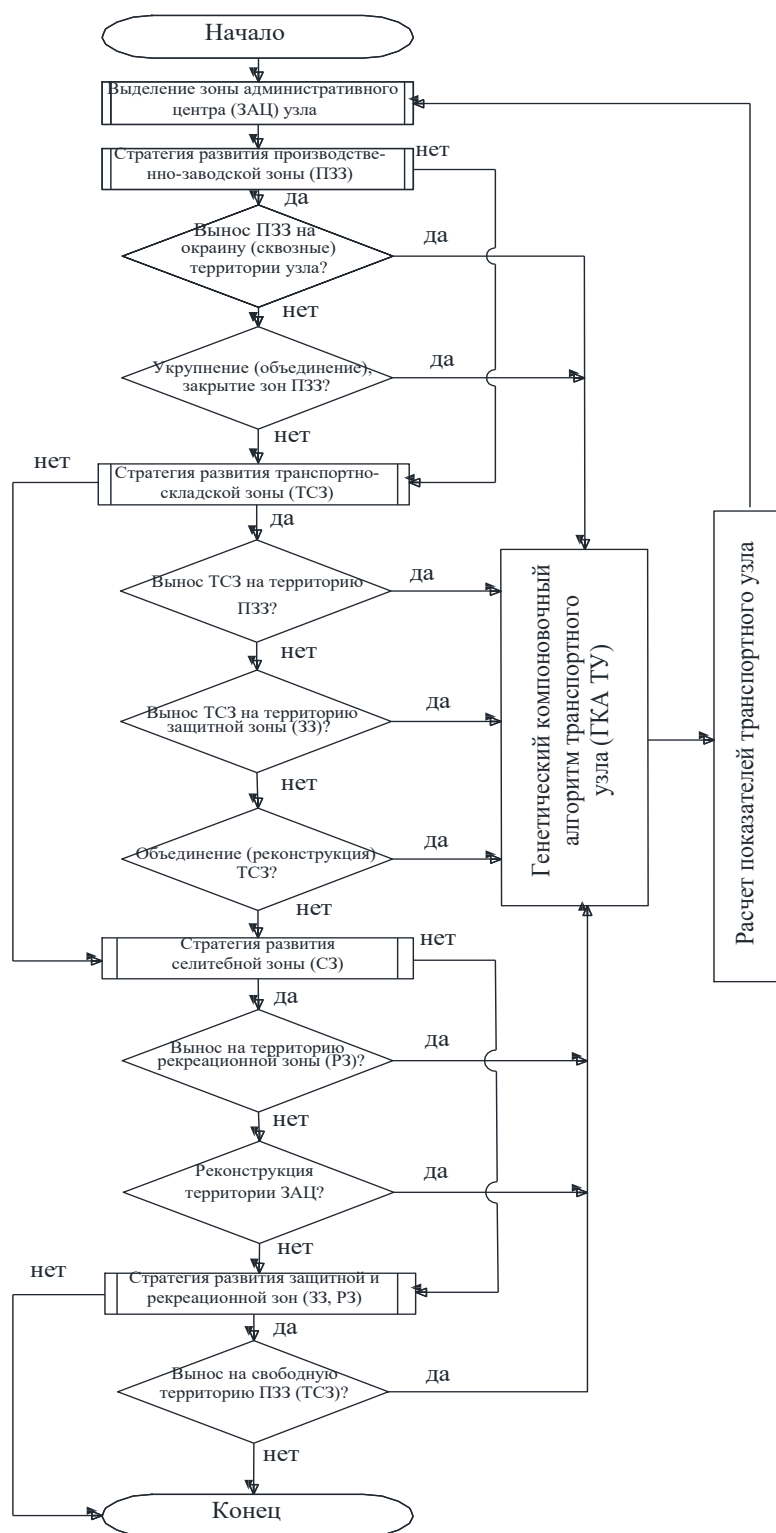


Рис. 1. Алгоритм последовательности выбора узловых компоновочных решений

При выборе вариантов компоновочных решений объектов узла также необходимо учитывать и так называемую постоянную зону больших и крупнейших узлов, внутри которой находятся важные административные, культурные, исторические объекты, – зону административного центра транспортного узла (ЗАЦ).

Для универсальной оценки показателей узловой транспортной инфраструктуры хорошо зарекомендовала себя система классов и балльного рейтинга. В соответствии с [4] класс узла $R \in \{0; 100\}$ формируется из множества значений подклассов показателей $R_{\text{узла}} \in \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, причем каждый

подкласс является в свою очередь подмножеством собственных показателей. Предлагаемая перспективная балльная классификационная система узлов включает в себя I, II, III, IV и V классы. Балльный R-рейтинг узла каждого класса включает по 20 баллов [3].

Для оценки предлагается использовать коэффициент дивергенции (CD), показывающий степень рассеяния компоновок зон и объектов внутри узла (кластера) и помогающий определить их принадлежность к одному кластеру (зоне). Меньшее значение коэффициента CD указывает на большую однородность кластера.

$$CD(TY) = \sqrt{\frac{1}{p} \left\{ \sum_{k=1}^p \left(\frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ki} + x_{kj}} \right)^2 \right\}},$$

где x_{ki} – абсцисса k -объекта узла (зоны), x_{kj} – ордината k -объекта узла (зоны), p – количество объектов в зоне (узле).

При «идеальных» условиях компоновки инфраструктуры рейтинг узла $R \rightarrow \max$ (100 баллов), а коэффициент дивергенции $CD \rightarrow \min$ (0,01), результаты размещения (объединения, модификации) оцениваются коэффициентом степени развитости инфраструктуры ψ по формуле

$$\psi = \frac{R}{\{CD\} \cdot 10^3},$$

где R – значение балльного рейтинга узла, CD – значение коэффициента дивергенции.

Рациональные компоновки соответствуют стратегии $\psi \rightarrow |1|$, т. е. расположение объектов инфраструктуры транспортного узла соответствует степени его развитости, иными словами, перспектива дальнейшего развития узла возможна лишь при кардинальном изменении его структуры. Чем больше $\Delta = |1 - \psi|$, тем больше разрыв между степенью развитости узла и рациональностью расположения объектов ТУ.

Постановка задачи

На заданной территории транспортного узла при известных положениях точек входа и выхода грузо- и пассажиропотока, положениях центров транспортных нагрузок зон (объектов, предприятий и производств), вариативных параметров и направлений их развития (переноса, объединения, модификации) необходимо таким образом разместить зоны (объекты, предприятия и производства), чтобы сумма транспортных расходов на завоз-вывоз грузов и пассажиров была минимальна при рациональном значении общесистемных показателей оценки компоновочного решения узловых инфраструктуры.

Функция имеет вид:

$$P = \arg \min_T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p \left(C_{ijk}^{жд} \cdot A^T \{ \mu(L_{(CD)}^*) \}_{ijk}^{жд} \cdot Q_{ijk}^{жд} + C_{ijk}^{авт} \cdot A^T \{ \mu(L_{(CD)}^*) \}_{ijk}^{авт} \cdot Q_{ijk}^{авт} + C_{ijk}^{вод} \times \right. \\ \left. \times A^T \{ \mu(L_{(CD)}^*) \}_{ijk}^{вод} \cdot Q_{ijk}^{вод} + C_{ijk}^{\Gamma T} \cdot A^T \{ \mu(L_{(CD)}^*) \}_{ijk}^{\Gamma T} \cdot a_{ijk}^{\Gamma T} + \dots + B_{ijk} \cdot E_n \right),$$

где $i = 1, \dots, n$ – номер зоны (объекта узла); $j = 1, \dots, m$ – абсцисса центра зоны (объекта); $k = 1, \dots, p$ – ордината центра зоны (объекта); C – стоимость перевозки, руб/т-км (руб/пасс-км); Q – объем перевозок i -й зоны узла, т; a – количество перевезенных пассажиров i -й зоны узла, пасс.; $A^T \{ \mu(L_{(CD)}^*) \}$ – матрица модифицированных расстояний перевозки грузов и пассажиров видов транспорта с учетом коэффициента дивергенции зоны узла в условиях нечеткой постановки задачи; B – капитальные затраты на реконструкцию (строительство) зоны узла по варианту размещения, млрд руб.; E_n – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений.

При ограничениях: $C \geq 0$, $Q \geq 0$, $L \geq 0$, $a \geq 0$, $(A^T)^T = A$.

Таким образом, решается многокритериальная транспортная задача в нечеткой формулировке по критериям рациональности: 1) необходимо наиболее рациональным образом на заданной территории разместить зоны (объекты, предприятия и производства) транспортного узла (методы теории графов, экономико-математический подход, математическая статистика, морфологический анализ); 2) необходимо обеспечить максимальную пропускную способность транспортной инфраструктуры и рациональные показатели компоновочного решения с учетом особенностей внутриузловых взаимодействий зон (методы теории принятия решений, теории систем и кластерного анализа); 3) необходимо учесть возможность перспективного развития узловых зон и объектов, а также узла в целом с учетом сложноформализуемых факторов (метод анализа иерархий и штрафных функций, эволюционная теория, теория активных систем и нечетких множеств).

Для решения задачи разработан новый метод поиска компоновочных решений инфраструктурных объектов транспортного узла, основанный на авторской модификации традиционного генетического алгоритма (ГА) в генетический компоновочный алгоритм транспортного узла (ГКА ТУ), учитывающий случайный выбор, нечеткие множества параметров зон, комбинаторику и вариацию массивов больших данных с использованием аналогий естественного отбора [6]. Этот метод относится к семейству эволюционных вычислений, где оптимизационные задачи решаются через использование принципов естественной эволюции, таких как наследование (развитие), мутации (модификация), отбор (выбор) и кроссинговер – «скрещивание» (объединение) [7]. Последовательность алгоритма кроссингвера для зон ТУ приведена на рис. 2.

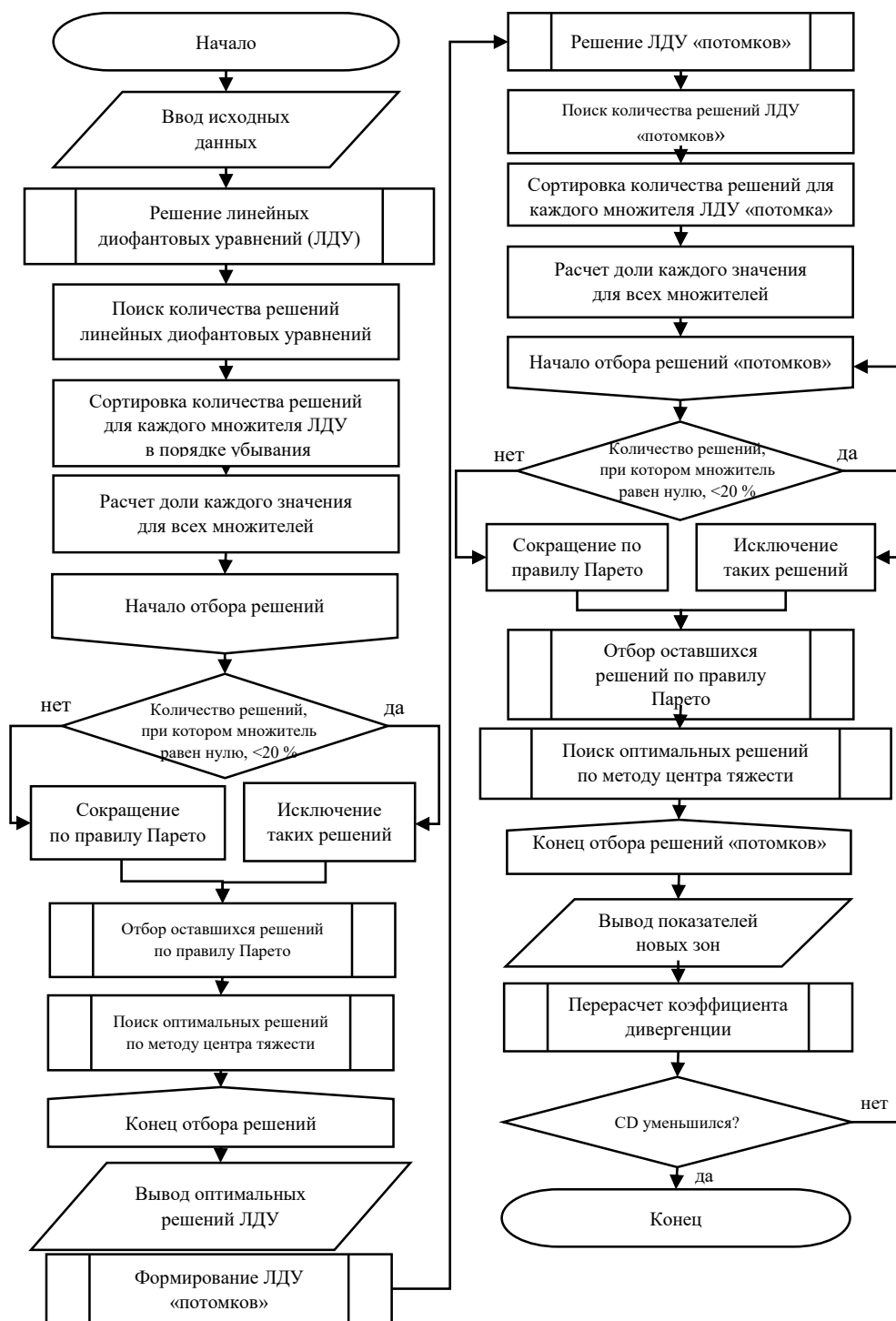


Рис. 2. Алгоритм кроссингвера (объединения) зон транспортного узла в ГКА ТУ и выбора параметров новой зоны

В ГКА ТУ используются эволюционные стратегии:

А) стратегия «только мутация» (модификация зон) с пропорциональным оператором селекции;

Б) стратегия с рекомбинацией (τ , k). Такой оператор рекомбинации предполагает две зоны – «родителей» и одну зону – «потомка». Параметры τ и k может также устанавливать пользователь. Ограничения на параметры имеют следующий вид: $\tau = 1, \dots, l_x - 1$; $k = 1, \dots, \tau$, где l_x – длина «хромосомы» (количество параметров зон размещения).

При размещении согласно ГКА ТУ «хромосома» зоны кодируется списком пар {«номер гена», «значение гена»}, «номер гена» – это номер размещаемого транспортного объекта, а «значение гена» – пара координат центра тяжести размещаемой зоны. «Номер гена» – это целое число, а координаты – два вещественных числа.

Экспериментально исследуются следующие сочетания зон «родителей» и зон «потомков» согласно разработанному алгоритму «размножения»: выбираются пары «родителей» («родитель1» – P1 и «родитель2» – P2) – пары зон ТУ, у которых за счет объединения будет по одному «потомку» («П(1,2)») – новой зоны ТУ с параметрами преобладания данных P1 или P2 согласно стратегии развития узла (рис. 3).

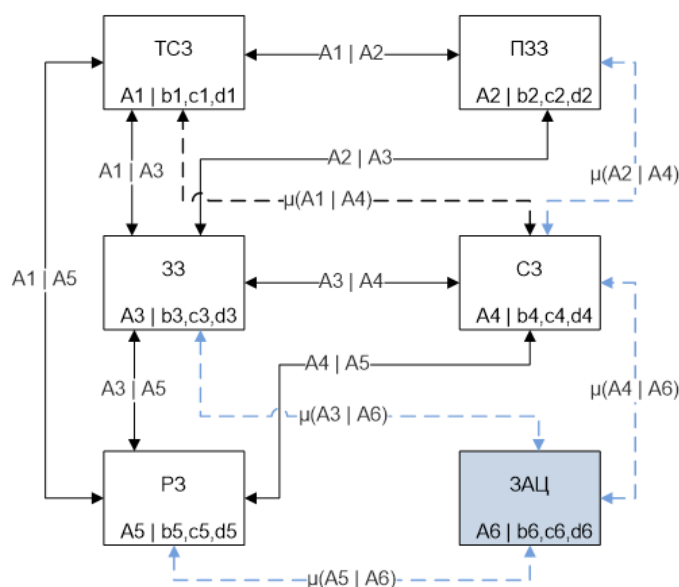


Рис. 3. Алгоритм «размножения» (объединения/перемещения) зон узла в ГКА ТУ [6]

Например, согласно рис. 3 получены варианты – (1, 2), (1, 3), (2, 3), (3, 5), (3, 4), (4, 5), (1, 5), возможные «мутации» (модификации) – соответственно $\mu(1, 4)$, $\mu(3, 6)$, $\mu(5, 6)$, $\mu(4, 6)$, $\mu(2, 4)$.

Решается задача объединения, модификации или ликвидации зон узловых объектов при реконструкции (развитии) ТУ. Для этого используется модифицированный алгоритм «размножения» ГКА ТУ: выбираются пары «родителей» («родитель1» – P1 и «родитель2» – P2) – пары зон ТУ, у которых за счет объединения будет по одному «потомку» П(1,2) – новой зоне ТУ с параметрами преобладания данных P1 или P2. Для этого используется «кроссинговер» вида «|». При модификации объектов узла согласно ГКА ТУ «хромосома» кодируется списком $(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i)$ – набором шести укрупненных параметров i -й транспортной зоны, определенным в безразмерных величинах [6]. Например, общий вид комбинаторики выбора параметров для зон и их «потомка» – новой зоны «X.-P1 \wedge X.-P2 \rightarrow X.-П(1,2)» – показан на рис. 4.

$$\left(\begin{array}{l} \text{X.-P1: } a_1 | b_1, c_1, d_1, e_1, f_1 \text{ X.-P2: } a_2 | b_2, c_2, d_2, e_2, f_2 \text{ X.-П(1,2): } a_1, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2 \text{ or } a_2, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1; \\ \text{X.-P1: } a_1, b_1 | c_1, d_1, e_1, f_1 \text{ X.-P2: } a_2, b_2 | c_2, d_2, e_2, f_2 \text{ X.-П(1,2): } a_1, b_1, c_2, d_2, e_2, f_2 \text{ or } a_2, b_2, c_1, d_1, e_1, f_1; \\ \text{X.-P1: } a_1, b_1, c_1 | d_1, e_1, f_1 \text{ X.-P2: } a_2, b_2, c_2 | d_2, e_2, f_2 \text{ X.-П(1,2): } a_1, b_1, c_1, d_2, e_2, f_2 \text{ or } a_2, b_2, c_2, d_1, e_1, f_1; \\ \text{X.-P1: } a_1, b_1, c_1, d_1 | e_1, f_1 \text{ X.-P2: } a_2, b_2, c_2, d_2 | e_2, f_2 \text{ X.-П(1,2): } a_1, b_1, c_1, d_1, e_2, f_2 \text{ or } a_2, b_2, c_2, d_2, e_1, f_1; \\ \text{X.-P1: } a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 | f_1 \text{ X.-P2: } a_2, b_2, c_2, d_2, e_2 | f_2 \text{ X.-П(1,2): } a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_2 \text{ or } a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_1; \end{array} \right)$$

Рис. 4. Варианты выбора параметров для X.-P1 \wedge X.-P2 \rightarrow X.-П(1,2)

Составляются и решаются системы линейных диофантовых уравнений (ЛДУ) параметров зон вида:

$$T \cdot a_i + L \cdot b_i + B \cdot c_i + S \cdot d_i + A \cdot e_i + P \cdot f_i = R_{\text{ТУ} i},$$

где T – безразмерный показатель, характеризующий количество видов транспорта зоны; L – показатель длины зоны; B – показатель ширины зоны; S – показатель площади зоны; A – показатель населенности зоны; P – специальный градостроительный показатель зоны.

Следует отметить, что при данном подходе в решении задачи размещения объектов транспортного узла необходимо формирование и эффективное использование больших массивов данных, для обработки которых использованы библиотеки языка программирования Python и разработан программный комплекс ОП ГКА v. 1.0, результаты работы которого представлены на рис. 5–7.

```

15 solutions = []
16 if T == 0 and L == 0 and B == 0 and S == 0 and A == 0 and P == 0:
17     if R == 0:
18         print("Бесконечно много решений, так как все коэффициенты равны 0 и R также 0.")
19     else:
20         print("Нет решений, так как все коэффициенты равны 0, а R не равно 0.")
21     return
22 max_a = R // T if T != 0 else (0 if R != 0 else 0)
23 for a in range(0, max_a + 1) if T != 0 else [0]:
24     remaining1 = R - T * a
25     if T != 0 and a > R // T:
26         continue
27     if remaining1 < 0:
28         continue
29     max_b = remaining1 // L if L != 0 else (0 if remaining1 != 0 else 0)
30     for b in range(0, max_b + 1) if L != 0 else [0]:
31         remaining2 = remaining1 - L * b
32         if L != 0 and b > remaining1 // L:
33             continue
34         if remaining2 < 0:
35             continue
36         max_c = remaining2 // B if B != 0 else (0 if remaining2 != 0 else 0)
37         for c in range(0, max_c + 1) if B != 0 else [0]:
38             remaining3 = remaining2 - B * c
39             if B != 0 and c > remaining2 // B:
40                 continue
41             if remaining3 < 0:
42                 continue
43             max_d = remaining3 // S if S != 0 else (0 if remaining3 != 0 else 0)
44             for d in range(0, max_d + 1) if S != 0 else [0]:
45                 remaining4 = remaining3 - S * d
46                 if S != 0 and d > remaining3 // S:
47                     continue
48                 if remaining4 < 0:
49                     continue
50                 max_e = remaining4 // A if A != 0 else (0 if remaining4 != 0 else 0)
51                 for e in range(0, max_e + 1) if A != 0 else [0]:
52                     remaining5 = remaining4 - A * e
53                     if A != 0 and e > remaining4 // A:
54                         continue
55                     if remaining5 < 0:
56                         continue
57                     if P != 0:
58                         if remaining5 % P == 0 and remaining5 >= 0:
59                             f = remaining5 // P
60                             solutions.append((a, b, c, d, e, f))
61                     else:
62                         if remaining5 == 0:
63                             f = 0

```

Рис. 5. Фрагмент кода программы

Пример использования программы для варианта компоновок транспортного узла «Р»:

1) уравнение поиска рациональных решений ЛДУ зоны «С-П» имеет вид:

$1 \cdot a(i) + 6 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 1 \cdot e(i) + 8 \cdot f(i) = 58$. Всего получено 8701 решение.

а

Ввод данных

Введите значение T:

Введите значение L:

Введите значение B:

Введите значение S:

Введите значение A:

Введите значение P:

Введите значение R:

б

Результат

Общее количество решений до сортировки по Парето: 8701
Общее количество решений после сортировки по Парето: 1076

РАЦИОНАЛЬНЫЕ КОРНИ:
Рациональный корень для переменной a: 11.45
Рациональный корень для переменной b: 1.53
Рациональный корень для переменной c: 2.51
Рациональный корень для переменной d: 0.75
Рациональный корень для переменной e: 11.45
Рациональный корень для переменной f: 1.04

Рис. 6. Решение ЛДУ зоны «С-П» ТУ «Р»:
а – ввод данных, б – вывод результата расчета

2) уравнение поиска рациональных решений ЛДУ зоны «Р-Т» имеет вид:
 $2 \cdot a(i) + 12 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 2 \cdot e(i) + 4 \cdot f(i) = 58$. Всего получено 4931 решение.

а

Ввод данных

Введите значение T:

Введите значение L:

Введите значение B:

Введите значение S:

Введите значение A:

Введите значение P:

Введите значение R:

б

Результат

Общее количество решений до сортировки по Парето: 4931
Общее количество решений после сортировки по Парето: 1206

РАЦИОНАЛЬНЫЕ КОРНИ:
Рациональный корень для переменной a: 5.63
Рациональный корень для переменной b: 0.59
Рациональный корень для переменной c: 2.58
Рациональный корень для переменной d: 0.78
Рациональный корень для переменной e: 5.63
Рациональный корень для переменной f: 2.58

Рис. 7. Решение ЛДУ зоны «Р-Т» ТУ «Р»:
а – ввод данных, б – вывод результата расчета

Обработка результатов и выводы

В результате составлена ведомость изменения оценок инфраструктур семнадцати ТУ юга России (табл. 2). Получено как повышение, так и снижение значений рейтингов ТУ. Из семнадцати исследуемых транспортных узлов рейтинг десяти ТУ показывает положительное изменение, а рейтинг семи ТУ – снижение баллов. Наибольший рост баллов рейтинга у ТУ «Р» – увеличение баллов на +1,75 (+3,04 %), у ТУ «В» – увеличение баллов на +1,07 (+1,81%), у ТУ «А» – увеличение на +1,06 (+2,79 %). Рейтинг ТУ с наибольшим снижением баллов: ТУ «ТГ» – на -0,87 (-2,09 %), ТУ «Д» – на -0,50 (-2,76 %).

Таблица 2

Ведомость изменения оценок инфраструктур транспортных узлов

ТУ	$R_{\text{сущ}}$	$R_{\text{проект}}$	ΔR	% изменения R	$CD_{\text{сущ}}$	$CD_{\text{проект}}$	ΔCD	% изменения CD	$\Psi_{\text{сущ}}$	$\Psi_{\text{проект}}$
«СЧ»	60,88	60,07	-0,81	-1,33	0,11064	0,10243	-0,0082	-7,42	0,550	0,586
«В»	59,18	60,08	+1,07	+1,81	0,05219	0,05115	-0,0010	-2,00	1,134	1,151
«Р»	57,58	59,33	+1,75	+3,04	0,06603	0,06289	-0,0031	-4,76	0,872	0,943
«М»	57,1	57,11	+0,01	+0,02	0,10186	0,08963	-0,0122	-12,00	0,561	0,637
«К»	55,36	55,69	+0,33	+0,60	0,04996	0,04880	-0,0012	-2,32	1,108	1,141
«С»	49,52	48,77	-0,75	-1,51	0,05871	0,05778	-0,0009	-1,59	0,843	0,844
«ВЛ»	46,82	46,50	-0,32	-0,68	0,08042	0,09209	+0,0117	+14,52	0,582	0,505
«НВ»	45,76	45,62	-0,14	-0,31	0,11447	0,11301	-0,0015	-1,28	0,400	0,404
«ТГ»	41,62	40,75	-0,87	-2,09	0,05662	0,05618	-0,0004	-0,79	0,735	0,725
«А»	37,98	39,04	+1,06	+2,79	0,06186	0,06186	-0,0001	-0,003	0,614	0,631
«Т»	32,62	32,72	+0,1	+0,31	0,05721	0,05438	-0,0028	-4,91	0,570	0,602
«Н»	31,46	31,39	-0,07	-0,22	0,03152	0,02895	-0,0026	-8,14	0,998	1,084
«ВД»	24,74	24,89	+0,15	+0,61	0,11062	0,09973	-0,0109	-9,85	0,224	0,249
«МВ»	18,18	18,40	+0,22	+1,21	0,08972	0,08630	-0,0034	-3,82	0,203	0,213
«Д»	18,1	17,60	-0,5	-2,76	0,06108	0,06096	-0,0001	-0,20	0,296	0,289
«МЗ»	14,38	14,43	+0,05	+0,34	0,09127	0,08581	-0,0055	-5,98	0,157	0,168
«ТХ»	11,6	11,58	-0,02	-0,17	0,06044	0,05810	-0,0023	-3,88	0,192	0,199

Таким образом, увеличение балльных рейтингов транспортных узлов свидетельствует о целесообразности выполненных перестановок инфраструктурных объектов. Хотя и снижение баллов у некоторых ТУ после компоновки не всегда свидетельствует об их значительном инфраструктурном ухудшении. Поскольку балльный рейтинг имеет динамический характер и зависит от всех исследуемых ТУ, то на фоне полученных заметных улучшений параметров некоторых ТУ незначительное улучшение для других ТУ может выглядеть как слабоэффективное в общей стратегии развития. Это требует дальнейшего, отдельного и углубленного, исследования таких ТУ, которое может быть реализовано в программе ОП_ГКА_1.0.

Динамика изменений коэффициентов дивергенции CD узлов (до -12,0 %) после перестановок говорит о повышении однородности расположения объектов ТУ, что является признаком сбалансированного развития инфраструктуры и открывает возможности для внедрения инновационных решений и формирования более гармоничной городской среды.

Области эффективности вариантов размещения объектов инфраструктуры транспортных узлов наглядно показаны на рис. 8.

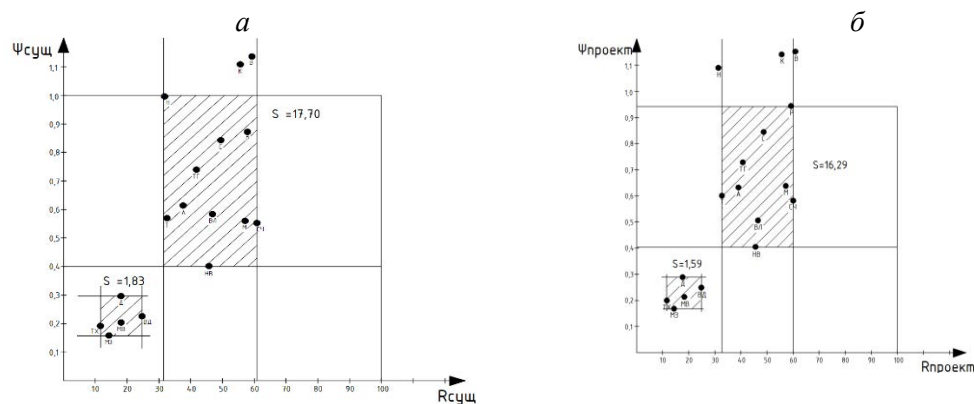


Рис. 8. Области эффективности вариантов размещения объектов инфраструктуры транспортных узлов:

а – существующий вариант, б – проектный вариант

Из рис. 8. следует, что получены две области эффективности, площади которых составили: для малых узлов – $S_{\text{м}}^{\text{проект}} = 1,59 \text{ ед.}^2$, для средних и больших узлов – $S_{\text{б}}^{\text{проект}} = 16,29 \text{ ед.}^2$. Изменение площадей составило: $\Delta S_{\text{м}} = 1,83 - 1,59 = 0,24 \text{ ед.}^2$; $\Delta S_{\text{б}} = 17,7 - 16,29 = 1,41 \text{ ед.}^2$.

Введем понятие «плотности» области эффективности относительно количества ТУ – $\rho_{\text{ТУ}}^{\text{проект}} = \frac{S_{\text{ТУ}}^{\text{проект}}}{N_{\text{ТУ}}}$, ед.². В результате получено, что $\rho_{\text{м}}^{\text{проект}} = \frac{1,59}{5} = 0,318 \text{ ед.}^2$, а $\rho_{\text{б}}^{\text{проект}} = \frac{16,29}{9} = 1,81 \text{ ед.}^2$. При этом расположение объектов инфраструктуры транспортных узлов «К», «В» и «Н» соответствует степени их развитости, т. е. $\psi_{\text{сущ}}(K, B, H) \rightarrow \max$.

Заключение

В результате проведенных перестановок количество малых узлов осталось прежним, но площадь области эффективности по сравнению с существующим вариантом уменьшилась на 0,24 ед.², т. е. стала более концентрированной, а инфраструктуры ТУ – унифицированными.

Количество средних и больших узлов в области эффективности уменьшилось с десяти до девяти, а ТУ «Н» попал в область расположения объектов инфраструктуры, соответствующую степени развитости. Кроме того, площадь области эффективности для средних и больших уменьшилась на 1,41 ед.². «Плотность» области эффективности относительно количества ТУ для малых узлов уменьшилась на 0,048 ед.², а для средних и больших – увеличилась на 0,04 ед.². Таким образом, имеет место выравнивание инфраструктурных показателей основных ТУ.

Резюмируя, отметим, что метод размещения узловых зон и объектов согласно ГКА ТУ и программный расчет их параметров в условиях нечеткой параметризации транспортных процессов необходимы как для целей анализа стратегий узлового развития при оценке множества вариантов компоновочных решений в кратчайшие сроки, так и для оценки итоговых проектов развития узла по дополнительным внутрисистемным параметрам.

Список литературы

- 1 Семенов, А. К. Методы системного анализа структуры народного хозяйства / А. К. Семенов. – Москва : Наука, 1974. – 223 с.
- 2 Числов, О. Н. К вопросу моделирования инфраструктурно-технологического взаимодействия в транспортных узлах / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3 (99). – С. 86–91. – ISSN 1997-0722.
- 3 Числов, О. Н. Принципы формирования комплексного критерия оценки структуры транспортного узла / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1 (93). – С. 122–131. – DOI 10.46973/0201-727X 2024_1_122.
- 4 Хан, В. В. Интегральная оценка показателей транспортной инфраструктуры железнодорожных узлов / В. В. Хан // Современные аспекты транспортной логистики : сборник трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», Хабаровск, 09–10 октября 2014 г. / под редакцией А. С. Балалаева. – Хабаровск : ДВГУПС, 2014. – С. 92–97.
- 5 Дюран, Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл ; перевод с английского Е. З. Демиденко ; под редакцией А. Я. Боярского. – Москва : Статистика, 1977. – 128 с.

Reference

- 1 Semenov, A. K. Methods of systems analysis of the structure of the national economy / A. K. Semenov. – Moscow : Nauka, 1974. – 223 p.
- 2 Chislov, O. N. On the issue of modeling infrastructure and technological interaction in transport hubs / O. N. Chislov, E. E. Mizgireva // Vestnik transporta Povolzhya Bulletin of Transport of the Volga Region. – 2023. – No. 3 (99). – P. 86–91. – ISSN 1997-0722.
- 3 Chislov, O. N. Principles of forming a comprehensive criterion for assessing the structure of a transport hub / O. N. Chislov, E. E. Mizgireva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 1 (93). – P. 122–131. – DOI 10.46973/0201-727X 2024_1_122.
- 4 Khan, V. V. Integral assessment of transport infrastructure indicators of railway hubs / V. V. Khan // Modern aspects of transport logistics : collection of papers from the International scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of the chair "Technology of transport processes and logistics", Khabarovsk, October 9–10, 2014 / edited by A. S. Balalaev. – Khabarovsk : Far Eastern State Transport University, 2014. – P. 92–97.
- 5 Duran, B. Cluster analysis / B. Duran, P. Odell ; translated from English by E. Z. Demidenko ; edited by A. Ya. Boyarsky. – Moscow : Statistics, 1977. – 128 p.

6 **Числов, О. Н.** Генетический компоновочный алгоритм размещения объектов транспортного узла: постановка задачи, формирование и использование массивов данных, методика решения / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева, Н. М. Луганченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2025. – Т. 22, Вып. 1. – С. 32–46. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-32-46.

7 **Числов, О. Н.** Принципы формирования системы оценки показателей инфраструктуры транспортного узла / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева, С. А. Колошин // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. – 2024 – № 1 (6). – С. 164–169. – ISSN 2664-5025.

8 **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663676 Российская Федерация** / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева, Н. М. Луганченко. – № 2025661784 ; заявл. 12.05.2025 ; опублик. 29.05.2025.

6 **Chislov, O. N.** Genetic layout algorithm for the placement of transport hub facilities : problem formulation, formation and use of data arrays, and solution methodology / O. N. Chislov, E. E. Mizgireva, N. M. Luganchenko // Proceedings of Petersburg Transport University. – St. Petersburg : PGUPS, 2025. – Vol. 22, Issue 1. – P. 32–46. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-32-46.

7 **Chislov, O. N.** Principles of forming a system for assessing transport hub infrastructure indicators / O. N. Chislov, E. E. Mizgireva, S. A. Koloshin // Problems of prospective development of railway stations and junctions. – 2024 – No. 1 (6). – P. 164–169. – ISSN 2664-5025.

8 **Certificate of state registration of computer program No. 2025663676 Russian Federation** / O. N. Chislov, E. E. Mizgireva, N. M. Luganchenko. – No. 2025661784 ; declared 12.05.2025 ; published 29.05.2025.

E. E. Mizgireva

A SOFTWARE PACKAGE FOR SELECTING RATIONAL PARAMETERS OF INFRASTRUCTURE FACILITIES IN THE LAYOUT SOLUTIONS OF A TRANSPORT HUB

Abstract. In the context of dynamic economic and geopolitical changes, it is important to provide adaptation mechanisms that allow for rapid modification of nodal transport and technological processes in accordance with current requirements and circumstances. Preliminary and subsequent software assessment of the parameters of nodal infrastructural and technological interaction at all stages of layout solutions allows us to draw conclusions about the principles of formation of zones and facilities, the correspondence of transport modes and points of nodal interaction, as well as their locations. For these purposes, a comparative analysis of the hub zone indicators was carried out depending on the degree of their impact on the node/ hub structure according to the criteria of decision theory, cluster analysis methods that allow evaluating objects within one zone (cluster) and identifying hidden structures in a data set, determining groups of objects, their similarities and differences. A software package for selecting rational parameters of objects in layout solutions for a transport hub was developed according to the author's modification of a traditional genetic algorithm (GA) into a genetic layout algorithm for a transport hub (GLA TU), taking into account random selection, fuzzy sets of parameters, combinatorics and variation of big data arrays using analogies of natural selection.

Keywords: transport hub, nodal zones, layout solutions, cluster analysis, divergence coefficient, decision theory, genetic layout algorithm, placement efficiency parameters, software package.

For citation: Mizgireva, E. E. A software package for selecting rational parameters of infrastructure facilities in the layout solutions of a transport hub / E. E. Mizgireva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 208–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_208.

Сведения об авторах

Мизгирева Екатерина Евгеньевна
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Станции и грузовая работа»,
ассистент,
e-mail: BrutalD@yandex.ru

Information about the authors

Mizgireva Ekaterina Evgenievna
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Stations and Freight Operation”,
Assistant,
e-mail: BrutalD@yandex.ru

П. Н. Мишуров

КОНЦЕПЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ *

Аннотация. Предложена концепция пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий на основе комбинирования методов многокритериального анализа, маршрутизации на специализированных графах транспортной инфраструктуры, динамической оптимизации на пространственно-временных графах, имитационного моделирования и графовой нейронной сети. Сочетание методов необходимо для прогнозирования и оптимизации параметров транспортно-логистических процессов в режиме реального времени. Показана возможность использования предлагаемой комбинации методов при формировании оптимальных последовательностей транспортно-логистических процессов и синхронизации оперативного управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия. Разработанный подход позволит повысить эффективность транспортно-логистических процессов промышленных предприятий в результате комплексной реализации методов пространственно-временной оптимизации.

Ключевые слова: транспортно-логистический процесс, пространственно-временная оптимизация, концепция, комбинирование методов, промышленное предприятие.

Для цитирования: Мишуров, П. Н. Концепция пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий / П. Н. Мишуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025 – № 2. – С. 219–230. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_219.

Введение

Рост потребности промышленных предприятий в своевременности транспортного обслуживания структурных подразделений и стремление к сокращению транспортно-складских затрат в результате уменьшения размера транспортной партии, наряду с необходимостью соблюдения интересов собственников подвижного состава и руководства транспорта общего пользования, привели к структурному и технологическому усложнению транспортно-логистических процессов, а также повышению требований к их эффективности. В отмеченных условиях растет необходимость реализации системного подхода и оценки множества стохастических факторов при выработке оптимальных решений по повышению эффективности транспортно-логистических процессов [1] и, как следствие, активное применение различных комбинаций методов прогнозирования, оптимизации и анализа транспортно-логистических процессов [2], а также совершенствование способов повышения адаптивности использования таких методов [3, 4]. Актуальной задачей становится разработка подходов, которые позволят обеспечить переход от традиционных информационных систем управления элементами транспортно-логистических систем промышленных предприятий к интеллектуальным транспортно-логистическим системам, способным обеспечить принятие оптимальных решений в режиме реального времени [5].

Совершенствование информационных технологий [6], интенсивное распространение концепций Индустрии 4.0 [7] и Интернета вещей [8] сформировали предпосылки к получению больших объемов динамических достоверных данных о параметрах транспортных систем [9], а также использованию этих данных для принятия оптимальных решений в режиме реального времени [10]. Размерность задач оперативного управления в транспортной отрасли расширяется в связи с необходимостью анализа больших объемов текущих данных [11]. Поэтому практическое применение методов оптимизации, прогнозирования и анализа транспортно-логистических процессов нашло свое отражение при построении информационных систем управления элементами транспортно-логистических систем [12].

В условиях ускоренного внедрения новых цифровых технологий и усиления тенденции к автоматизации управленческой деятельности на промышленных предприятиях становятся критически актуальными задачи интеллектуализации транспортно-логистических процессов [13]. Для интеллекту-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-11-00164. – URL: <https://rscf.ru/project/23-11-00164>.

ального сопровождения транспортно-логистических процессов в условиях функционирования сложных транспортно-логистических систем используются различные комбинации методов прогнозирования, оптимизации и анализа состояния систем [14]. Появились новые подходы к созданию адаптивных информационных систем [15], экспертных [16, 17] и самообучающихся [18] систем поддержки принятия управленческих решений на основе использования комбинированных методов на различных уровнях управления с учетом возможных ограничений.

Основным ограничением использования комбинированных методов является недостаточная точность результатов их применения в условиях высокой динамики загруженности транспортной инфраструктуры и многовариантности последовательностей технологических операций транспортно-логистических процессов. Это связано с большим количеством технологических операций по переработке и продвижению грузопотоков в транспортно-логистической системе. Программная реализация одноцелевых [17] или многоцелевых методов оптимизации [19] в составе действующих информационных систем управления элементами транспортно-логистических систем обеспечивает выбор оптимального решения из набора заранее сформированных. Такой подход не позволяет выбирать оптимальные решения в нестандартных ситуациях, для которых не предусмотрены готовые варианты [20]. Регистрация больших объемов оперативных данных приводит к увеличению размерности таких математических моделей и замедлению получения оптимального решения [21]. Попытки учесть данные пространственно-временные зависимости при оперативном регулировании транспортно-логистических процессов промышленных предприятий оборачиваются необходимостью решать задачи большой размерности, которые можно отнести к NP-сложным, и, как следствие, ограничениями использования представленных методов и моделей [22].

Ограничения первого уровня связаны с описанием инфраструктуры элементов транспортно-логистических систем. Традиционно элементы транспортной инфраструктуры представляются в моделях абстрактным графом. Теория графов в настоящее время является интенсивно развивающимся разделом математики. Основное направление использования теории графов при решении транспортных задач – это маршрутизация перевозок [23], а в последнее время разрабатываются новые методы оптимизации графов [24]. Например, для условий работы железнодорожного транспорта необщего пользования использование традиционных методик построения графа маршрутизации перевозок ограничено рядом условий, от которых зависят маршруты движения поездов и маневровых составов [25]. Если маршрут состоит из нескольких маневровых полурейсов, то необходимо менять направление движения поезда. Кроме изменения направления движения поезда на параметры маршрута оказывают влияние такие факторы, как виды маневрового полурейса и расположение парков железнодорожных путей (параллельное, последовательное, комбинированное). Для учета этих факторов в моделях используются различные способы формирования графа маршрутизации железнодорожных перевозок. В научной литературе к методам формирования структуры графов железнодорожных перевозок относят классический [26], двухвершинный [27] и рёберный [28]. Выбор метода формирования структуры графа зависит от уровня сложности как путевого развития железнодорожной станции и узла, так и технологии переработки вагонопотоков [25].

Многокритериальность целей участников транспортно-логистических процессов промышленного предприятия является ограничением второго уровня. Анализ алгоритмов многоцелевой оптимизации показывает снижение их вычислительной эффективности по мере усложнения структуры оптимизируемой транспортной системы или увеличения вариантов возможных решений [29]. Решение данной проблемы особенно актуально для железнодорожных промышленных транспортных систем, управление эксплуатационной работой в которых отличается повышенной сложностью из-за наличия множества противоречивых критериев производства, железнодорожного транспорта общего пользования, грузовладельцев и собственников вагонов, диспетчеров промышленного железнодорожного узла (вагонного, поездного, тягового и станционного). Перспективным направлением преодоления данных ограничений является использование многокритериальных методов принятия решений [30] (*MCDM – Multi-Criteria Decision Making*) для оценки эксплуатационной обстановки.

Ограничением третьего уровня является сложность структуры задач оптимизации, например задач динамического согласования производства и транспорта [31], динамической оптимизации параметров вагонопотоков [32]. Большая размерность таких задач для условий функционирования транспортно-логистических систем промышленных предприятий обусловлена наличием разветвленной схемы путевого развития и высокой динамикой ее загруженности множеством технологических операций транспортно-логистических процессов по переработке элементов грузопотоков. Кроме того,

имеют место структурное и функциональное несоответствия систем оперативного управления производством и транспортом, различия применяемых способов и методов оперативного регулирования, разница длительности технологических циклов, связанных с переработкой элементов грузопотоков. Широкое применение при решении таких задач в течение заданного отрезка времени и с необходимой точностью нашли адаптированные алгоритмы, построенные на основе нейронных сетей [33].

Перспективным направлением развития нейросетевых алгоритмов для решения задач оптимального прогнозирования транспортно-логистических процессов являются методы пространственно-временной оптимизации [34]. Решение задач пространственно-временной оптимизации заключается в сокращении оптимизируемого пространства путем представления его в виде пространственно-временного графа на основе использования графовой нейронной сети и методов динамической оптимизации [22]. Графовые и гибридные нейронные сети теоретически способны учитывать сложные пространственно-временные зависимости на основе распознавания текущего состояния транспортной инфраструктуры [35]. Однако для обучения таких нейронных сетей необходимо формировать множество сценариев развития эксплуатационной обстановки. Адаптивность их использования в режиме реального времени снижается по мере увеличения рассогласованности управленческих решений, принимаемых оперативным руководящим составом и рекомендуемых нейронной сетью. Перспективным направлением повышения адаптивности алгоритмов пространственно-временной оптимизации является использование высокодетализированных имитационных моделей транспортно-логистических процессов [36].

Пространственно-временная оптимизация транспортно-логистических процессов промышленных предприятий

Предлагается подход к прогнозированию транспортно-логистических процессов промышленных предприятий в режиме реального времени на основе использования методов пространственно-временной оптимизации [22]. Основой данного подхода является комбинация методов, в числе которых:

- многокритериальный анализ для оценки эксплуатационной обстановки, определения и корректирования значимости критериев эффективности транспортно-логистических процессов [22];
- методы оптимизации на специализированных графах для решения задач автоматической маршрутизации с учетом технологии переработки грузопотоков [25];
- формирование пространственно-временного графа и его динамическая оптимизация для определения оптимальной последовательности транспортно-логистических процессов [22];
- метод имитационного моделирования для высокодетализированного цифрового описания технологии переработки грузопотоков [36] и формирования сценариев развития эксплуатационной обстановки с последующим обучением графовых нейронных сетей;
- графовая нейронная сеть формирования последовательности транспортно-логистических процессов для синхронизации оперативного управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия на основе использования сценариев развития эксплуатационной обстановки, полученных по результатам динамической оптимизации и имитационного моделирования.

Основными положениями концепции являются:

1 Мониторинг эксплуатационной обстановки на основе комплексного использования систем оперативной регистрации данных о наличии резервов пропускной и перерабатывающей способностей транспортной инфраструктуры, структуре грузопотоков, ресурсном обеспечении, заявках и графиках транспортного обслуживания структурных подразделений промышленного предприятия, показателях взаимодействия участников транспортно-логистических процессов (производство, транспорт общего и необщего пользования, собственники подвижного состава и инфраструктуры), погодных условиях.

2 Достижение баланса конфликтующих критериев эффективности транспортно-логистических процессов на основе многокритериального анализа эксплуатационной обстановки. Использование коэффициентов значимости (весовых коэффициентов) критериев эффективности в задаче пространственно-временной оптимизации [30].

3 Формализация сценариев развития эксплуатационной обстановки в виде пространственно-временного графа транспортно-логистических процессов.

4 Описание транспортной инфраструктуры в виде специализированного графа (рёберный граф, двухвершинный граф) для реализации методов маршрутизации элементов грузопотоков [25].

5 Оценка вариантов использования транспортной инфраструктуры технологическими операциями при различной структуре грузопотоков в различные моменты времени на основе динамической оптимизации пространственно-временного графа транспортно-логистических процессов [14].

6 Построение графовой нейронной сети на основе пространственно-временного графа [37].

7 Прогнозирование транспортно-логистических процессов в режиме реального времени, включая занятость элементов транспортной инфраструктуры и структуру грузопотоков, на основе использования графовой нейронной сети [9].

8 Обучение графовой нейронной сети и корректировка пространственно-временных зависимостей на основе применения имитационных моделей транспортно-логистических процессов. Использование имитационных моделей позволит сформировать базу решений в зависимости от эксплуатационной обстановки, а также оценить новые решения с учетом ее изменения. Формирование множества решений, обновление и корректировка этого множества осуществляются на основе оценки вариантов изменения параметров транспортно-логистических процессов (рис. 1).

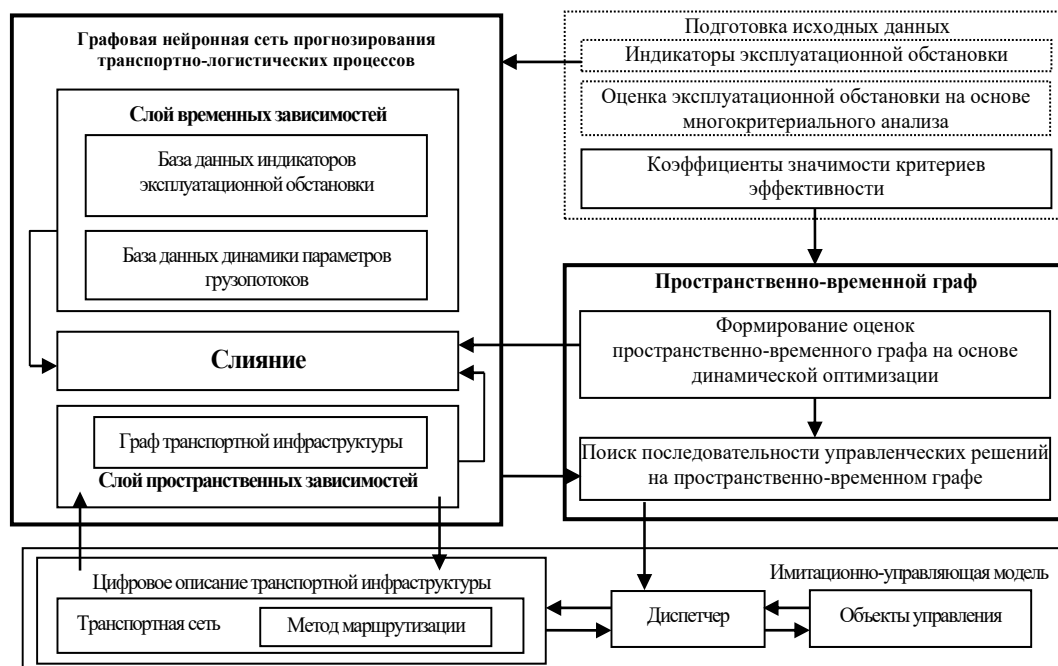


Рис. 1. Схема концепции пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий

Соблюдение представленных положений предполагается осуществлять в четыре основных этапа комбинирования методов пространственно-временной оптимизации:

1 Подготовка исходных данных. Для оценки эксплуатационной обстановки предлагается двух-уровневая система ее индикаторов. На первом уровне выполняется сбор данных о наличии резервов пропускной и перерабатывающей способностей транспортной инфраструктуры, заявках и графиках транспортного обслуживания структурных подразделений, структуре транспортных потоков, ресурсном обеспечении, показателях взаимодействия стейкхолдеров, погодных условиях. Индикаторами второго уровня выступают требования участников транспортно-логистических процессов промышленного предприятия.

2 Оценка эксплуатационной обстановки. Данный этап обосновывается наличием приоритетов обработки разных грузопотоков, а также противоречивостью целей участников транспортно-логистических процессов. Для достижения баланса конфликтующих критериев эффективности транспортно-логистических процессов используется групповой метод многокритериального анализа [30]. Результатами оценки эксплуатационной обстановки являются коэффициенты значимости (весовые коэффициенты) критериев эффективности задачи пространственно-временной оптимизации.

3 Прогнозирование эксплуатационной обстановки. На этом этапе пространственно-временной оптимизации формируется вариант развития эксплуатационной обстановки на основе использования графовой нейронной сети. Предполагается, что на данном этапе графовая нейронная сеть обладает накопленными данными о пространственно-временных зависимостях транспортно-логистических процессов (рис. 2). Основой разработанного способа формирования графовой нейронной сети являются пространственно-временной граф и методы его динамической оптимизации.

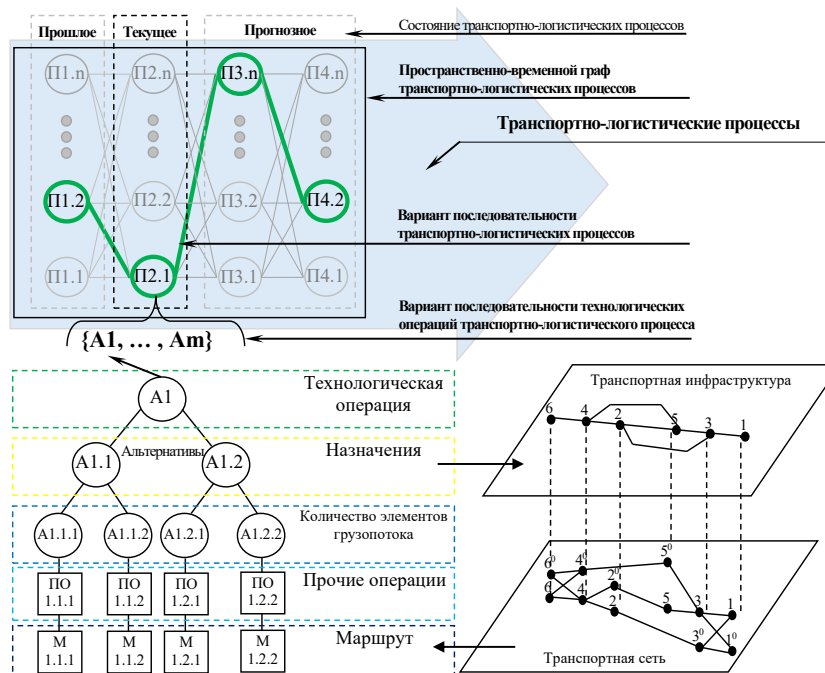


Рис. 2. Структура последовательности транспортно-логистических процессов

Слой пространственных зависимостей служит для формирования вариантов использования транспортной инфраструктуры на основе использования специализированного графа маршрутизации [14]. Анализ существующих методов формирования графов для условий железнодорожных перевозок позволяет говорить о преимуществах специализированных графов маршрутизации, где в качестве вершин графа описываются стрелочные переводы, а в качестве ребер – станционные пути [32]. С другой стороны, структура графа железнодорожного узла состоит из станций и перегонов. Такое представление путевого развития связано с отсутствием дополнительных преобразований для графовых нейронных сетей [38]. Результатом данного слоя являются варианты занятости элементов путевого развития. Варианты значений параметров грузопотоков и индикаторов эксплуатационной обстановки в различные моменты времени формируются в слое временных зависимостей. Предлагаемый способ формирования нейронной сети позволит сократить размер задачи пространственно-временной оптимизации [39].

Полученные варианты использования транспортной инфраструктуры технологическими операциями при различной структуре грузопотоков в разные моменты времени образуют пространственно-временной граф транспортно-логистических процессов. Поиск наиболее приемлемого варианта развития эксплуатационной обстановки осуществляется на основе методов динамической оптимизации этого графа с учетом весовых коэффициентов критериев эффективности транспортно-логистических процессов. Оптимальный вариант последовательности транспортно-логистических процессов, включая технологические операции, занятость элементов транспортной инфраструктуры и структуру грузопотоков в различные моменты времени, является результатом графовой нейронной сети.

4 Обучение графовой нейронной сети и корректировка пространственно-временных зависимостей. Необходимость данного этапа обусловлена наличием случайных факторов. Например, для путей необщего пользования характерны изменения требований структурных подразделений промышленных предприятий к своевременности перевозок, очередности подачи вагонов на грузовые фронты, ошибки или задержки в подготовке документов, неправильное размещение груза в вагоне и т. д. Повысить адаптивность использования методов пространственно-временной оптимизации предлагается на основе применения имитационных моделей функционирования элементов транспортно-логистической системы. Использование имитационных моделей позволит сформировать базу управленческих решений в зависимости от эксплуатационной обстановки, а также оценить новые управленческие решения с учетом ее изменения. Формирование множества управленческих решений, обновление и корректировка этого множества осуществляются на основе оценки вариантов изменения параметров транспортно-логистических процессов.

Реализация методов пространственно-временной оптимизации сопровождается рядом ограничений, обладающих разными уровнями сложности. Данные ограничения связаны с барьерами в повы-

шении эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий. Выделены четыре группы решений, основанных на методах адаптации (параметрической, структурной и функциональной) [40] (таблица).

Этапы повышения эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий на основе пространственно-временной оптимизации

Объект повышения эффективности	Этапы и методы адаптации							
	1-й этап. Корректирование параметров ТЛП		2-й этап. Параметрическая адаптация		3-й этап. Структурная адаптация		4-й этап. Функциональная адаптация	
	Проблема	Решение	Проблема	Решение	Проблема	Решение	Проблема	Решение
Транспортно-логистические процессы (ТЛП)	Наличие отклонений от плановых значений параметров ТЛП	Корректирование графиков движения грузопотоков	Недостаточная эффективность регулирования параметров ТЛП в нестандартных ситуациях	Выработка оптимальных решений в нестандартных ситуациях	Разрешение конфликтов ТЛП	Комплексная оценка эксплуатационной обстановки на основе использования пространственно-временного графа	Наличие несогласованных действий участников ТЛП	Согласованное прогнозирование ТЛП в режиме реального времени
		Корректирование загруженности транспортной инфраструктуры						
		Корректирование структуры грузопотоков	Наличие несогласованных действий участников ТЛП	Многокритериальный анализ эффективности ТЛП				
		Корректирование графиков транспортного обслуживания						
	Наличие «черных ящиков» в данных о параметрах грузопотоков и занятости инфраструктуры	Регистрация данных о циклах транспортного обслуживания	Отсутствие данных о временных зависимостях технологических операций от параметров ТЛП	Анализ оперативных данных о времени выполнения технологических операций ТЛП	Низкая точность обнаружения конфликтов ТЛП	Использование пространственно-временных данных для индикаторов эксплуатационной обстановки		
		Регистрация данных о времени появления грузопотока						
		Регистрация данных о местоположении элементов грузопотоков	Отсутствие данных о пространственных зависимостях пропускной способности от параметров ТЛП	Анализ оперативных данных о наличной пропускной способности				
		Регистрация данных о занятости элементов инфраструктуры						

Наличие отклонений от плановых значений параметров транспортно-логистических процессов и неполнота данных о параметрах грузопотоков и занятости инфраструктуры являются барьером в повышении эффективности первого уровня. Для преодоления данного барьера используются современные адаптивные методы корректирования графиков движения грузопотоков, загруженности транспортной инфраструктуры, структуры грузопотоков, графиков транспортного обслуживания. Эффективность использования таких методов зависит от полноты исходных данных и оперативности их регистрации в информационных системах управления элементами транспортно-логистических систем.

Переход с уровня корректирования к изменению параметров транспортно-логистических процессов (параметрической адаптации) осуществляется по причине недостаточной эффективности их регулирования в нестандартных ситуациях, наличия несогласованных действий участников, а также от-

сутствия данных о временных и пространственных зависимостях технологических операций от параметров транспортно-логистических процессов.

Наличие конфликтов транспортно-логистических процессов при низкой точности их обнаружения является барьером третьего уровня в повышении эффективности транспортно-логистических процессов. Для преодоления данного барьера необходимо проводить комплексную оценку эксплуатационной обстановки на основе использования больших пространственно-временных данных, которые предлагается формализовать в виде пространственно-временного графа структуры последовательности транспортно-логистических процессов (структурная адаптация). Основным ограничением реализации решений структурной адаптации методов пространственно-временной оптимизации является наличие несогласованных действий участников транспортно-логистических процессов по их прогнозированию в режиме реального времени.

Результатом этапного преодоления ограничений повышения эффективности транспортно-логистических процессов является их согласованное прогнозирование в режиме реального времени на основе комбинирования методов пространственно-временной оптимизации.

Выводы

Предложена концепция пространственно-временной оптимизации транспортно-логистических процессов промышленных предприятий, основанная на комбинации методов многокритериального анализа, маршрутизации на специализированных графах транспортной инфраструктуры, динамической оптимизации на пространственно-временных графах, имитационного моделирования и графовой нейронной сети. Комбинация методов необходима для прогнозирования и оптимизации параметров транспортно-логистических процессов в режиме реального времени. Теоретически показана возможность повышения эффективности транспортно-логистических процессов промышленных предприятий на основе формирования оптимальных последовательностей транспортно-логистических процессов и синхронизации оперативного управления элементами транспортно-логистической системы промышленного предприятия. Использование предлагаемой концепции позволит повысить точность оценки эксплуатационной обстановки на основе определения и корректирования значимости критериев эффективности транспортно-логистических процессов, определить оптимальные последовательности транспортно-логистических процессов на основе формирования пространственно-временного графа и его динамической оптимизации, формировать сценарии развития эксплуатационной обстановки с последующим обучением графовых нейронных сетей на основе высокодетализированного цифрового описания технологии переработки грузопотоков в имитационных моделях элементов транспортно-логистических систем, прогнозировать транспортно-логистические процессы промышленных предприятий на основе формирования оптимальных сценариев развития эксплуатационной обстановки в режиме реального времени, полученных графовой нейронной сетью. Разработанный комбинированный метод пространственно-временной оптимизации предлагается использовать для оперативной оценки эксплуатационной обстановки с последующим согласованным оптимальным прогнозированием транспортно-логистических процессов промышленных предприятий в режиме реального времени. Дальнейшим направлением развития предлагаемой концепции является исследование методов формирования пространственно-временных нейронных сетей и их обучения.

Список литературы

- 1 **Козлов, П. А.** Автоматизированное управление процессами в транспортном узле / П. А. Козлов, О. В. Осокин, В. Ю. Пермикин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2 (50). – С. 118–122. – ISSN 0201-727X.
- 2 **Рахмангулов, А. Н.** Железнодорожные транспортно-технологические системы : организация функционирования / А. Н. Рахмангулов, О. А. Копылова, П. Н. Мишкurov. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2014. – 300 с. – ISBN 978-5-9967-0458-0.

References

- 1 **Kozlov, P. A.** Automated process control of processes in a transport hub / P. A. Kozlov, O. V. Osokin, V. Yu. Permikin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2013. – No. 2 (50). – P. 118–122. – ISSN 0201-727X.
- 2 **Rakhmangulov, A. N.** Railway transport and technological systems : organization of functioning / A. N. Rakhmangulov, O. A. Kopylova, P. N. Mishkurov. – Magnitogorsk : Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014. – 300 p. – ISBN 978-5-9967-0458-0.

3 Методы гибридной технологии имитационного моделирования при выборе вариантов реконструктивных мероприятий по развитию железнодорожных направлений и крупных узлов / А. Ф. Бородин, А. А. Кравченко, К. Ю. Николаев [и др.] // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021) : труды Четырнадцатой международной конференции. – Москва, 2021. – С. 963–971. – DOI 10.25728/4783.2021.67.10.001.

4 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.

5 **Keita, K.** A three-step Benders decomposition for the real-time Railway Traffic Management Problem / K. Keita, P. Pellegrini, J. Rodriguez // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2020. – Vol. 13. – Article no. 100170. – ISSN 2210-9706.

6 Design of an ITS for Industrial Enterprises / A. Rakhmangulov, A. Śladkowski, N. Osintsev // Studies in Systems, Decision and Control. – 2016. – Vol. 32. – P. 161–215. – DOI 10.1007/978-3-319-19150-8_6.

7 Industry 4.0 technologies applied to the rail transportation industry : A systematic review / C. Laiton-Bonadiez, J. W. Branch-Bedoya, J. Zapata-Cortes [et al.] // Sensors (Basel, Switzerland). – 2022. – Vol. 22, No. 7. – P. 2491. – ISSN 1424-8220.

8 An overview of current challenges and emerging technologies to facilitate increased energy efficiency, safety, and sustainability of railway transport / Z. Kljaić, D. Pavković, M. Cipek [et al.] // Future Internet. – 2023. – Vol. 15, No. 11. – P. 347. – ISSN 1999-5903.

9 Spatio-temporal graph neural networks for predictive learning in urban computing : A survey / G. Jin, Y. Liang, Y. Fang [et al.] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2023. – Vol. 36, No. 10. – P. 5388–5408. – ISSN 1041-4347.

10 The application of Industry 4.0 technologies in sustainable logistics : a systematic literature review (2012-2020) to explore future research opportunities / X. Sun, H. Yu, W. D. Solvang [et al.] // Environmental science and pollution research international. – 2022. – Vol. 29, No. 7. – P. 9560–9591. – ISSN 0944-1344.

11 **Anda, C.** Transport modelling in the age of big data / Cuauhtemoc Anda, Alexander Erath, Pieter

3 Methods of hybrid simulation technology in the selection of options for reconstructive measures for the development of railway routes and large junctions / A. F. Borodin, A. A. Kravchenko, K. Yu. Nikolaev [et al.] // Management of the development of large-scale systems (MLSD'2021) : Proceedings of the Fourteenth International Conference. – Moscow, 2021. – P. 963–971. – DOI 10.25728/4783.2021.67.10.001.

4 Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy / E. A. Mamaev, A. N. Guda, V. A. Finochenko, K. A. Godovany // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

5 **Keita, K.** A three-step Benders decomposition for the real-time Railway Traffic Management Problem / K. Keita, P. Pellegrini, J. Rodriguez // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2020. – Vol. 13. – Article no. 100170. – ISSN 2210-9706.

6 Design of an ITS for Industrial Enterprises / A. Rakhmangulov, A. Śladkowski, N. Osintsev // Studies in Systems, Decision and Control. – 2016. – Vol. 32. – P. 161–215. – DOI 10.1007/978-3-319-19150-8_6.

7 Industry 4.0 technologies applied to the rail transportation industry : A systematic review / C. Laiton-Bonadiez, J. W. Branch-Bedoya, J. Zapata-Cortes [et al.] // Sensors (Basel, Switzerland). – 2022. – Vol. 22, No. 7. – P. 2491. – ISSN 1424-8220.

8 An overview of current challenges and emerging technologies to facilitate increased energy efficiency, safety, and sustainability of railway transport / Z. Kljaić, D. Pavković, M. Cipek [et al.] // Future Internet. – 2023. – Vol. 15, No. 11. – P. 347. – ISSN 1999-5903.

9 Spatio-temporal graph neural networks for predictive learning in urban computing : A survey / G. Jin, Y. Liang, Y. Fang [et al.] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2023. – Vol. 36, No. 10. – P. 5388–5408. – ISSN 1041-4347.

10 The application of Industry 4.0 technologies in sustainable logistics : a systematic literature review (2012-2020) to explore future research opportunities / X. Sun, H. Yu, W. D. Solvang [et al.] // Environmental science and pollution research international. – 2022. – Vol. 29, No. 7. – P. 9560–9591. – ISSN 0944-1344.

11 **Anda, C.** Transport modelling in the age of big data / Cuauhtemoc Anda, Alexander Erath, Pieter Jacobus Fourie // International Journal of Urban Sciences. – 2017. – Vol. 21, No. S1. –

Jacobus Fourie // International Journal of Urban Sciences. – 2017. – Vol. 21, No. S1. – P. 19–42. – DOI 10.1080/12265934.2017.1281150.

12 Инновационные процессы логистического менеджмента в интеллектуальных транспортных системах : монография. В 4 т. Т. 4 / Л. А. Андреева, В. В. Багинова, А. С. Балалаев [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. – 499 с. – ISBN 978-5-89035-870-7.

13 **Adamko, N.** Agent based simulation of transportation logistic systems / N. Adamko, A. Kavicka, V. Klima // DAAAM International Scientific Book 2007, chapter 36 / B. Katalinic (ed.). – Vienna, Austria : DAAAM International Publishing, 2007. – P. 407–422. – DOI 10.2507/daaam.scibook.2007.36.

14 Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкurov, Д. В. Александрин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (55). – С. 43–59. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59.

15 **Ерофеев, А. А.** Прогнозирование продолжительности выполнения технологических операций в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом / А. А. Ерофеев, С. Ю. Чапский // Вестник Белорусского государственного университета транспорта : Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (44). – С. 52–56. – ISSN 2227-1120.

16 **Осокин, О. В.** Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транспорте / О. В. Осокин // Транспорт Урала. – 2013. – № 4. – С. 3–7. – ISSN 1815-9400.

17 **Козлов, П. А.** О построении интеллектуальных систем управления железнодорожными станциями / П. А. Козлов, С. П. Вакуленко, В. С. Колокольников // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 2. – С. 70–76. – ISSN 2074-9325.

18 Performance evaluation of a parallel ant colony optimization for the real-time train routing selection problem in large instances / B. Pascariu, M. Samà, P. Pellegrini [et al.] // European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (Part of EvoStar). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 46–61. – DOI 10.1007/978-3-031-04148-8_4.

19 **Осьминин, А. Т.** О разработке интеллектуальной системы управления перевозочным процессом / А. Т. Осьминин // Железнодорожный транспорт. – 2021. – №. 3. – С. 17–27. – ISSN 0044-4448.

P. 19–42.

DOI 10.1080/12265934.2017.1281150.

12 Innovative processes of logistics management in intelligent transport systems : monograph. In 4 vols. Vol. 4 / L. A. Andreeva, V. V. Baginova, A. S. Balalaev [et al.]. – Moscow : Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2015. – 499 p. – ISBN 978-5-89035-870-7.

13 **Adamko, N.** Agent based simulation of transportation logistic systems / N. Adamko, A. Kavicka, V. Klima // DAAAM International Scientific Book 2007, chapter 36 / B. Katalinic (ed.). – Vienna, Austria : DAAAM International Publishing, 2007. – P. 407–422. – DOI 10.2507/daaam.scibook.2007.36.

14 Simulation models in digital twins of railway junctions / A. N. Rakhmangulov, S. N. Kornilov, P. N. Mishkurov, D. V. Alexandrin // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2022. – No. 3 (55). – P. 43–59. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59.

15 **Yerofeev, A. A.** Forecasting the duration of technological operations in an intelligent transportation process management system / A. A. Yerofeyev, S. Yu. Chapsky // Bulletin of the Belarusian State University of Transport : Science and Transport. – 2022. – No. 1 (44). – P. 52–56. – ISSN 2227-1120.

16 **Osokin, O. V.** Intellectual support of production processes in railway transport / O. V. Osokin // Transport of the Urals. – 2013. – No. 4. – P. 3–7. – ISSN 1815-9400.

17 **Kozlov, P. A.** On the construction of intelligent control systems for railway stations / P. A. Kozlov, S. P. Vakulenko, V. S. Kolokolnikov // Science and Technology of Transport. – 2019. – No. 2. – P. 70–76. – ISSN 2074-9325.

18 Performance evaluation of a parallel ant colony optimization for the real-time train routing selection problem in large instances / B. Pascariu, M. Samà, P. Pellegrini [et al.] // European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (Part of EvoStar). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 46–61. – DOI 10.1007/978-3-031-04148-8_4.

19 **Osminin, A. T.** On the development of an intelligent transportation process management system / A. T. Osminin // Railway Transport. – 2021. – No. 3. – P. 17–27. – ISSN 0044-4448.

20 Интеллектуализация транспортного обслуживания металлургических предприятий / А. Н. Рахмангулов, Н. А. Осинцев, П. Н. Мишкурков, О. А. Копылова // Сталь. – 2014. – № 4. – С. 115–118. –

DOI 10.6084/m9.figshare.14134226.v1.

21 **Карелин, В. П.** Модели и методы теории графов в системах поддержки принятия решений / В. П. Карелин // Вестник Таганрогского института управления и экономики. – 2014. – № 2 (20). – С. 69–73. – ISSN 2071-9604.

22 **Rakhmangulov, A.** Spatio-temporal graphs in transportation : challenges, optimization, and prospects / A. Rakhmangulov, N. Osintsev, P. Mishkurov // Systems. – 2025. – Vol. 13, No. 4. – P. 263. – DOI 10.3390/systems13040263.

23 **Ahuja, R.** Network flows : theory, algorithms, and applications / R. Ahuja, T. Magnanti, J. Orlin // Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1993. – 840 p. – ISBN 0-13-617549-X.

24 **El-Sherbeny, N. A.** The algorithm of the time-dependent shortest path problem with time windows / N. A. El-Sherbeny // Applied Mathematics. – 2014. – No. 5 (17). – P. 2764–2770. – DOI 10.4236/am.2014.517264.

25 **Мишкурков, П. Н.** Методика формирования транспортной сети железнодорожной станции / П. Н. Мишкурков, А. Н. Рахмангулов, О. В. Фридрихсон // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (51). – С. 50–64. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-3-50-64.

26 **Völz, W. D.** Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten spurgeführter Verkehrssysteme mittels Graphentheorie / W. D. Völz // Vorträge der Jahrestagung 1977 / Papers of the Annual Meeting 1977 DGOR. Physica-Verlag HD, 1978. – P. 440–449.

27 **Montigel, M.** Formal representation of track topologies by double vertex graphs / M. Montigel // Computers in Railways III : Proceedings of the Third International Conference on Computer Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (Comprail 92) / edited by T. K. Murthy. – Washington, DC, U.S.A. : WIT Press, 1992. – P. 359–370.

28 A multi scalable model based on a connexity graph representation / L. Gély, G. Dessagne, P. Pesneau, F. Vanderbeck // COMPRAIL 2010 / edited by B. Ning, C. A. Brebbia : WIT Transactions on The Built Environment. – Beijing, China : WIT Press Southampton, UK, 2010. – P. 193–204. – DOI 10.2495/CR100191.

29 An improved multi-objective quantum-behaved particle swarm optimization for railway freight

20 Intellectualization of transport services for metallurgical enterprises / A. N. Rakhmangulov, N. A. Osintsev, P. N. Mishkurov, O. A. Kopylova // Stal. – 2014. – No. 4. – P. 115–118. – DOI 10.6084/m9.figshare.14134226.v1.

21 **Karelin, V. P.** Models and methods of graph theory in decision support systems / V. P. Karelin // Bulletin of the Taganrog Institute of Management and Economics. – 2014. – No. 2 (20). – P. 69–73. – ISSN 2071-9604.

22 **Rakhmangulov, A.** Spatio-temporal graphs in transportation : challenges, optimization, and prospects / A. Rakhmangulov, N. Osintsev, P. Mishkurov // Systems. – 2025. – Vol. 13, No. 4. – P. 263. – DOI 10.3390/systems13040263.

23 **Ahuja, R.** Network flows : theory, algorithms, and applications / R. Ahuja, T. Magnanti, J. Orlin // Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1993. – 840 p. – ISBN 0-13-617549-X.

24 **El-Sherbeny, N. A.** The algorithm of the time-dependent shortest path problem with time windows / N. A. El-Sherbeny // Applied Mathematics. – 2014. – No. 5 (17). – P. 2764–2770. – DOI 10.4236/am.2014.517264.

25 **Mishkurov, P. N.** Methodology of forming a transport network of railway stations / P. N. Mishkurov, A. N. Rakhmangulov, O. V. Fridrikhson // Bulletin of the Ural State University of Railway Transport. – 2021. – No. 3 (51). – P. 50–64. – DOI 10.20291/2079-0392-2021-3-50-64.

26 **Völz, W. D.** Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten spurgeführter Verkehrssysteme mittels Graphentheorie / W. D. Völz // Vorträge der Jahrestagung 1977 / Papers of the Annual Meeting 1977 DGOR. Physica-Verlag HD, 1978. – P. 440–449.

27 **Montigel, M.** Formal representation of track topologies by double vertex graphs / M. Montigel // Computers in Railways III : Proceedings of the Third International Conference on Computer Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (Comprail 92) / edited by T. K. Murthy. – Washington, DC, U.S.A. : WIT Press, 1992. – P. 359–370.

28 A multi scalable model based on a connexity graph representation / L. Gély, G. Dessagne, P. Pesneau, F. Vanderbeck // COMPRAIL 2010 / edited by B. Ning, C. A. Brebbia : WIT Transactions on The Built Environment. – Beijing, China : WIT Press Southampton, UK, 2010. – P. 193–204. – DOI 10.2495/CR100191.

29 An improved multi-objective quantum-behaved particle swarm optimization for railway

transportation routing design / Q. Zhang, S. Liu, D. Gong, H. Zhang // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 157353–157362. – DOI 10.1109/ACCESS.2019.2948197.

30 **Осинцев, Н. А.** Мультикритериальные методы принятия решений на транспорте и в логистике / Н. А. Осинцев // Транспорт Урала. – 2021. – № 4 (71). – С. 3–17. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-3-17.

31 **Козлов, П. А.** Метод динамического согласования производства и транспорта / П. А. Козлов, С. П. Миловидов // Сборник трудов Института комплексных транспортных проблем. Выпуск 105. – Москва, 1985. – С. 156–163.

32 **Мишкuroв, П. Н.** Динамическая оптимизация вагонопотоков / П. Н. Мишкuroв, А. Н. Рахмангулов. – Москва : Русайнс, 2017. – 110 с. – ISBN 978-5-4365-1820-6.

33 Нейро-нечеткое моделирование транспортно-логистических процессов / О. Н. Числов, Н. Н. Лябах, М. В. Бакалов [и др.] // Транспорт : наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 10. – С. 23–27. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-10-4.

34 **Zhao, S.** An attention and wavelet based spatial-temporal graph neural network for traffic flow and speed prediction / S. Zhao, S. Xing, G. Mao // Mathematics. – 2022. – No. 19 (10). – P. 3507. – DOI 10.3390/math10193507.

35 **Jiang, W.** Graph Neural Network for traffic forecasting : A survey / W. Jiang, J. Luo // Expert Systems with Applications. – 2022. – No. 207. – P. 117921. – ISSN 0957-4174.

36 **Мишкuroв, П. Н.** Метод представления управленческих решений в имитационных моделях железнодорожных станций / П. Н. Мишкuroв, А. Н. Рахмангулов // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 22–23 мая 2024 г. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 197–201.

37 **Tominac, P. A.** Spatio-temporal economic properties of multi-product supply chains / P. A. Tominac, W. Zhang, V. M. Zavala // Computers & Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 159. – Article no. 107666. – DOI 10.48550/arXiv.2106.13836.

38 **Jiang, W.** Graph neural network for traffic forecasting : A survey / W. Jiang, J. Luo // Expert Systems with Applications. – 2022. – No. 207. – Article no. 117921 – DOI 10.48550/arXiv.2101.11174.

39 Multi-View Multi-Attention Graph Neural Network for Traffic Flow Forecasting / F. Wu,

freight transportation routing design / Q. Zhang, S. Liu, D. Gong, H. Zhang // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 157353–157362. – DOI 10.1109/ACCESS.2019.2948197.

30 **Osintsev, N. A.** Multicriteria methods of decision-making in transport and logistics / N. A. Osintsev // Transport of the Urals. – 2021. – No. 4 (71). – P. 3–17. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-3-17.

31 **Kozlov, P. A.** A Method of dynamic coordination of production and transport / P. A. Kozlov, S. P. Milovidov // collection of works of the Institute of complex transport problems. Iss. 105. – Moscow, 1985. – P. 156–163.

32 **Mishkurov, P. N.** Dynamic optimization of carriage flows / P. N. Mishkurov, A. N. Rakhmangulov. – Moscow : Rusains, 2017. – 110 p. – ISBN 978-5-4365-1820-6.

33 Neuro-fuzzy modeling of transport and logistics processes / O. N. Chislov, N. N. Lyabakh, M. V. Bakalov [et al.] // Transport : Science, Technology, Management. Scientific information collection. – 2022. – No. 10. – P. 23–27. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-10-4.

34 **Zhao, S.** An attention and wavelet based spatial-temporal graph neural network for traffic flow and speed prediction / S. Zhao, S. Xing, G. Mao // Mathematics. – 2022. – No. 19 (10). – P. 3507. – DOI 10.3390/math10193507.

35 **Jiang, W.** Graph Neural Network for traffic forecasting : A survey / W. Jiang, J. Luo // Expert Systems with Applications. – 2022. – No. 207. – P. 117921. – ISSN 0957-4174.

36 **Mishkurov, P. N.** Method of presentation of management decisions in simulation models of railway stations / P. N. Mishkurov, A. N. Rakhmangulov // Research and development of rail and road transport : collection of works of the International scientific and practical conference, Yekaterinburg, May 22–23, 2024. – Yekaterinburg : Ural State University of Railway Transport, 2024. – P. 197–201.

37 **Tominac, P. A.** Spatio-temporal economic properties of multi-product supply chains / P. A. Tominac, W. Zhang, V. M. Zavala // Computers & Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 159. – Article no. 107666. – DOI 10.48550/arXiv.2106.13836.

38 **Jiang, W.** Graph neural network for traffic forecasting : A survey / W. Jiang, J. Luo // Expert Systems with Applications. – 2022. – No. 207. – Article no. 117921 – DOI 10.48550/arXiv.2101.11174.

39 Multi-View Multi-Attention Graph Neural Network for Traffic Flow Forecasting /

C. Zheng, C. Zhang [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – No. 2 (13). – P. 711. – DOI 10.3390/app13020711.

40 **Трофимов, С. В.** Научно-методические основы функционирования и развития промышленных транспортных систем : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.01 / Трофимов Сергей Владимирович. – Москва, 2004. – 245 с.

F. Wu, C. Zheng, C. Zhang [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – No. 2 (13). – P. 711. – DOI 10.3390/app13020711.

40 **Trofimov, S. V.** Scientific and methodological foundations of the functioning and development of industrial transport systems : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.22.01 / Trofimov Sergey Vladimirovich. – Moscow, 2004. – 245 p.

P. N. Mishkurov

THE CONCEPT OF SPATIAL-TEMPORAL OPTIMIZATION OF TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES *

Abstract. The concept of spatial-temporal optimization of transport and logistics processes of industrial enterprises is proposed based on a combination of methods of multicriterial analysis, routing on specialized graphs of transport infrastructure, dynamic optimization on spatial-temporal graphs, simulation modeling and graph neural network. The combination of methods is necessary for forecasting and optimizing the parameters of transport and logistics processes in real time. The possibility of using the proposed combination of methods in the formation of optimal sequences of transport and logistics processes and synchronization of operational management of elements of the transport and logistics system of an industrial enterprise is shown. The developed approach will improve the efficiency of transport and logistics processes of industrial enterprises as a result of the integrated implementation of spatial-temporal optimization methods.

Keywords: transport and logistics process, spatial and temporal optimization, concept, combination of methods, industrial enterprise.

For citation: Mishkurov, P. N. The concept of spatial-temporal optimization of transport and logistics processes of industrial enterprises / P. N. Mishkurov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 219–230. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_219.

Сведения об авторах

Мишкурлов Павел Николаевич
Магнитогорский государственный
технический университет им. Г. И. Носова
(МГТУ им. Г. И. Носова),
кафедра «Логистика и управление
транспортными системами»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: p.mishkurov@magtu.ru

Information about the authors

Mishkurov Pavel Nikolaevich
Nosov Magnitogorsk State Technical University
(NMSTU),
Chair “Logistics and Transport Systems
Management”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: p.mishkurov@magtu.ru

С. Д. Подолинная, Р. Г. Король

МЕТОД ФАКТОРНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Исследования, направленные на выбор и оценку потенциальных мест размещения транспортно-логистических объектов, приобретают первостепенное значение в условиях активного развития транспортно-логистического комплекса Дальнего Востока. Сегодня активно осуществляется модернизация транспортной инфраструктуры, происходит усиление портовых мощностей и трансграничных переходов, поэтому требуется разработка новых подходов по выбору мест размещения транспортно-логистических центров. Целью работы является разработка метода факторно-аналитической оценки мест размещения транспортно-логистических объектов, а также его апробация на региональном уровне. К задачам исследования относится анализ существующих методов по выбору места размещения транспортно-логистического объекта, описание факторов, влияющих на выбор места размещения и формирование метода факторно-аналитической оценки. Использовались теоретические и эмпирические методы исследования. В статье рассматриваются дополнительные факторы, влияющие на выбор места размещения объекта, и подробно представлены этапы оценки мест размещения транспортно-логистических объектов.

Ключевые слова: приграничный транспортно-логистический объект, метод факторно-аналитической оценки, оценка места размещения, транспортно-логистический центр.

Для цитирования: Подолинная, С. Д. Метод факторно-аналитической оценки потенциальных мест размещения транспортно-логистических объектов / С. Д. Подолинная, Р. Г. Король // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025 – № 2. – С. 231–242. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_231.

Введение

Текущая геополитическая и экономическая обстановка оказала существенное влияние на функционирование транспортной отрасли [1]. Одной из тенденций развития логистики является переориентация внешнеторгового контейнеропотока с европейского на азиатско-тихоокеанское направление и увеличение объемов перевозок на альтернативных транспортных маршрутах, проходящих в обход транспортной сети России [2]. Переориентация грузопотоков в восточном направлении с ориентацией на рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) привела к увеличению нагрузки на трансграничную инфраструктуру. Пограничные переходы испытывают значительную загрузку имеющейся инфраструктуры и технологическое оборудование, требующее модернизацию и не соответствующее современным требованиям для обеспечения ускоренного прохождения международной границы [3]. На Восточно-экономическом форуме в 2023 году были приняты решения о развитии Дальневосточного региона путем модернизации трансграничной инфраструктуры с увеличением ее пропускной способности и создании международных территорий опережающего развития (МТОР) [4].

Устойчивость внешнеторговых связей России и Китая обеспечивается через эффективное функционирование системы наземных и морских пограничных пунктов пропуска, транспортную и терминально-логистическую инфраструктуру, а также информационное взаимодействие [5]. Развитие трансграничной инфраструктуры планируется за счет строительства транспортно-логистических центров (ТЛЦ) для обработки экспортно-импортных грузов. Данные центры могут войти в состав опорной сети ТЛЦ, которая планируется к реализации на территории Российской Федерации и будет способствовать развитию транспортного комплекса [6].

По результатам исследования в России необходимо создание около 80 мультимодальных транспортно-логистических центров (МТЛЦ) федерального, регионального и территориального уровня [7]. В России развитие терминальной инфраструктуры идет неравномерными темпами, в первую очередь из-за отсутствия систематического планирования и апробации данных, что приводит к неэффективному построению маршрутов перевозки грузов и последующему росту логистических расходов [8]. Поэтому для

эффективного функционирования сети МТЛЦ и снижения нерациональных транспортных затрат необходимо определить оптимальное месторасположение для последующего строительства ТЛЦ. Выбор оптимального места размещения логистического центра является важным моментом в вопросе формирования эффективной транспортно-логистической инфраструктуры [9].

На текущий момент существует множество методов решения вопроса выбора места расположения ТЛЦ, однако они не учитывают особенности, которые необходимы транспортно-логистическим центрам, располагающимся вблизи трансграничных переходов [10]. ТЛЦ вблизи международной границы можно отнести к трансграничным транспортно-логистическим объектам (ТЛО), так как они могут иметь различный функционал в зависимости от месторасположения, величины грузопотока и конечного потребителя [11]. В статье будут рассмотрены методы, используемые в исследованиях, посвященных выбору и оценке потенциальных мест для размещения транспортно-логистических объектов, проведен их анализ, на основе которого будет предложен метод факторно-аналитической оценки.

Основная часть

В данной статье использовался метод сравнительного анализа научных публикаций отечественных и зарубежных авторов. На основе изученных трудов сформирована табл. 1, позволяющая систематизировать существующие методы исследования поиска рационального места размещения объектов и факторы, которые рассматривались учеными как базовые при последующей оценке (где индекс 1 указывает на использование соответствующего фактора в методике).

Таблица 1

Анализ научных методов исследования выбора рационального места размещения объекта

Метод оценки	Факторы							
	Инфраструктурный	Географический	Социально-демографический	Экономический	Геополитический	Природно-климатический	Нормативно-правовой	Ресурсно-экологический
Методика в последовательном сужении множества решений	+	+				+	+	
Метод системной динамики	+	+	+		+			
Алгоритм муравьиной колонии	+	+		+				
Адаптивная методика отдельных методов	+	+		+				
Многокритериальная задача принятия решений с позиции метода анализа иерархии Т. Саати	+	+	+	+	+			
Модель промышленного штандорта	+	+	+					
Комбинированный метод факторного анализа	+		+			+		
Математическая модель совокупного эффекта в регионе	+		+	+	+		+	
Пространственный подход			+		+	+		+
Логистический анализ и синтез	+	+						+
Метод наименьших квадратов		+	+	+				+
Диаграмма Вороного	+	+	+					
Бальный рейтинг	+			+	+	+		
Многокритериальная оптимизация (MCDM)	+			+				
Факторный анализ	+			+	+	+		+
Факторно-аналитическая оценка	+	+	+	+	+	+	+	+

В рамках данного исследования рассматриваются методы системного анализа, к которым можно отнести методы балльного рейтинга и многокритериальной оптимизации, факторного анализа, принятия решений на основе критериев Лапласа, Гурвица, Ходжа – Лемана, Вальда и др. Предложенный в работе метод факторно-аналитической оценки мест размещения транспортно-логистических объектов основан на комбинации методов системного анализа. Факторный анализ используется для выявления ключевых параметров, влияющих на размещение ТЛО, применяется критериальная оценка, по аналогии с критериями Лапласа, Гурвица, учитывается влияние принятого решения, как в критерии Ходжа – Лемана, но с акцентом на региональную специфику. Существующие методы в основном рассматривают статические параметры (расстояние перевозки, инфраструктура, стоимость земли и т. п.). Метод факторно-аналитической оценки имеет отличительные особенности, заключающиеся в наличии динамических показателей, отражающих динамику изменения грузопотоков и сезонность перевозок, экономико-логистическую адаптивность под изменяющиеся показатели. В отличие от теоретических моделей данный метод может быть применен для оценки объектов, требующих нелинейного подхода, где результатом расчета станет ранжирование объектов по оценочной шкале и зонирование рассматриваемой территории по степени пригодности потенциальной площадки. Классические методы способны дать «точечную» оценку, в отличие от метода факторно-аналитической оценки, который будет комплексно учитывать динамику и адаптивность, что сегодня является актуальным для регионов Дальнего Востока.

В результате анализа научных публикаций были выделены следующие факторы, которые можно рассматривать как основополагающие и которые применяются в различных методах при оценке места для размещения транспортно-логистических объектов [12]. Описанные методы ориентированы на оценку экономического эффекта от организации транспортно-логистического центра и потенциальном экономическом и социальном развитии региона. Однако в данных методах не учитывается техническая и технологическая составляющие транспортного процесса, которые влияют на эффективность обслуживания грузопотоков, и данные факторы необходимо учитывать при выборе месторасположения ТЛЦ [13]. Все факторы отражают степень изученности проблемы и могут рассматриваться в качестве основных, на которые следует ориентироваться при выборе наиболее рационального места. Для всесторонней и комплексной оценки авторами предлагается дополнить перечень следующими факторами:

- технологический;
- международного сотрудничества;
- грузодинамический;
- стратегический.

Введенный грузодинамический фактор в контексте данного исследования имеет более узкое и специфическое значение, чем показатель динамики грузовой массы. Грузодинамический фактор представляет собой частный аналитический показатель, который учитывает не только изменение грузовой массы, но и влияние этих изменений на выбор места размещения логистических объектов. Данный фактор направлен на анализ интенсивности колебаний грузопотоков (сезонность, пиковые нагрузки), пространственную неравномерность распределения грузов, чувствительность логистической инфраструктуры к этим изменениям и т. п. Для всесторонней оценки потенциальных мест размещения транспортно-логистических объектов необходимо было выделить фактора, который учитывает нестабильность движения грузопотоков и изменения грузовой базы. В условиях внешнеторговой активности на дальневосточные регионы приходится значительные объемы грузовых и транспортных потоков, поэтому грузодинамический фактор при колебаниях спроса позволит количественно оценить возможные риски для логистических центров, а также интегрирует данные о грузовой динамике в модель выбора оптимального местоположения ТЛО.

Использование дополнительных факторов позволит рассмотреть проблему выбора места размещения транспортно-логистического объекта с точки зрения стратегического и перспективного развития рассматриваемой области, учитывая факт международного сотрудничества, особенно при размещении объекта в приграничном регионе для обработки внешнеторговых грузов, технологическую составляющую организации перевозок и динамику роста грузо- и пассажиропотока [14]. Рассмотренные факторы систематизированы на рис. 1.

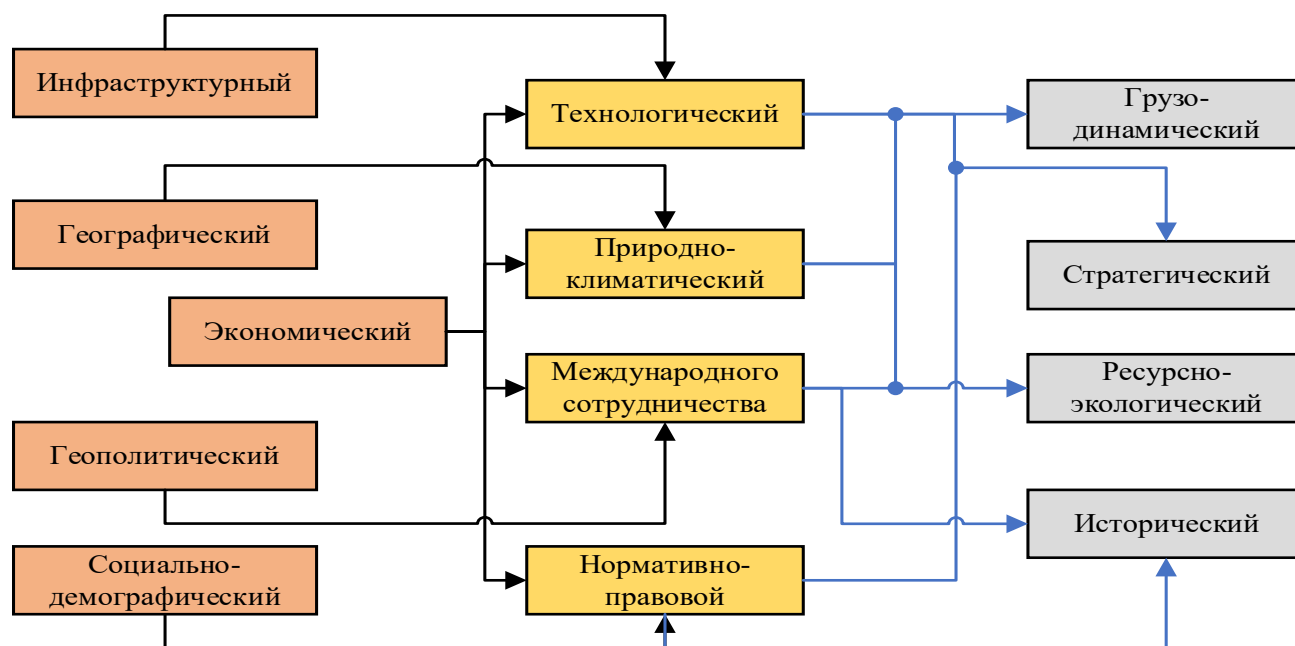


Рис. 1. Структурная взаимосвязь факторов

На схеме представлена систематизация факторов по уровням в зависимости от степени взаимной зависимости. Первый уровень – базовые факторы, представляют собой укрупненную группу факторов, ориентированных на отражение текущей и перспективной ситуации в определенной области. Второй уровень – составные факторы 1-го порядка, будут возникать в областях тяготения двух базовых факторов. Третий уровень – составные факторы 2-го порядка, возникают в процессе взаимодействия трех базовых факторов, формируя новые области своей деятельности. Таким образом, факторы 2-го порядка будут наиболее зависимыми, при изменении количественных характеристик базовых факторов будут иметь наиболее сильное взаимное влияние.

Изучение структурной взаимосвязи позволит провести анализ факторов с последующим выявлением зависимости, что будет основой для разработки метода факторно-аналитической оценки. Метод ориентирован на комплексную оценку потенциальных мест для размещения транспортно-логистических объектов, где итогом расчетов будет являться комплексный индекс, на основе которого можно будет принимать решение о последующем размещении объекта [15].

На первом этапе расчетов необходимо сформировать шкалу оценочных значений. Максимально возможное значение оценочной шкалы формируется автором каждого исследования самостоятельно, но рекомендуется принимать шкалу в следующем промежутке $[1; n]$, где n – количество объектов, принимаемых к оценке. Проставление оценок происходит от наибольшего значения к наименьшему, где n – максимально возможное количество баллов, а 1 – минимальное возможное количество баллов. Для наглядного отражения результатов и последующих расчетов строится матрица оценочных значений (табл. 2), в которой $P_j^{\Phi_n}$ – j -й показатель n -го фактора; a_{nj} – оценка j -го показателя n -го фактора. Для оценки достоверности полученных результатов определяется индекс согласованности (10), который рассчитывается посредством умножения матриц. Произвести данные вычисления возможно при выполнении следующего условия:

$$O_n = \Phi_n,$$

где O_n – n -е количество оцениваемых объектов;

Φ_n – n -е количество рассматриваемых факторов.

Проводить последующие исследовательские расчеты с соблюдением данного условия нецелесообразно, так как оно не позволяет объективно оценить рассматриваемые объекты. Поэтому соблюдение данного условия не является обязательным. В рамках данной работы будут проведены расчеты с соблюдением условия с целью проверки разработанного метода на реальных объектах и достоверности полученных результатов.

Таблица 2

Оценочная матрица потенциальных мест расположения транспортно-логистических объектов

Объект исследования	Факторы								
	Φ ₁			Φ ₂			Φ _n		
	Показатели								
	Π ₁ ^Φ	Π ₂ ^{Φ₁}	Π _j ^{Φ₁}	Π ₁ ^{Φ₂}	Π ₂ ^{Φ₂}	Π _j ^{Φ₂}	Π ₁ ^{Φ_n}	Π ₂ ^{Φ_n}	Π _j ^{Φ_n}
O ₁	a ₁₁	a ₁₂	a _{1j}	a ₁₁	a ₁₂	a _{1j}	a ₁₁	a ₁₂	a _{1j}
O ₂	a ₂₁	a ₂₂	a _{2j}	a ₂₁	a ₂₂	a _{2j}	a ₂₁	a ₂₂	a _{2j}
O _n	a _{n1}	a _{n2}	a _{nj}	a _{n1}	a _{n2}	a _{nj}	a _{n1}	a _{n2}	a _{nj}

Второй этап предусматривает расчет поправочного и весового коэффициентов показателей. Поправочный коэффициент используется для корректировки оценочных значений с учетом отклонения j -го показателя от эталонного значения. Эталонном следует считать средневзвешенное или минимально допустимое значение показателя. Расчет поправочного коэффициента будет различный в зависимости от оценочной шкалы:

а) если оценка производится от наибольшего значения показателя к наименьшему, тогда формула расчета будет иметь вид:

$$K_{pi} = \frac{A_i}{A_0}, \quad (1)$$

где K_{pi} – поправочный коэффициент j -го показателя n -го фактора; A_i – численное значение j -го показателя n -го фактора; A_0 – эталонное j -го показателя;

б) если оценка производится от наименьшего значения показателя к наибольшему, тогда формула расчета будет выглядеть следующим образом:

$$K_{pi} = \left(1 - \frac{A_i}{A_0}\right) + 1. \quad (2)$$

После вычисления поправочного коэффициента необходимо скорректировать значения оценочной матрицы следующим образом:

$$a_{nj}^H = a_{nj} * K_{pi}, \quad (3)$$

где a_{nj}^H – скорректированная оценка j -го показателя n -го фактора с учетом поправочного коэффициента.

После произведенных расчетов необходимо сформировать скорректированную матрицу оценки с учетом новых значений (табл. 3).

Таблица 3

Скорректированная оценочная матрица потенциального месторасположения транспортно-логистических объектов

Объект исследования	Факторы								
	Φ ₁			Φ ₂			Φ _n		
	Показатели								
	Π ₁ ^Φ	Π ₂ ^{Φ₁}	Π _j ^{Φ₁}	Π ₁ ^{Φ₂}	Π ₂ ^{Φ₂}	Π _j ^{Φ₂}	Π ₁ ^{Φ_n}	Π ₂ ^{Φ_n}	Π _j ^{Φ_n}
O ₁	a ₁₁ ^H	a ₁₂ ^H	a _{1j} ^H	a ₁₁ ^H	a ₁₂ ^H	a _{1j} ^H	a ₁₁ ^H	a ₁₂ ^H	a _{1j} ^H
O ₂	a ₂₁ ^H	a ₂₂ ^H	a _{2j} ^H	a ₂₁ ^H	a ₂₂ ^H	a _{2j} ^H	a ₂₁ ^H	a ₂₂ ^H	a _{2j} ^H
O _n	a _{n1} ^H	a _{n2} ^H	a _{nj} ^H	a _{n1} ^H	a _{n2} ^H	a _{nj} ^H	a _{n1} ^H	a _{n2} ^H	a _{nj} ^H

Третьим этапом является расчет весового коэффициента, который отражает вес каждого показателя в итоговой оценке или значимость показателей по отношению друг к другу по формуле:

$$K_{vi} = \frac{\lambda_j}{\lambda}, \quad (4)$$

где K_{vi} – весовой коэффициент j -го показателя n -го фактора; λ_j – собственный вектор j -го показателя; λ – суммарный вектор собственных векторов показателей. Собственный вектор – это понятие в линейной алгебре, которое характеризует свойства оператора без привязки к конкретной системе координат. Вычисление собственного вектора осуществляется по формуле:

$$\lambda_j = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{nj}^H}. \quad (5)$$

Вычисление суммарного вектора представляется как сумма собственных векторов по всем показателям:

$$\lambda = \sum_{j=1}^n \lambda_j. \quad (6)$$

После вычисления весового коэффициента необходимо повторно скорректировать значения оценочной матрицы:

$$a_{nj}^{H2} = a_{nj} * K_{vi}. \quad (7)$$

Скорректированная матрица оценки будет иметь следующий вид, представленный в табл. 4.

Таблица 4

Повторно скорректированная оценочная матрица потенциального месторасположения транспортно-логистических объектов

Объект исследования	Факторы								
	Φ ₁			Φ ₂			Φ _n		
	Показатели								
	Π ₁ ^Φ	Π ₂ ^{Φ₁}	Π _j ^{Φ₁}	Π ₁ ^{Φ₂}	Π ₂ ^{Φ₂}	Π _j ^{Φ₂}	Π ₁ ^{Φ_n}	Π ₂ ^{Φ_n}	Π _j ^{Φ_n}
O ₁	a ₁₁ ^{H2}	a ₁₂ ^{H2}	a _{1j} ^{H2}	a ₁₁ ^{H2}	a ₁₂ ^{H2}	a _{1j} ^{H2}	a ₁₁ ^{H2}	a ₁₂ ^{H2}	a _{1j} ^{H2}
O ₂	a ₂₁ ^{H2}	a ₂₂ ^{H2}	a _{2j} ^{H2}	a ₂₁ ^{H2}	a ₂₂ ^{H2}	a _{2j} ^{H2}	a ₂₁ ^{H2}	a ₂₂ ^{H2}	a _{2j} ^{H2}
O _n	a _{n1} ^{H2}	a _{n2} ^{H2}	a _{nj} ^{H2}	a _{n1} ^{H2}	a _{n2} ^{H2}	a _{nj} ^{H2}	a _{n1} ^{H2}	a _{n2} ^{H2}	a _{nj} ^{H2}

Четвертым этапом расчетов будет являться расчет весовых коэффициентов факторов и индекса согласованности. Посредством повторно скорректированной матрицы (табл. 3) необходимо рассчитать собственные векторы показателей и суммарный вектор по факторам согласно формулам (5)–(6). Далее, используя формулу (4), необходимо рассчитать весовой коэффициент факторов и сформировать оценочную матрицу (табл. 5).

Таблица 5

Оценочная матрица факторов, влияющих на выбор месторасположения транспортно-логистических объектов

Объект исследования	Факторы		
	Φ_1	Φ_2	Φ_n
O_1	$a_{11}^{\Phi_1}$	$a_{11}^{\Phi_1}$	$a_{n1}^{\Phi_n}$
O_2	$a_{21}^{\Phi_1}$	$a_{21}^{\Phi_1}$	$a_{n1}^{\Phi_n}$
O_n	$a_{n1}^{\Phi_1}$	$a_{n2}^{\Phi_2}$	$a_{nn}^{\Phi_n}$

$$a_{nj}^{\Phi_n} = \sum_{j=1}^n a_{nj}^{H2} * K_{vi}^{\Phi_n}, \quad (8)$$

где $a_{nj}^{\Phi_n}$ – оценка n -го фактора n -го объекта с учетом весового коэффициента; a_{nj}^{H2} – скорректированная оценка j -го показателя n -го фактора с учетом весового коэффициента; $K_{vi}^{\Phi_n}$ – весовой коэффициент n -го фактора.

После оценки факторов происходит вычисление комплексного индекса:

$$I_n = \sum a_{nj}^{\Phi_n}. \quad (9)$$

Пятым этапом вычислений будет расчет индекса согласованности, отражающего согласованность производимых вычислений:

$$S = \frac{\overline{\lambda_{max}} - n}{n-1}, \quad (10)$$

где λ_{max} – максимальное значение матрицы; n – количество рассматриваемых объектов. Максимальное собственное значение матрицы определяется посредством умножения матриц. Для корректного расчета индекса согласованности необходимо, чтобы количество оцениваемых объектов и рассматриваемых факторов было равно.

$$\lambda_{max} = \begin{pmatrix} a_{11}^{\Phi_1} & a_{11}^{\Phi_1} & a_{n1}^{\Phi_n} \\ a_{21}^{\Phi_1} & a_{21}^{\Phi_1} & a_{n1}^{\Phi_n} \\ a_{n1}^{\Phi_1} & a_{n2}^{\Phi_2} & a_{nn}^{\Phi_n} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} K_{vi}^{\Phi_1} \\ K_{vi}^{\Phi_2} \\ K_{vi}^{\Phi_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{1max}^{\Phi_1} \\ \lambda_{2max}^{\Phi_2} \\ \lambda_{nmax}^{\Phi_n} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

По итогам вычисления двух массивов данных будет получена вектор-матрица, которую необходимо трансформировать в численное значение, для этого необходимо определить среднее арифметическое значение:

$$\overline{\lambda_{max}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{max}^{\Phi_n}}{K_{vi}^{\Phi_n}}}{n}, \quad (12)$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{max}^{\Phi_n}}{K_{vi}^{\Phi_n}}$ – сумма отношений максимального показателя вектора к весовому коэффициенту показателя; n – количество рассматриваемых объектов.

Определив индекс согласованности, необходимо сравнить его значение со шкалой Марголина (табл. 6), отражающей степень согласованности. В соответствии с полученным значением, при высокой степени согласованности, оценку можно будет использовать в сравнительном анализе, при низкой степени согласованности расчет необходимо будет повторить.

Таблица 6

Диапазон допустимых отклонений при оценке согласованности мнений

Диапазон сравнения	Степень согласованности
$0 \leq S < 0,1$	Очень высокая
$0,1 \leq S < 0,3$	Высокая
$0,3 \leq S < 0,5$	Умеренная
$0,5 \leq S < 0,7$	Слабая
$0,7 \leq S < 0,9$	Очень слабая
$0,9 \leq S \leq 1$	Отсутствует

Метод факторно-аналитической оценки позволяет провести разностороннюю оценку потенциальных мест расположения транспортно-логистических объектов, сформировать матрицу, отражающую степень развития и перечень потенциальных мест для размещения транспортно-логистических объектов.

Выводы

По результатам работы факторно-аналитический метод был применен для оценки регионов на рациональность размещения транспортно-логистического объекта. Объектом исследования выступили восемь регионов страны. Выбор регионов России также обоснован необходимостью сравнения Дальневосточного округа по отношению к другим регионам. В настоящий момент нет открытой статистики по пунктам пропуска и приграничным территориям, поэтому проверить работоспособность разработанного метода на реальных объектах с получением достоверных результатов не представляется возможным. Проведенный анализ позволил определить потенциальные области для последующего развития в условиях увеличивающегося грузо- и пассажиропотоков. Оценка производилась по 44 показателям [16–20], разделенных на восемь факторов. По итогам вычислений был рассчитан комплексный

показатель развития регионов и индекс согласованности. Индекс согласованности составил 0,09, и в соответствии со шкалой Марголина может быть охарактеризован как «очень высокий», что отражает правильность проведенных расчетов. Конечный результат расчетов комплексного индекса сведен в табл. 7.

Таблица 7

Результаты реализации метода факторно-аналитической оценки регионов

Регион	Инфраструктурный	Социально-демографический	Географический	Экономический	Геополитический	Технологический	Природно-климатический	Стратегический	Комплексный показатель
Центральный	0,186	0,222	0,088	0,128	0,061	0,089	0,072	0,113	0,959
Северо-Западный	0,116	0,191	0,076	0,088	0,056	0,069	0,046	0,107	0,748
Южный	0,115	0,173	0,058	0,096	0,061	0,075	0,056	0,105	0,740
Приволжский	0,128	0,200	0,093	0,108	0,038	0,094	0,057	0,116	0,833
Уральский	0,105	0,218	0,050	0,087	0,024	0,083	0,061	0,104	0,732
Сибирский	0,090	0,211	0,052	0,109	0,028	0,064	0,061	0,062	0,676
Дальневосточный	0,099	0,178	0,042	0,085	0,042	0,054	0,068	0,095	0,663
Северо-Кавказский	0,128	0,130	0,043	0,055	0,028	0,029	0,055	0,078	0,546

На основе полученных результатов в табл. 7 была сформирована линейчатая диаграмма, графически отражающая результаты расчета (рис. 2). Результаты показывают, что наиболее развитым регионом является Центральный, а наименее – Северо-Кавказский. На основе полученных данных можно провести комплексную оценку регионов. В сочетании с методами прогнозирования возможно проанализировать развитие региона в определенной области в течение нескольких лет и спрогнозировать последующие результаты. В рамках данного исследования это позволит руководителям получить наглядное представление о функционировании региона и предпринять действия по ликвидации проблемных мест и их последующему усовершенствованию [21].

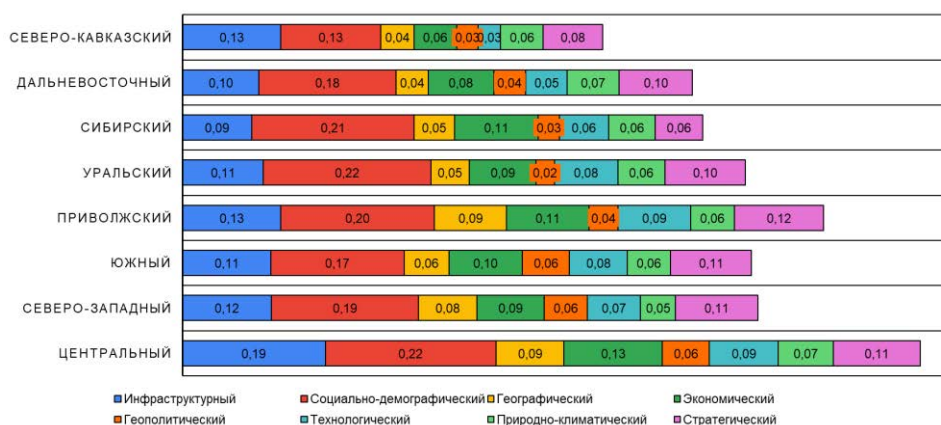


Рис. 2. Графическое представление результатов оценки

На диаграмме представлены результаты анализа, отражающие территориальные особенности развития регионов в соответствии с факторными индексами. Величина индекса отражает степень развития в определенной области и помогает определить проблемные области. Наименее развитой областью является геополитический фактор, а наиболее – социально-демографический. Важно учитывать выделенные факторы при принятии решений, каждый из них отражает различные аспекты развития местности и на них необходимо ориентироваться потенциальным инвесторам. Потенциальным местом для размещения ТЛЦ станет наиболее сбалансированная по факторам область, которая также имеет перспективы к дальнейшему развитию.

При проектировании и эксплуатации транспортно-логистических объектов требуется произвести оценку местности для выбора наиболее оптимального и рационального места расположения. Выявленные факторы также окажут влияние на структурно-функциональные характеристики проектируемого ТЛЦ [22]. В работе были рассмотрены методы, используемые в исследованиях, посвященных выбору и оценке потенциальных мест для размещения транспортно-логистических объектов, проведен их сравнительный анализ. На основе анализа был сформирован метод факторно-аналитической оценки. Предложенный метод позволит провести комплексный анализ деятельности местности посредством выделенных факторов. Последующим развитием исследования в данном направлении может стать выявление критериев выбора места для размещения трансграничного объекта с последующим зонированием территории и перекрёстным сравнением методом факторно-аналитической оценки.

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 **Король, Р. Г.** Распределение грузопотоков в системе пограничных пунктов пропуска транспортного коридора «Приморье-2» / Р. Г. Король, А. С. Акельев // Наука и техника транспорта. – 2023. – № 3. – С. 52–59. – ISSN 2074-9325.

3 **Володькин, П. П.** Перспективы развития транспортной системы в дальневосточном регионе / П. П. Володькин // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Международной научно-технической конференции : Тюменский индустриальный университет. Тюмень, 2021. – С. 43–46. – ISBN 978-5-9961-2631-6.

4 **Подолінная, С. Д.** Факторный анализ научных исследований, рассматривающих выбор месторасположения объекта терминально-логистической инфраструктуры / С. Д. Подолінная // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2024) : сборник трудов II Международной научно-практической конференции ; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 82–85. – ISBN 978-5-7641-2019-5.

5 **Король, Р. Г.** Развитие терминально-логистической инфраструктуры арктических и северо-восточных регионов Дальнего Востока / Р. Г. Король // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 6 (96). – С. 84–92. – ISSN 1997-0722.

References

1 Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy / E. A. Mamaev, A. N. Guda, V. A. Finochenko, K. A. Godovany // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

2 **Korol, R. G.** Distribution of freight flows in border checkpoint system of Primorye-2 transport corridor / R. G. Korol, A. S. Akeliev // Science and Technology in Transport. – 2023. – No. 3. – P. 52–59. – ISSN 2074-9325.

3 **Volodkin, P. P.** Prospects for the Development of the Transport System in the Far Eastern Region / P. P. Volodkin // Transport and Transport-Technological Systems : Proc. of the Int. scientific-tech. conf. : Industrial University of Tyumen. Tyumen, 2021. – P. 43–46. – ISBN 978-5-9961-2631-6.

4 **Podolinnaya, S. D.** Factor analysis of scientific studies considering the choice of location of a terminal and logistics infrastructure facility / S. D. Podolinnaya // Management of operational work in transport (UERT-2024) : Coll. proc. II Int. scientific-practical. conf. ; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. – Saint Petersburg, 2024. – P. 82–85. – ISBN 978-5-7641-2019-5.

5 **Korol, R. G.** Development of terminal and logistics infrastructure of the Arctic and north-eastern regions of the Far East / R. G. Korol // Vestnik transporta Povolzhya. – 2022. – No. 6 (96). – P. 84–92. – ISSN 1997-0722.

6 **Пугачев, И. Н.** Развитие транспортно-логистического комплекса Дальневосточного региона России / И. Н. Пугачев, Р. Г. Король, Н. С. Нестерова // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2022. – № 4 (33). – С. 25–34. – ISSN 2415-8658.

7 Формирование узловых мультимодальных транспортно-логистических центров / С. Э. Ольховиков, Е. А. Петренева, И. Н. Кагадий, О. Б. Шерстобитова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 106–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_106.

8 Факторно-аналитический метод поиска места размещения объектов терминальной инфраструктуры / С. Д. Подолинная, С. П. Дроздов, Ф. А. Колодкин, Ю. С. Серикова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием. В 2 т. Т. 1. – Хабаровск, 2024. – С. 148–152. – ISBN 978-5-262-00974-9.

9 **Апатцев, В. И.** Оценка факторов, влияющих на выбор оптимального месторасположения объектов логистической инфраструктуры / В. И. Апатцев, И. М. Басыров // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 1. – С. 33–37. – ISSN 2074-9325.

10 **Бардаль, А. Б.** Методика определения расположения логистических центров (на примере Дальнего Востока России) / А. Б. Бардаль, М. А. Сигитова // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2019. – № 3 (54). – С. 91–98. – ISSN 1996-3440.

11 К вопросу о размещении транспортно-логистических центров на приграничных территориях Российской Федерации / Р. Ю. Упырь, А. В. Дудакова, И. А. Чубарова, Н. Ю. Гончарова // Транспорт : наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2024. – № 8. – С. 15–24. – DOI 10.36535/0236-1914-2024-08-3.

12 **Москвичев, О. В.** Системный анализ математических моделей размещения транспортно-логистических объектов различного уровня / О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81, № 3. – С. 267–276. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276.

13 **Ларин, О. Н.** Алгоритмы размещения терминалов в транспортной сети / О. Н. Ларин, А. В. Боков, М. А. Кoryтова // Университетские чтения – 2024 : материалы Всероссийской кон-

6 **Pugachev, I. N.** Development of transport and logistics complex of the Far Eastern regions of Russia / I. N. Pugachev, R. G. Korol, N. S. Nesterova // Transport of the Asia-Pacific region. – 2022. – No. 4 (33). – P. 25–34. – ISSN 2415-8658.

7 Formation of nodal multimodal transport and logistics centers / S. E. Olkhovikov, E. A. Petrenева, I. N. Kagadiy, O B. Sherstobitova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 106–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_106.

8 Factor-analytical method for finding the location of terminal infrastructure facilities / S. D. Podolin-naya, S. P. Drozdov, F. A. Kolodkin, Yu. S. Serikova // Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the 21st century : Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference of creative youth with international participation. In 2 volumes. V. 1. – Khabarovsk, 2024. – P. 148–152. – ISBN 978-5-262-00974-9.

9 **Apattsev, V. I.** Assessment of factors influencing the choice of the optimal location of logistics infrastructure facilities / V. I. Apattsev, I. M. Basyrov // Science and Technology in Transport. – 2017. – No. 1. – P. 33–37. – ISSN 2074-9325.

10 **Bardal, A. B.** Methodology for determining the location of logistics centers (on the example of the Far East of Russia) / A. B. Bardal, M. A. Sigitova // Bulletin of Pacific national university. – 2019. – No. 3 (54). – P. 91–98. – ISSN 1996-3440.

11 On the issue of placing transport and logistics centers in the border areas of the Russian Federation / R. Yu. Upyr, A. V. Dudakova, I. A. Chubarova, N. Yu. Goncharova // Transport : science, technology, management. Scientific information collection. – 2024. – No. 8. – P. 15–24. – DOI 10.36535/0236-1914-2024-08-3.

12 **Moskvichev, O. V.** System analysis of mathematical models for the placement of transport and logistics facilities of different levels / O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva // Russian railway science journal. – 2022. – Vol. 81, No. 3. – P. 267–276. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276.

13 **Larin, O. N.** Algorithms for terminal placement in the transport network / O. N. Larin, A. V. Bokov, M. A. Korytova // University Readings – 2024 : proceedings of the All-Russian Conference with international students : Pyatigorsk State University. Pyatigorsk, 2024. – P. 84–90. – EDN LZAQRI.

ференции с международным участием : Пятигорский государственный университет. Пятигорск, 2024. – С. 84–90. – EDN LZAQRI.

14 **Илесалиев, Д. И.** К вопросу о наиболее рациональном размещении грузовых терминалов / Д. И. Илесалиев, Е. К. Коровяковский // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 162–166. – EDN WIYBTP.

15 **Подолінная, С. Д.** Определение места размещения транспортно-логистического объекта в особых экономико-географических зонах / С. Д. Подолінная, Р. Г. Король // Транспорт Урала. – 2024. – № 4 (83). – С. 69–75. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-4-69-75.

16 Российский статистический ежегодник. – 2023 : стат. сборник / Росстат. – Москва, 2023. – 701 с.

17 Российский статистический ежегодник. – 2024 : статистический сборник / Росстат. – Москва, 2024. – 630 с.

18 Регионы России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации. – 2023 : статистический сборник / Росстат. – Москва, 2023. – 853 с.

19 Демографический ежегодник России. 2023 : статистический сборник / Росстат. – Москва, 2023. – 256 с.

20 Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 20.02.2025).

21 **Лакхметкина, Н. Ю.** Анализ рисков при обосновании проекта транспортно-логистического центра / Н. Ю. Лакхметкина // Логистические системы в глобальной экономике. – 2023. – № 13. – С. 109–112. – EDN KNZNKL.

22 Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенов [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 800–811. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811.

14 **Ilesaliev, D. I.** On the issue of the most rational placement of cargo terminals / D. I. Ilesaliev, E. K. Korovyakovsky // Transport : problems, ideas, prospects : collection of works. LXXVI All-Russian scientific and technical conference : Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. – Saint Petersburg, 2016. – P. 162–166. – EDN WIYBTP.

15 **Podolinnaya, S. D.** Determining the location for transport and logistics facility in special economic and geographical zones / S. D. Podolinnaya, R. G. Korol // Transport of the Urals. – 2024. – No. 4 (83). – P. 69–75. – DOI 10.20291/1815-9400-2024-4-69-75.

16 Russian Statistical Yearbook. – 2023 : statistical collection / Rosstat. – Moscow, 2023. – 701 p.

17 Russian Statistical Yearbook. – 2024 : statistical collection / Rosstat. – Moscow, 2024. – 630 p.

18 Regions of Russia. The main characteristics of the subjects of the Russian Federation. – 2023 : statistical collection / Rosstat. – Moscow, 2023. – 853 p.

19 Demographic Yearbook of Russia. – 2023 : statistical collection / Rosstat. – Moscow, 2023. – 256 p.

20 Federal State Statistics Service. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (date of access: 02/20/2025).

21 **Lakhmetkina, N. Yu.** Risk analysis in substantiation of the project of a transport and logistics center / N. Yu. Lakhmetkina // Logistics systems in the global economy. – 2023. – No. 13. – P. 109–112. – EDN KNZNKL.

22 Configuring the thermal and warehouse infrastructure of a transportation hub based on the development of the method of economic and geographical differentiation of cargo flows / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. V. Trapenov [et al.] // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2022. – Vol. 19, No. 4. – P. 800–811. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811.

S. D. Podolinnaya, R. G. Korol

THE METHOD OF FACTOR-ANALYTICAL ASSESSMENT OF POTENTIAL LOCATIONS OF TRANSPORT AND LOGISTICS FACILITIES

Abstract. Research aimed at selecting and evaluating potential locations for transport and logistics facilities is of paramount importance in the context of the active development of the transport and logistics complex in the Far East. Today, the modernization of the transport

infrastructure is actively underway, port facilities and cross-border crossings are being strengthened, so new approaches need to be developed to select locations for transport and logistics centers. The aim of the work is to develop a method for factor-analytical assessment of locations of transport and logistics facilities, as well as its testing at the regional level. The objectives of the research include the analysis of existing methods for choosing the location of a transport and logistics facility, a description of the factors influencing the choice of location and the formation of a factor-analytical assessment method. Theoretical and empirical research methods were used. The article considers additional factors influencing the choice of an object's location, and describes in detail the stages of assessing the locations of transport and logistics facilities.

Keywords: cross-border transport and logistics facility, factor analysis method, location assessment, transport and logistics center.

For citation: Podolinnaya, S. D. The method of factor-analytical assessment of potential locations of transport and logistics facilities / S. D. Podolinnaya, R. G. Korol // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 231–242. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_2_231.

Сведения об авторах

Подолинная София Дмитриевна

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Управление процессами перевозок»,
аспирант,
e-mail: sofiyka_44@mail.ru

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Управление процессами перевозок»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kingkhv27@mail.ru

Information about the authors

Podolinnaya Sofia Dmitrievna

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair “Transportation process management”,
Postgraduate Student,
e-mail: sofiyka_44@mail.ru

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair “Transportation process management”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kingkhv27@mail.ru

Д. В. Сорокин, А. И. Хашев, С. М. Наурузбаев, А. И. Степовая, А. П. Яновский

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКА МЕЖДУ ВИДАМИ ТРАНСПОРТА НА ГЕНЕРАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ МТК «СЕВЕР – ЮГ» *

Аннотация. В сложившихся экономических и политических реалиях для Российской Федерации задача транспортных коридоров заключается не только в обеспечении транзитных перевозок на евразийском пространстве. Экспортно-импортные и внутри-российские маршруты являются приоритетными направлениями в работе национального транспортного комплекса. Применение мультимодальных схем доставки грузов по маршрутам международного транспортного коридора (МТК) «Север – Юг» предполагает несколько логистических маршрутов, каждый из которых имеет определенную вариативность. Российская транспортная система, в частности ее региональная часть МТК «Север – Юг», позволяет комбинированное использование трех видов транспорта при грузоперевозках: автомобильный, водный и железнодорожный.

Рассмотрены теоретические аспекты перераспределения грузопотоков между различными видами транспорта на генеральных направлениях МТК «Север – Юг» и его влияние на стратегическое планирование российской экономической деятельности. Представлены результаты, полученные в ходе исследования, приведено обоснование применяемого методического аппарата исследования. Сделаны выводы и даны рекомендации по практическому применению полученных результатов, обозначены перспективы дальнейших исследований в области стратегического планирования работы транспортных предприятий на маршрутах МТК «Север – Юг».

Ключевые слова: мультимодальные перевозки, МТК «Север – Юг», стратегическое планирование грузоперевозок, модель оптимальных маршрутов продвижения грузопотоков, оценка потенциала МТК, зона притяжения грузопотоков МТК, смешанная экономическая модель.

Для цитирования: Оценка возможности перераспределения грузопотока между видами транспорта на генеральных направлениях МТК «Север – Юг» / Д. В. Сорокин, А. И. Хашев, С. М. Наурузбаев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 243–253. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_243.

Введение

Основной задачей национальной транспортной системы является обеспечение бесперебойного функционирования экономики страны, в частности, удовлетворение потребности в перевозках частного и государственного предпринимательства. Существуют три способа решения (т.е. организации экономической системы в стране), так или иначе доказавших свою состоятельность и функционирующих в крупнейших мировых экономиках:

- командно-административная система (1921–1986 гг. в СССР);
- рыночная система (XIX в. – по настоящее время (далее – н. в.) в США, XVIII в. – середина XX в. в Великобритании);
- смешанная система (1979 г. – н. в. в Китае, 1991 г. – н. в. в Российской Федерации (далее – РФ), середина XX в. – н. в. в Великобритании).

В некоторых странах, таких как Аргентина, Франция, Германия, Италия, действовали все вышеперечисленные экономические системы в разный период их истории. Преимущества и недостатки каждой из систем являются общеизвестными. Следует упомянуть о том, что в настоящее время смешанная экономическая система является доминирующей в большинстве развитых стран мира. Это обусловлено возможностью регулировать уровень государственного вмешательства в экономику в зависимости от ситуативной необходимости; а также в зависимости от политической системы и государственного устройства, с учетом национальных особенностей в каждой отдельно взятой стране.

* Работа выполнена в рамках гранта банка ВТБ (ПАО) на выполнение молодыми учеными научных работ по теме «Технологическое и экономическое обоснование приоритетных направлений совершенствования взаимодействия видов транспорта в российском сегменте международного транспортного коридора «Север – Юг».

Характерные особенности, перешедшие российской экономике «по наследству» от СССР, можно разделить на:

1) отрицательные – замедляющие социально-экономическое развитие:

- зависимость доходов государственного бюджета от экспорта продукции топливно-энергетического комплекса (ТЭК);
- высокий процент изношенности основных фондов транспортной инфраструктуры, в частности железнодорожной (пути сообщения, тяговый и нетяговый подвижной состав и др.), и других отраслей тяжелой промышленности;
- нерациональное и низкоэффективное использование сырья в производстве;
- низкая (по сравнению с ведущими мировыми экономиками) производительность труда работников промышленного сектора на всех уровнях производства и управления;
- монополизация основных секторов экономики (военно-промышленный комплекс, транспорт, добыча полезных ископаемых и др.);
- концентрация всех технологических, социальных достижений, а также денежных потоков в центре страны, недостаточное развитие периферии, замедленная модернизация всех сфер жизни;
- внешнеполитическая нестабильность во взаимоотношениях со странами Европейского союза и США;

2) положительные:

- возможность инвестирования высоких доходов от экспорта продукции ТЭК в инновационные и высокотехнологические отрасли экономики, в том числе в национальную транспортную систему;
- единое таможенное и транспортное пространство стран Евразийского экономического союза (железнодорожная колея 1520 мм), способствующее построению «беспровых» трансевразийских транспортных коридоров и привлечению транзитных грузопотоков;
- обширная территория, обеспечивающая наличие торговых портов в Азово-Черноморском, Арктическом, Балтийском, Дальневосточном и Каспийском бассейнах;
- относительно развитая авто- и железнодорожная сеть, объединяющая внутрироссийское пространство и соединяющая промышленные предприятия с рынками реализации производимой продукции.

Использование сильных сторон смешанной модели экономики в совокупности с перечисленными преимуществами, имеющимися в распоряжении РФ, способствует построению стабильной социально-экономической системы внутри страны, устойчивой к турбулентности во внешней политике.

Внеэкономические и геополитические вызовы, стоящие перед российской транспортной системой, обуславливают актуальность настоящего исследования ввиду необходимости обеспечения устойчивого экономического роста на основе:

- повышения конкурентоспособности российской транспортной системы за счет развития инфраструктуры генеральных направлений МТК «Север – Юг»;
- увеличения эффективности стратегического планирования загруженности транспортной сети и распределения грузопотоков;
- рационального использования имеющейся транспортной инфраструктуры для удовлетворения потребности государства и бизнеса в перевозках внутри страны;
- повышения социально-экономической активности населения и обеспечения развития сопутствующей инфраструктуры на генеральных направлениях;
- пересмотра существующих (во многом унаследованных от СССР) организационно-технологических принципов управления в системообразующих предприятиях транспортного комплекса.

Активные изменения на макроэкономическом пространстве Евразии, совершенствование технологий организации перевозок и взаимодействия участников в интегрированных цепях поставок являются неотъемлемым сопровождением развития МТК, в частности МТК «Север – Юг», как системы. МТК способствует формированию базиса для экономических наднациональных объединений, стимулируя межгосударственную конкуренцию по созданию эффективной транспортно-логистической инфраструктуры, в том числе на маршрутах транзитных грузопотоков. Следовательно, для развития теоретико-методических подходов к организации работы МТК, сопряженной с существенными организационными и технологическими особенностями механизмов организации потоковых процессов, пространственным положением и развитием регионов пролегания коридоров, необходима локализация направлений исследований [1]. В табл. 1 приведена методологическая структура настоящего исследования.

Таблица 1

Методологическая структура исследования

Цель	Совершенствование методического подхода к распределению грузопотоков между различными видами транспорта на маршрутах МТК «Север – Юг» для повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта на генеральных направлениях
Задачи	1) Выполнить сравнительный анализ состояния грузовых перевозок конкурирующих видов транспорта по маршрутам МТК «Север – Юг»; 2) адаптировать элементы методики оценки потенциала МТК к требованиям настоящего исследования; 3) определить условия, необходимые для перераспределения грузопотоков между конкурирующими видами транспорта с помощью механизмов смешанной экономики
Объект	Региональная (российская часть) МТК «Север – Юг»
Предмет	Научно-практические методы исследования региональных транспортных систем, международных транспортных коридоров как совокупности путей сообщения на генеральных направлениях грузопотоков
Методы	Системный анализ, математическое моделирование, критериальный отбор, экспертная оценка

Рекомендованный авторами исследования теоретический подход к оценке возможности перераспределения грузопотока между различными видами транспорта на генеральных направлениях МТК «Север – Юг» основывается на следующих принципах:

- глобальная экономическая эффективность;
- рациональное использование имеющихся транспортных магистралей (автомобильных, водных, железнодорожных) с целью равномерной загрузки инфраструктуры и предотвращения возникновения замедления трафика;
- согласование рыночных механизмов тарифообразования на грузоперевозки и государственного регулирования объемов грузопотоков.

Авторами предлагается адаптация методики оценки потенциала международного транспортного коридора (на примере МТК «Север – Юг»), отраженной в работах [2–7], для решения заявленной в исследовании научной проблемы.

Основная часть

По результатам исследований методики оценки потенциала транспортного коридора была составлена «Иерархия показателей оценки потенциала транспортного коридора», представленная в [7]. Другим представлением «Иерархии...» является «Трехуровневая система подчиненности элементов транспортной инфраструктуры» в [7]. Взаимозависимая целостная система показателей основывается на подчинении элементов нижнего уровня верхнему.

Как в «Иерархии...», так и «Системе...» определяющими являются показатели уровня I, которые для грузовладельцев в случае их выполнения служат индикаторами выбора соответствующего вида транспорта. Это актуально для рыночных отношений между участниками перевозочного процесса, где агенты (грузовладельцы) преследуют свои цели. Для государства, как фактического владельца автомобильной и железнодорожной инфраструктуры и такого же агента в транспортной системе (национальной, международной), более важен баланс, в котором к удовлетворению требований грузовладельцев добавляются и другие обязательства: ритмичная и безаварийная работа транспортной инфраструктуры, минимизация «узких мест», возникающих из-за перегрузки определенного элемента инфраструктуры, выполнение своих социальных обязательств в отношении населения, обеспечение обороноспособности страны за счет организации своевременных бесперебойных перевозок частей и соединений Вооруженных сил РФ и др.

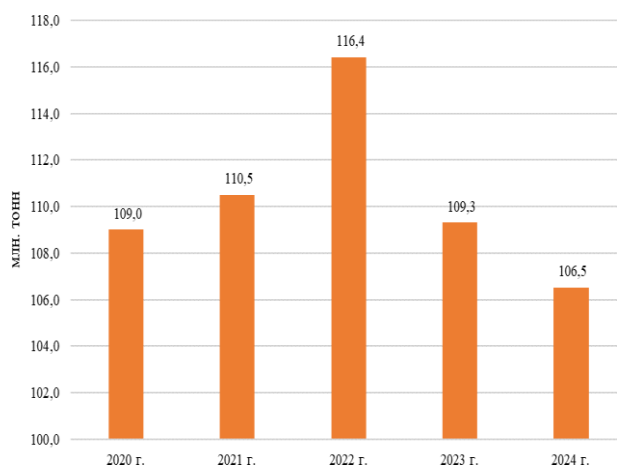
С этой точки зрения в «Системе...» следует сделать акцент на показатели уровня II и III при выборе вида транспорта для грузоперевозки, где государство (отдельные его министерства и ведомства) может выступать в качестве регулятора, т.е. иметь отличные от других агентов «права и обязанности», в той или иной мере участвуя в организации внутрироссийских перевозок (т.е. осуществлять нормативно-правовое регулирование перевозочного процесса, производить равномерное возмещение убытков и выделение дополнительных дотаций на содержание инфраструктуры другим агентам и т.д.), и одновременно обладать свойствами внутренней среды самой системы.

Проанализируем статистику по видам транспорта, условно конкурирующим за грузопотоки по маршрутам МТК «Север – Юг» (табл. 2, рис. 1, 2) [8–10].

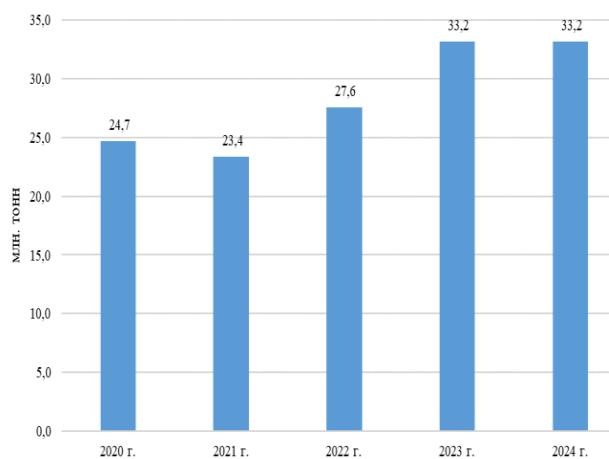
Таблица 2

Показатели работы транспортной системы СССР/РСФСР в 1990 г. и РФ в 2024 г.

Наименование показателя		СССР		РСФСР		РФ	
Железнодорожный транспорт							
Эксплуатационная длина путей сообщения, тыс. км	Общего пользования	260,6	146,7	159,3	86,3	123	87,0
	Необщего пользования		113,9		73,0		36
Электрифицированных путей, тыс. км		55,2		37,0		44,6	
Перевезено грузов, млн т		4116		2261,2		1351	
Среднее расстояние перевозки 1 т груза, км		957		1189		1952	
Грузооборот/доля в грузообороте	млрд т*км/ %	3924,8/44,0		2562,3/32,4		2638,0/47,2	
Внутренний водный транспорт							
Длина внутренних водных путей, тыс. км		122,5		101,0		101,6	
Перевезено грузов, млн т		691		582,3		116,4	
Среднее расстояние перевозки 1 т груза, км		364		400		586	
Грузооборот/доля в грузообороте	млрд т*км/ %	251,2/3,95		233,2/2,24		68/1,05	
Автомобильный транспорт							
Эксплуатационная длина автодорог общего пользования с твердым покрытием, тыс. км		1298,9		619,8		1212,5	
Перевезено грузов, млн т		6921		3171		6211	
Среднее расстояние перевозки 1 т груза, км		21		23		51	
Грузооборот/доля в грузообороте	млрд т*км/ %	143,3/1,5		71,13/0,6		314/5,6	
Морской транспорт							
Перевезено грузов, млн т		256,8		118,0		27,6	
Среднее расстояние перевозки 1 т груза, км		3938		н/д		1607	
Грузооборот/доля в грузообороте	млрд т*км/ %	1011,4/8,5		539,3/4,7		45/1,0	



а



б

Рис. 1. Количество перевезенных грузов (млн т) за период 2020–2024 гг.:
а – внутренним водным транспортом; б – морским транспортом [10]

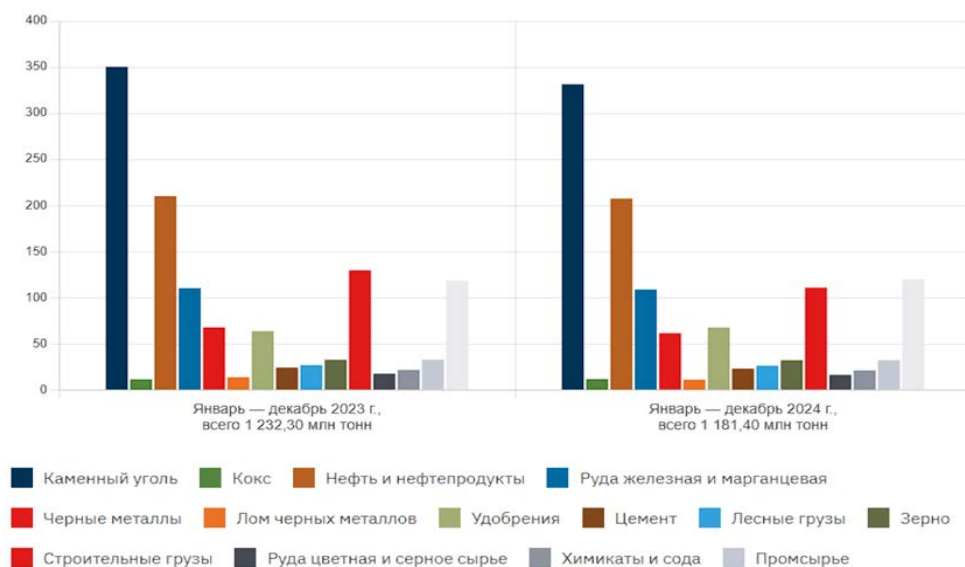


Рис. 2. Общий объем погрузки грузов на железнодорожной сети РФ (млн т) [11]

Проанализировав приведенные статистические данные, отметим почти 5-кратное сокращение количества грузов, перевезенных в РФ по сравнению с 1990 г. внутренним водным транспортом и морским транспортом, оставляя за скобками многократное уменьшение доли в грузообороте водного вида транспорта (см. табл. 2). Более того, данные из рис. 1 указывают на сохранение тенденции «низких объемов» и в настоящее время. Такое сокращение доли внутреннего водного и морского транспорта в экономике страны объясняется как раз «рыночными механизмами», а именно: проигранная конкуренция «за груз» автомобильному и железнодорожному транспорту. Однако железнодорожный транспорт также испытывает определенные трудности в освоении высвобождающихся грузопотоков. В 2024 г. наблюдалось ухудшение показателей работы ОАО «РЖД» (см. рис. 2) по сравнению с 2023 г. [11]:

- увеличение оборота грузового вагона на 10,7 % (20,75 сут), причем сократилось время в движении грузового поезда (с 17,2 до 15,9 %), увеличилось время простоя вагона под грузовыми операциями (с 198,9 ч до 226,8 ч) и время простоя на технических станциях (с 151,5 ч до 166,0 ч);
- снижение средней участковой скорости грузового поезда на 1,8 % (37,9 км/ч);
- сокращение средней дальности перевозки на 1,2 % до 1925 км;
- снижение грузооборота на 4,3 % (2523,8 млрд т-км).

Количество грузовых вагонов на сети ОАО «РЖД» достигло 1 млн 382 тыс. единиц в 2024 г. (переизбыток – более 400 тыс.) [11], что в условиях несогласованности эксплуатации вагонного парка между частными операторами и владельцем инфраструктуры может приводить к масштабным задержкам грузопотоков на стратегических направлениях.

Из анализируемых видов транспорта автомобильный – единственный, чьи качественные и количественные показатели имеют положительную динамику роста как в абсолютном, так и в относительном выражении. Несмотря на неоспоримые преимущества перевозок грузов автомобильным транспортом, необходимо выделить основные факторы, негативно влияющие на социально-экономические процессы в обществе: 1) высокая аварийность (более 15,5 тыс. дорожно-транспортных происшествий с участием грузовых автомашин в 2024 г., в которых погибло более 4 тыс. человек, ранено более 22 тыс. человек) в сравнении с остальными видами транспорта, а также вмешательство в работу железнодорожного транспорта при возникновении ДТП на железнодорожных переездах; 2) негативное влияние на окружающую среду; 3) ухудшение транспортной обстановки в городах (агломерациях) и на подъездах к ним.

Качественным решением социально-экономических вопросов, проблем функционирования отдельно взятого вида транспорта является планирование работы национальной транспортной системы в целом путем рационального (не равномерного!) перераспределения грузопотоков. В отношении МТК «Север – Юг» стратегическим резервом перевозочных мощностей обладает внутренний водный вид транспорта. Ниже, в «Модели оптимальных маршрутов продвижения грузопотоков» приводится «коридор предпочтительности перегрузки» на водный вид транспорта.

Модель оптимальных маршрутов продвижения грузопотоков. Модель определения конкурентного баланса между схемами перевозки грузов, а также оценка привлекательности маршрутов на

примере МТК «Север – Юг», реализация схем мультимодальных перевозок представлены в [4, 5]. Основными критериями выбора схемы перевозки для грузовладельцев являются срок доставки и стоимость перевозки, которые сформированы путем реализации алгоритма нахождения кратчайших расстояний перевозок [5]. Однако с точки зрения достижения конечного оптимума как для национальной транспортной системы, так и для системы МТК следует также учитывать неликвидную загруженность путей сообщения железнодорожного и автомобильного транспорта.

При рассмотрении перевозок по транспортному коридору от пункта зарождения L до пункта погашения грузопотоков S железнодорожные линии представляем в виде каркаса транспортной сети коридора, а автомобильные дороги – дублирующими и дополняющими основной железнодорожный ход. Внутренние водные пути обособлены от инфраструктуры наземных видов транспорта и не могут называться параллельными им, поэтому будут формализованы отличным от наземных видов транспорта образом [4].

Пусть h – пункт концентрации объема груза (грузопотока) V_h в направлении до пункта S . Для пункта h существует несколько вариантов перевозки грузов – автомобильный, внутренний водный, железнодорожный и смешанный. Параметрами выбора схемы перевозки грузов в точку S будем считать: $T_{h,S}^{\text{авто}}$, $T_{h,S}^{\text{вв}}$, $T_{h,S}^{\text{жд}}$, $T_{h,S}^{\text{авто+жд}}$, $T_{h,S}^{\text{авто+вв}}$, $T_{h,S}^{\text{вв+жд}}$ ($M_{h,S}^{\text{авто}}$, $M_{h,S}^{\text{вв}}$, $M_{h,S}^{\text{жд}}$, $M_{h,S}^{\text{авто+жд}}$, $M_{h,S}^{\text{авто+вв}}$, $M_{h,S}^{\text{вв+жд}}$) – срок доставки (стоимость) при перевозке автомобильным, внутренним водным, железнодорожным транспортом и при смешанной схеме перевозки. Принципиальным является выбор прямого вида сообщения, который зависит от выполнения следующих условий (табл. 3).

Таблица 3

Условия выбора схемы перевозки грузов

№ п/п	Двухкритериальные ограничения	Предпочтительная схема перевозки
1	$T_{h,S}^{\text{авто}} < T_{h,S}^{\text{вв}} < T_{h,S}^{\text{жд}} < T_{h,S}^{\text{авто+жд}} < T_{h,S}^{\text{авто+вв}} < T_{h,S}^{\text{вв+жд}}$ $M_{h,S}^{\text{авто}} < M_{h,S}^{\text{жд}} < M_{h,S}^{\text{вв}} < M_{h,S}^{\text{авто+жд}} < M_{h,S}^{\text{авто+вв}} < M_{h,S}^{\text{вв+жд}}$	Автомобильная
2	$T_{h,S}^{\text{вв}} < T_{h,S}^{\text{авто}} < T_{h,S}^{\text{жд}} < T_{h,S}^{\text{авто+жд}} < T_{h,S}^{\text{авто+вв}} < T_{h,S}^{\text{вв+жд}}$ $M_{h,S}^{\text{вв}} < M_{h,S}^{\text{авто}} < M_{h,S}^{\text{жд}} < M_{h,S}^{\text{авто+жд}} < M_{h,S}^{\text{авто+вв}} < M_{h,S}^{\text{вв+жд}}$	Водная (внутренний водный транспорт)
3	$T_{h,S}^{\text{жд}} < T_{h,S}^{\text{авто}} < T_{h,S}^{\text{вв}} < T_{h,S}^{\text{авто+жд}} < T_{h,S}^{\text{авто+вв}} < T_{h,S}^{\text{вв+жд}}$ $M_{h,S}^{\text{жд}} < M_{h,S}^{\text{авто}} < M_{h,S}^{\text{вв}} < M_{h,S}^{\text{авто+жд}} < M_{h,S}^{\text{авто+вв}} < M_{h,S}^{\text{вв+жд}}$	Железнодорожная
4	$T_{h,S}^{\text{жд}} < T_{h,S}^{\text{авто}}$, $M_{h,S}^{\text{жд}} > M_{h,S}^{\text{авто}}$ или $T_{h,S}^{\text{жд}} > T_{h,S}^{\text{авто}}$, $M_{h,S}^{\text{жд}} < M_{h,S}^{\text{авто}}$ $T_{h,S}^{\text{жд}} < T_{h,S}^{\text{вв}}$, $M_{h,S}^{\text{жд}} > M_{h,S}^{\text{вв}}$ или $T_{h,S}^{\text{жд}} > T_{h,S}^{\text{вв}}$, $M_{h,S}^{\text{жд}} < M_{h,S}^{\text{вв}}$	Неизвестна, зависит от субъективных предпочтений грузовладельца
5	$T_{h,S}^{\text{авто+жд}} < T_{h,S}^{\text{авто}}$, $M_{h,S}^{\text{авто+жд}} < M_{h,S}^{\text{авто}}$ $T_{h,S}^{\text{вв+жд}} < T_{h,S}^{\text{вв}}$, $M_{h,S}^{\text{вв+жд}} < M_{h,S}^{\text{вв}}$	Смешанная

Далее, рассмотрим три схемы перевозки – автомобильную, железнодорожную и перевозку внутренним водным транспортом (п. 1–4), применяя известный алгоритм выбора вида транспорта на основе двухкритериальной оценки с использованием экспертных оценок [4]:

Шаг 0. Для определенного грузопотока V_h от пункта h до пункта S определяются $T_{h,S}^{\text{авто}}$, $T_{h,S}^{\text{вв}}$, $T_{h,S}^{\text{жд}}$, $M_{h,S}^{\text{авто}}$, $M_{h,S}^{\text{вв}}$, $M_{h,S}^{\text{жд}}$ и выполняются условия п. 4.

Шаг 1. Пусть есть некоторое количество экспертов f , $f = 1, 2, \dots, F$, которые определяют Δ – приращение соответствующих величин (T или M), которое переводит неравенства в равенства, т.е. выбор в пользу вида транспорта с непредпочтительным значением фактора может быть изменен на основе неформализованных данных экспертов.

Шаг 2. Определяем

$$\Delta \bar{T}_{h,S}^{\text{авто}} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \Delta T_{h,S}^{\text{авто}}(f), \Delta \bar{T}_{h,S}^{\text{жд}} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \Delta T_{h,S}^{\text{жд}}(f), \Delta \bar{T}_{h,S}^{\text{вв}} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \Delta T_{h,S}^{\text{вв}}(f),$$

$$\Delta \bar{M}_{h,S}^{\text{авто}} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \Delta M_{h,S}^{\text{авто}}(f), \Delta \bar{M}_{h,S}^{\text{жд}} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \Delta M_{h,S}^{\text{жд}}(f), \Delta \bar{M}_{h,S}^{\text{вв}} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \Delta M_{h,S}^{\text{вв}}(f).$$

Предельные допуски в п. 1–3 могут быть иными, чем средние значения по оценкам экспертов.

Шаг 3. Определение коридора эффективной схемы транспортировки груза от пункта h до пункта S с учетом возможности выбора в пользу внутреннего водного транспорта (транспортного коридора) с учетом возможности увеличения срока доставки при снижении стоимости транспортировки водным транспортом.

Выбор схемы перевозки (автомобильным, внутренним водным и железнодорожным видом транспортом) при двухкритериальном подходе с использованием экспертных оценок представлен на рис. 3.

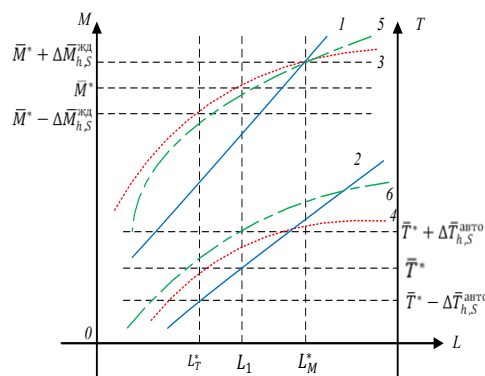


Рис. 3. Выбор схемы перевозки при двухкритериальном подходе с использованием экспертных оценок:

1 (авто), 3 (жд), 5 (вв) – зависимость стоимости перевозки от расстояния;
2 (авто), 4 (жд), 6 (вв) – зависимость сроков доставки от расстояния

Из конфигурации на рис. 3 выделим зоны доминирования (сегменты конкурентной монополии) соответствующего вида транспорта, а именно: автомобильный – $L \in [0, L_T^*]$ – выполняется условие п. 1 табл. 3, железнодорожный – $L \in [L_M^*, \infty)$ – выполняется условие п. 3 табл. 3. В интервале $[L_T^*, L_M^*]$ выбор схемы перевозки зависит от лица, принимающего решение (ЛПР), и определяется методом экспертной оценки или критериального отбора, выполняется условие п. 4 табл. 3. В зависимости от предпочтений ЛПР определяется главный критерий (срок доставки или стоимость доставки) и допускается, что его величина может быть увеличена на $\Delta \bar{T}_{h,s}$ (если предпочтения отдаются срокам доставки) для одного вида транспорта, а величина критерия «стоимость доставки» уменьшена на величину $\Delta \bar{M}_{h,s}$ в пользу выбора другого вида транспорта. В этом случае при $L \in [L_T^*, L_1] \cup [L_1, L_M^*]$ имеется возможность участия внутреннего водного транспорта (выполнение условия п. 3 табл. 3) в распределении конкурентного сегмента между видами транспорта.

Адаптация методики определения зоны притяжения транспортного коридора в условиях конкуренции автомобильного, железнодорожного и внутреннего водного видов транспорта. Основные положения указанной «Методики...» изложены в работах [1, 4–6] и верны с точки зрения конкуренции и сотрудничества между автомобильным, водным и железнодорожным видами транспорта внутри системы МТК «Север – Юг» (как смежные маршруты и направления), а также между МТК как системами и их составными частями (рис. 4).

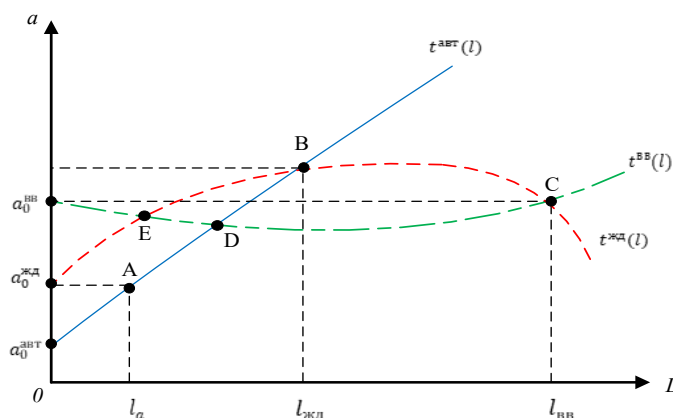


Рис. 4. График конкуренции и сотрудничества видов транспорта:

A, B, C, D, E – точки возможного перехода грузопотоков между видами транспорта;
 $a_0^{\text{авт}}, a_0^{\text{вв}}, a_0^{\text{жд}}$ – параметры модели в момент выполнения погрузочных операций;
 $l_{\text{авт}}, l_{\text{вв}}, l_{\text{жд}}$ – предполагаемое расстояния при мономодальной перевозке соответствующим видом транспорта

Определение зоны притяжения транспортного коридора происходит в два этапа и заключается в нахождении «коридора перехода» грузов (почти во всех случаях низкодходных) с железнодорожного на водный вид транспорта (1-й этап), освобождение перевозочных мощностей железнодорожного транспорта для увеличения возможностей в процессе конкуренции с автомобильным видом транспорта за средне- и высокодоходный грузопоток (2-й этап). В табл. 4 сведены исходные условия для формализации приведенных выше положений.

Таблица 4

Формализованное представление определения зоны притяжения МТК

	Автомобильный	Железнодорожный	Внутренний водный
Мономодальная перевозка			
Тариф на перевозку грузов (t), руб.	$t^{\text{авт}}(l) = a_0^{\text{авт}} + a_1^{\text{авт}}l$	$t^{\text{жд}}(l) = a_0^{\text{жд}} + a_1^{\text{жд}}l^{\text{жд}} + a_2^{\text{жд}}l^{\text{жд}2}$	$t^{\text{вв}}(l) = a_0^{\text{вв}} + a_1^{\text{вв}}l^{\text{вв}} + a_2^{\text{вв}}l^{\text{вв}2}$
	$a_0^{\text{авт}}, a_1^{\text{авт}}, a_0^{\text{жд}}, a_1^{\text{жд}}, a_2^{\text{жд}}, a_0^{\text{вв}}, a_1^{\text{вв}}, a_2^{\text{вв}}$ – параметры модели в зависимости от расстояния перевозки l ($l = \text{const}$)		
Первый этап определения грузовой базы	$a_0^{\text{вв}} + a_1^{\text{вв}}l + a_2^{\text{вв}}l^2 = a_0^{\text{жд}} + a_1^{\text{жд}}l + a_2^{\text{жд}}l^2$ <p style="text-align: center;">при $a_0^{\text{вв}} - a_0^{\text{жд}} > 0, a_2^{\text{вв}} - a_2^{\text{жд}} < 0$.</p> <p style="text-align: center;">Данное квадратное уравнение может иметь лишь один неотрицательный корень:</p> $l_1^* = -\frac{1}{2} \left(\left(\frac{a_1^{\text{вв}} - a_1^{\text{жд}}}{a_2^{\text{вв}} - a_2^{\text{жд}}} \right) - \sqrt{\left(\frac{a_1^{\text{вв}} - a_1^{\text{жд}}}{a_2^{\text{вв}} - a_2^{\text{жд}}} \right)^2 - \frac{4(a_0^{\text{вв}} - a_0^{\text{жд}})}{a_2^{\text{вв}} - a_2^{\text{жд}}}} \right)$ <p style="text-align: center;">или</p> $l_1^* = -\frac{1}{2} \left(R_0 - \sqrt{R_0^2 - \frac{4(a_0^{\text{вв}} - a_0^{\text{жд}})}{(a_1^{\text{вв}} - a_1^{\text{жд}})R_0}} \right), R_0 = \left(\frac{a_1^{\text{вв}} - a_1^{\text{жд}}}{a_2^{\text{вв}} - a_2^{\text{жд}}} \right),$ <p style="text-align: center;">где l_1^* – дальность перевозки, при которой грузопотоки переходят с железнодорожного транспорта на внутренний водный в зависимости от тарифа на перевозку</p>		
Второй этап определения грузовой базы	$a_0^{\text{авт}} + a_1^{\text{авт}}l = a_0^{\text{жд}} + a_1^{\text{жд}}l + a_2^{\text{жд}}l^2$ <p style="text-align: center;">при $a_0^{\text{жд}} - a_0^{\text{авт}} > 0, a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}} < 0$.</p> <p style="text-align: center;">Данное квадратное уравнение может иметь лишь один неотрицательный корень:</p> $l_2^* = -\frac{1}{2} \left(\left(\frac{a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}}}{a_2^{\text{жд}}} \right) - \sqrt{\left(\frac{a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}}}{a_2^{\text{жд}}} \right)^2 - \frac{4(a_0^{\text{жд}} - a_0^{\text{авт}})}{a_2^{\text{жд}}}} \right)$ <p style="text-align: center;">или</p> $l_2^* = -\frac{1}{2} \left(R_0 - \sqrt{R_0^2 - \frac{4R_0(a_0^{\text{жд}} - a_0^{\text{авт}})}{a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}}}} \right), R_0 = \left(\frac{a_1^{\text{жд}} - a_1^{\text{авт}}}{a_2^{\text{жд}}} \right),$ <p style="text-align: center;">где l_2^* – дальность перевозки, при которой грузопотоки переходят с автомобильного транспорта на железнодорожный в зависимости от тарифа на перевозку</p>		

Отметим, что в данной работе приведен лишь один из вариантов решения уравнения, так как в случае с внутренним водным и железнодорожным транспортом расстояние перевозки не является постоянной величиной ($L \neq \text{const}$), соответственно у данного уравнения будет несколько решений.

Выводы

Стратегическое управление распределением грузопотоков по видам транспорта позволит качественно изменить подход к транспортно-экспедиционному обслуживанию грузовладельцев на генеральных направлениях МТК «Север – Юг». Искусственный переход низкодходных массовых грузов на внутренний водный вид транспорта пропорционально увеличит возможности ОАО «РЖД» для конкуренции с автотранспортом за средне- и высокодоходные перевозки. Констатируем, что внутренний водный транспорт не является ни системообразующим, ни высокодоходным, однако в масштабе национальной транспортной системы способен занять нишу перевозки грузов «для государства» с определенной возможностью увеличения дотационной части в своих доходах.

При должной организации логистических цепей поставок на основе преимуществ внутреннего водного транспорта (низкая себестоимость, высокая грузоподъемность, экологичность) и недостатков

(низкая скорость движения, сезонность перевозок, высокие затраты на погрузочно-разгрузочные операции, нехватка складской и портовой инфраструктуры) будет получен ожидаемый эффект, что повлияет на социально-экономическое развитие страны в целом.

В дальнейших исследованиях по распределению грузопотоков по видам транспорта в системе МТК необходимо рассмотреть конкурентный сегмент мультимодальных схем перевозки грузов, а именно: а) автомобильный – железнодорожный – автомобильный; б) железнодорожный – внутренний водный – автомобильный; в) автомобильный – внутренний водный – автомобильный. Это необходимо для укрупнения теоретической базы исследований функционирования транспортного коридора как системы и последующего построения адекватной стохастической модели функционирования МТК «Север – Юг» с использованием агентного моделирования. На основе прогнозирования поведения участников перевозочного процесса в условиях постоянных изменений эксплуатационной обстановки и возникающих инфраструктурных (и иных) ограничений возможно выявление закономерностей в состоянии системы (или ее отдельных частей) с целью повышения ее управляемости и устойчивости к разного рода колебаниям.

Список литературы

1 **Сорокин, Д. В.** Развитие железнодорожного транспорта в системе международных транспортных коридоров на примере МТК «Север – Юг» : специальность 2.9.9 «Логистические транспортные системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. В. Сорокин ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2024. – 215 с.

2 **Сорокин, Д. В.** Анализ транзитного потенциала Северо-Кавказской железной дороги в обеспечении грузоперевозок по международному транспортному коридору «Север – Юг» / Д. В. Сорокин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (52). – С. 26–32. – ISSN 1815-9265.

3 **Мамаев, Э. А.** Оценка перспектив роста грузооборота международного транспортного коридора «Север – Юг» в современных условиях / Э. А. Мамаев, В. Д. Верескун, Д. В. Сорокин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (91). – С. 45–56. – DOI 10.46973/021-727X_2023_3_45.

4 **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.

5 **Мамаев, Э. А.** К оценке потенциала развития международного транспортного коридора «Север – Юг» : теоретические аспекты / Э. А. Мамаев, И. Д. Долгий, Д. В. Сорокин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (80). – С. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

6 **Vereskun, V. D.** Assessment for the growth prospects in freight turnover of the international

References

1 **Sorokin, D. V.** Railway transport development in the system of international transport corridors using the example of the ITC “North – South” : specialty 2.9.9 “Logistics transport Systems” : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / D. V. Sorokin ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don, 2024. – 215 p.

2 **Sorokin, D. V.** Analysis of the transit potential of the North Caucasian Railway in ensuring freight transportation along the international transport corridor “North - South” / D. V. Sorokin // The Siberian transport university bulletin. – 2020. – No. 1 (52). – P. 26–32. – ISSN 1815-9265.

3 **Mamaev, E. A.** Assessment of the prospects for growth of freight turnover of the international transport corridor “North - South” in modern conditions / E. A. Mamaev, V. D. Vereskun, D. V. Sorokin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 3 (91). – P. 45–56. – DOI 10.46973/021-727X_2023_3_45.

4 **Mamaev, E. A.** On assessing the development potential of the international transport corridor “North – South” / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // Izvestia Transsiba. – 2020. – No. 3 (43). – P. 86–96. – ISSN 2220-4245.

5 **Mamaev, E. A.** On assessing the development potential of the international transport corridor “North – South” : theoretical aspects / E. A. Mamaev, I. D. Dolgiy, D. V. Sorokin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (80). – P. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

6 **Vereskun, V. D.** Assessment for the growth prospects in freight turnover of the international

transport corridor «North – South» in modern conditions / V. D. Vereskun, E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // E3S Web of Conferences 383, 03013 (2023) : International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) «Actual Problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering : Ways of Their Innovative Solution». – DOI 10.1051/e3sconf/202338303013.

7 **Мамаев, Э. А.** Методические подходы структурирования показателей оценки потенциала международного транспортного коридора / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин // Логистика и управление цепями поставок. – 2024. – Т. 21, № 3 (112). – С. 11–24. – ISSN 2587-6775.

8 Народное хозяйство СССР. 1990. Материальное производство. Транспорт. – URL: <http://mysteriouscountry.ru/wiki/index.php/> (дата обращения: 04.05.2025).

9 Транспорт и связь СССР : статистический сборник (1990). – URL: <http://istmat.info/node/22104> (дата обращения: 04.05.2025).

10 Федеральная служба государственной статистики. – URL: <http://ssl.rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 12.05.2025).

11 Официальный сайт ОАО «Российские железные дороги». – URL: <https://cargo.rzd.ru/> (дата обращения: 11.05.2025).

transport corridor «North – South» in modern conditions / V. D. Vereskun, E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // E3S Web of Conferences 383, 03013 (2023) : International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) «Actual Problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering : Ways of Their Innovative Solution». – DOI 10.1051/e3sconf/202338303013.

7 **Mamaev, E. A.** Methodological approaches to structuring indicators for assessing the potential of an international transport corridor / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // Logistics and supply chain management. – 2024. – Vol. 21, No. 3 (112). – P. 11–24. – ISSN 2587-6775.

8 National economy of the USSR. 1990. Material production. Transport. – URL: <http://mysteriouscountry.ru/wiki/index.php/> (date of access: 05/04/2025).

9 Transport and communications of the USSR : Statistical collection (1990). – URL: <http://istmat.info/node/22104> (date of access: 05/04/2025).

10 Federal State Statistics Service. – URL: <http://ssl.rosstat.gov.ru/> (date of access: 05/12/2025).

11 The official website of JSC “Russian Railways”. – URL: <https://cargo.rzd.ru/> (date of access: 05/11/2025).

D. V. Sorokin, A. I. Khashev, S. M. Nauruzbaev, A. I. Stepovaya, A. P. Yanovsky

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF REDISTRIBUTING CARGO FLOW BETWEEN TRANSPORT MODES ON THE GENERAL DIRECTIONS OF THE ITC "NORTH – SOUTH"

Abstract. In the current economic and political realities for the Russian Federation, the task of transport corridors is not only to ensure transit traffic in the Eurasian space. Export-import and domestic routes are priorities in the work of the national transport complex. The use of multimodal cargo delivery schemes along the routes of the North – South international transport corridor (ITC) involves several logistics routes, each of which has a certain variability. The Russian transport system, in particular, its regional part of the North – South ITC, allows the combined use of three types of transport in cargo transportation: automobile, water and rail.

This study is devoted to the theoretical aspects of the redistribution of cargo flows between different modes of transport on the main routes of the North – South ITC and its impact on the strategic planning of Russian economic activity. The article presents the results obtained in the course of the study, and provides a rationale for the applied research methodology. Conclusions are drawn and recommendations are given for the practical application of the results obtained, and prospects for further research in the field of strategic planning of transport enterprises on the routes of the North – South ITC are outlined.

Keywords: multimodal transportation, “North – South” ITC, strategic planning of cargo transportation, the model of optimal routes for the promotion of cargo flows, assessment of the ITC potential, attraction zone of cargo flows of the ITC, mixed economic model.

For citation: Assessment of the possibility of redistributing cargo flow between transport modes on the general directions of the ITC “North – South” / D. V. Sorokin, A. I. Khashev, S. M. Nauruzbayev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 243–253. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_243.

Сведения об авторах

Сорокин Дмитрий Валерьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
кандидат технических наук,
старший преподаватель,
e-mail: 2013014015@list.ru

Хашев Аскер Измудинович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: hash-93@mail.ru

Наурузбаев Сабир Мансурович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
аспирант,
e-mail: sabir.nauruzbayev@mail.ru

Степовая Анастасия Игоревна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Станции и грузовая работа»,
аспирант,
e-mail: Anastasia_stepovaya@mail.ru

Яновский Александр Павлович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
факультет «Управление процессами перевозок»,
студент,
e-mail: ALEKSANDERYAN@MAIL.RU

Information about the authors

Sorokin Dmitry Valerievich,

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Logistics and Transport Systems Management”,
Candidate of Engineering Sciences,
Senior Lecturer,
e-mail: 2013014015@list.ru

Khashev Asker Izmudinovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Logistics and Transport Systems Management»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: hash-93@mail.ru

Nauruzbayev Sabir Mansurovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Operational Work Management”,
Postgraduate Student,
e-mail: sabir.nauruzbayev@mail.ru

Stepovaya Anastasia Igorevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Stations and Freight Operations”,
Postgraduate Student,
e-mail: Anastasia_stepovaya@mail.ru

Yanovsky Alexander Pavlovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Department of Railway Management and Operation,
Student,
e-mail: ALEKSANDERYAN@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 , \cos , \sin , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5 **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6 **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подписи обязательны.

7 **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8 **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9 **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

Условия и порядок публикации статей в журнале

- 1 Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.**
- 2 Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.**
- 3 Автор может прислать статью в адрес редакции:**
 - по почте;
 - по электронной почте;
 - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4 Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.**

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

- 5 Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.**

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

- 6 На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.**

- 7 Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.**

Краткая информация о журнале

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный серийный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В. И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» (www.ppressa-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

**№ 2 (98)
2025**

Уважаемые читатели!

Вы можете подписаться на наш журнал на сайте www.pressa-rg.ru.

Индекс журнала по каталогу 53720

Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайтах:

Российской научной электронной библиотеки: <https://www.elibrary.ru/>

Научной электронной библиотеки «КиберЛенинка» <https://cyberleninka.ru/>

Национальной платформы периодических научных изданий (РЦНИ) <https://journals.rcsi.science>

Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования

РИНЦ и Science Index

Требования к оформлению статей размещены на сайте

<http://vestnik.rgups.ru>

Редакторы: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,

Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова,

А.Н. Колесниченко (английский текст)

Корректоры: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,

Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова,

А.Н. Колесниченко (английский текст)

Оригинал-макет журнала подготовлен А.О. Куделиной

Подписано в печать 30.06.2025.

Дата выхода в свет 01.07.2025.

Печать офсетная.

Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.

Усл. печ. л. 29,76.

Тираж 510 экз.

Цена свободная.

Бумага офсетная.

Изд. № 36.

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.