

ISSN 0201–727X

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

ВЕСТНИК

**Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

№ 1 (89)

Ростов-на-Дону
2023

ВЕСТНИК

Ростовского государственного университета путей сообщения

2023
№ 1 (89)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В.А. Явна, д-р физ.-мат. наук, проф., РГУПС, г. Ростов-на-Дону

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

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

VESTNIK RGUPS
Scientific and Technical Journal

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Васин С.А., Пантюхина Е.В. Основные направления проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств для асимметричных деталей формы тел вращения | 8 |
| Николаев М.Е., Козловцева Е.Ю., Калачев А.В. Погрузочно-транспортный агрегат с увеличенной рабочей зоной..... | 16 |
| Поляков П.А. Амплитудно-частотные характеристики колебаний прижимающего механизма тормозного устройства подвижного состава с учетом соотношения частот..... | 22 |
| Поляков П.А. Методика проектирования силовых устройств дисково-колодочного типа на основе структурно-параметрического синтеза..... | 32 |
| Солдатов А.Г. Исследование шероховатости при шлифовании зубчатых колес | 44 |
| Харламов О.Г. Конструкции системы шумозащиты станочников зубофрезерных станков... | 49 |

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Егорова И.Н. Повышение мобильности населения в региональной логистической транспортной системе (на примере юга России)..... | 55 |
| Зубков В.Н., Рязанова Е.В., Наурузбаев С.М., Чеботарева Е.А., Меркулов И.В. Меры по согласованному развитию инфраструктуры на подходах к порту Оля в условиях прогнозируемого роста грузопотоков по транспортному коридору «Север – Юг» | 63 |
| Зубков В.В., Сирина Н.Ф., Раевская П.Е., Раевский Н.В. Этапы развития вождения соединенных поездов и поездов повышенной массы и длины..... | 76 |
| Маколова Л.В., Мамаев Э.А. Экологизация транспортной деятельности на урбанизированных территориях на основе реинжиниринга инфраструктуры | 86 |
| Нгуен Минь Тьен, Багинов А.В. Применение имитационного моделирования в организации и развитии логистических центров Вьетнама..... | 95 |
| Ольховиков С.Э., Петренева Е.А., Кагадий И.Н., Шерстобитова О.Б. Формирование узловых мультимодальных транспортно-логистических центров..... | 106 |
| Сирина Н.Ф., Сахаров А.Г. Анализ влияния внешних и внутренней систем на пропускную способность участков железных дорог Восточного полигона..... | 119 |

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Агапов А.А., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В. Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации транспортных систем | 126 |
| Альтман Е.А., Александров А.В. Анализ зависимости быстродействия быстрого преобразования Фурье от объема обрабатываемых данных | 136 |
| Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Пеньков А.С., Зехцер В.О., Кульбикаян Х.Ш. Синтез интеллектуального алгоритма оценки ориентации подвижных объектов транспортной инфраструктуры на базе многопараметрического идентификатора..... | 144 |

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Верескун В.Д., Притыкин Д.Е., Дагддиян Б.Д., Балашов Е.Д. Разработка подсистемы сигнализации для виртуальной железной дороги | 152 |
| Ковалев С.М., Гуда А.Н., Долгий А.И. Аналитический обзор трудов конференции ПТИ'22... | 159 |
| Сидоренко В.Г., Балакина Е.П., Логинова Л.Н., Кулагин М.А. Подход к классификации имен собственных для системы распознавания команд диспетчера | 175 |

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Окост М.В., Морозов А.В. Исследование способов повышения оперативности восстановления мостов в результате произошедших конструктивных деформаций | 184 |
| Шаповалов В.Л., Харламов П.В., Кочур А.Г. Анализ сценариев развития ситуации при различных воздействиях на искусственные сооружения железных дорог..... | 209 |

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЯ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Гайшинец И.А., Доронин С.В., Доронина И.И., Яранцев М.В. Буксовый узел локомотива для установки осей колесных пар по радиусу кривой..... | 224 |
| Гребенников Н.В. Метод снижения потерь электроэнергии в тяговых двигателях автономного локомотива за счет применения дискретно-адаптивного управления | 234 |
| Коновалов П.Ю., Яицков И.А. Технические решения по регулированию увеличения скорости управляемого истечения песковоздушной смеси | 241 |
| Лексутов И.С., Клюка В.П. Анализ особенностей применения и классификация автоматизированных систем для бесконтактного измерения размеров и формы деталей на примере систем контроля диаметра колеса вагона..... | 248 |
| Яицков И.А., Федотов Е.С. Методика определения аэродинамических характеристик диффузорных вентиляционных каналов тормозных дисков транспортных средств | 257 |

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Доманский В.В. Информационные технологии и метод расчета риска отказа при дрейфе технического состояния тягового трансформатора..... | 264 |
| Осипова А.И. Обеспечение термической стойкости волоконно-оптического кабеля, входящего в систему двухуровневого заземления опор..... | 274 |

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Vasin S.A., Pantyukhina E.V. Main directions for design of mechanical disk hopper loading devices for asymmetric parts of rotation bodies shape | 8 |
| Nikolaev M.E., Kozlovtsava E.Yu., Kalachev A.V. Loading and transport unit with an enlarged working area | 16 |
| Polyakov P.A. Amplitude-frequency characteristics of oscillations rolling stock braking mechanism including frequency ratio..... | 22 |
| Polyakov P.A. Method of designing disk-block type power devices based on structural-parametric synthesis..... | 32 |
| Soldatov A.G. Study of roughness in grinding gear wheel process..... | 44 |
| Kharlamov O.G. The system design of noise protection for machine operator of gear hobbing machines..... | 49 |

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Egorova I.N. Increasing the mobility of the population in the regional logistics transport system (on the example of the South of Russia)..... | 55 |
| Zubkov V.N., Ryazanova E.V., Nauruzbayev S.M., Chebotareva E.A., Merkulov I.V. Measures for the coordinated infrastructure development on approaches to “Olya” port in the conditions of the predicted growth of cargo flows along the North-South transport corridor..... | 63 |
| Zubkov V.V., Sirina N.F., Raevskaya P.E., Raevskiy N.V. Stages in the development of driving connected trains and trains of increased weight and length..... | 76 |
| Makolova L.V., Mamaev E.A. Ecologization of the transport activities in urbanized areas based on infrastructure reengineering..... | 86 |
| Nguyen Minh Chien, Baginov A.V. Application of simulation modeling in the organization and development of logistics centers in Vietnam..... | 95 |
| Olkhovikov S.E., Petreneva E.A., Kagadiy I.N., Sherstobitova O.B. Formation of junction multimodal transport and logistics centers | 106 |
| Sirina N.F., Sakharov A.G. Analysis of the influence of external and internal systems on the capacity of railway sections of the Eastern polygon..... | 119 |

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Agapov A.A., Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. Analysis of the efficiency of quasi-optimal control laws using fuzzy logic apparatus in tasks of intellectualization of transport systems | 126 |
| Altman E.A., Aleksandrov A.V. Analysis of the dependence of the fast Fourier transform performance on the amount of processed data..... | 136 |
| Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V., Penkov A.S., Zekhtser V.O., Kulbikayan K.S. Synthesis of an intelligent algorithm for assessing the orientation of movable objects of transport infrastructure on the basis of a multi-parameter neural network identifier..... | 144 |

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION AND TELECOMMUNICATIONS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Vereskun V.D., Pritikin D.E., Dagldiyan B.D., Balashov E.D. Development of alarm subsystem for a virtual railway | 152 |
| Kovalev S.M., Guda A.N., Dolgiy A.I. Analytical review of proceedings of IITI'22 conference..... | 159 |
| Sidorenko V.G., Balakina E.P., Loginova L.N., Kulagin M.A. An approach to classifying proper names for the dispatcher command recognition system | 175 |

RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Okost M.V., Morozov A.V. Study of ways to increase recovery efficiency bridges as a result of occurred structural deformations | 184 |
| Shapovalov V.L., Kharlamov P.V., Kochur A.G. Analysis of scenarios for the situation development under different impacts on artificial railway structures..... | 209 |

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY AND ENVIRONMENT

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gaishinets I.A., Doronin S.V., Doronina I.I., Yarantsev M.V. Locomotive auxiliary unit for axle installation wheels by curve radius..... | 224 |
| Grebennikov N.V. Method for reducing power losses in traction motors of an autonomous locomotive through the use discrete adaptive control..... | 234 |
| Konovalov P.Y., Yaitskov I.A. Technical solutions for regulating the increase in the speed of controlled outflow of sand-air mixture..... | 241 |
| Leksutov I.S., Kluka V.P. Analysis of application features and classification of automated systems for non-contact measurement of the dimensions and shape of parts on the example of car wheel diameter control systems..... | 248 |
| Yaitskov I.A., Fedotov E.S. Method for determining aerodynamic characteristics of diffuser ventilation channels of brake discs of vehicles..... | 257 |

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Domansky V.V. Information technologies and method of calculating the risk of failure case of drift of the technical condition of the traction transformer | 264 |
| Osipova A.I. Ensuring the thermal stability of the fiber-optic cable included in the two-level grounding system of the supports | 274 |

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_8

*С. А. Васин, Е. В. Пантюхина***ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ДИСКОВЫХ БУНКЕРНЫХ ЗАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ АСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ФОРМЫ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ**

Аннотация. Рассмотрены этапы проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств, при выполнении которых будут обеспечиваться высокая надежность и требуемая производительность систем автоматической загрузки асимметричных деталей формы тел вращения в современное технологическое оборудование. Показаны основные задачи каждого этапа и пути их решения, способствующие повышению надежности и обеспечению требуемой производительности бункерного загрузочного устройства для деталей с асимметрией. Решение поставленных задач в указанном порядке позволяет на ранних этапах проектирования разработать оптимальную по всем параметрам конструкцию бункерного загрузочного устройства и не требует дорогостоящих вложений в создание опытных образцов для проведения испытаний, по оценке его работоспособности.

Ключевые слова: автоматическая загрузка, бункерное загрузочное устройство, проектирование загрузочного устройства, асимметричные детали, производительность загрузочного устройства.

Для цитирования: Васин, С. А. Основные направления проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств для асимметричных деталей формы тел вращения / С. А. Васин, Е. В. Пантюхина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_8.

В течение нескольких последних десятилетий в различных отраслях машино- и приборостроения с развитием новых и совершенствованием существующих технологий значительно расширяется номенклатура выпускаемых изделий и их комплектующих (штучных деталей, элементов, заготовок, предметов обработки), увеличивается количество их типоразмеров, изменяется форма. Стали широко появляться детали формы тел вращения с неявно выраженной асимметрией, которые характеризуются отсутствием явной асимметрии по торцам как внешней, так и внутренней формы, и незначительным (практически отсутствующим) смещением центра масс вдоль продольной оси симметрии.

В частности, если со второй половины до конца XX века элементы патронов стрелкового оружия не претерпевали существенных изменений в форме и размерах, количество их типоразмеров было ограничено и все элементы производимых патронов имели явно выраженные признаки ориентации, то к началу 2000-х гг. государственный оборонный заказ на массовое производство патронов стрелкового оружия стал резко сокращаться. События последних десятилетий (локальные войны и конфликты, терроризм, разделение оружия на боевое, служебное и гражданское) существенно изменили ситуацию на рынке боеприпасов [1]. В последние десятилетия активно развивается разработка новых видов стрелкового оружия специального назначения и соответствующих ему различных специальных патронов не массового выпуска, стали широко появляться элементы патронов с неявно выраженной асимметрией, для производства которых вновь стали использовать операционное и раздельное многономенклатурное оборудование, а также оборудование, ранее не использовавшееся в патронном производстве.

Основные виды деталей с неявной асимметрией, геометрические параметры и диапазоны их значений представлены в таблице.

Автоматизированные линии для производства таких изделий должны быть оснащены современным оборудованием, автоматическую загрузку которых осуществляют надежные системы. Для решения поставленной задачи возникает необходимость проектирования оптимального технического оснащения систем автоматической загрузки для каждого из новых видов изделий и их комплектующих в кратчайшие сроки.

Виды деталей с неявной асимметрией и их основные геометрические параметры

| Тип | Стержневые с $3 \leq l/d_1 \leq 5$, $x_c \approx 0,5l$ | Стержневые с $2 \leq l/d_1 \leq 3$, $x_c \approx 0,5l$ | | Близкие к равноразмерным с $1 \leq h/d_1 \leq 0,6$, $x_c \approx 0,5h$ |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| | | с торцом в виде усеченного конуса | в форме колпачка | |
| Эскиз детали и диапазоны ее параметров | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | $2\beta \leq 30^\circ$, $0,6 \leq d_2/d_1 \leq 0,9$ | $2\beta \leq 30^\circ$, $0,25 \leq h/l \leq 0,3$ | $r > 0,5d_1$, $d_2 \approx d_1$ | $0,6 \leq d_2/d_1 \leq 0,9$ |

Основным устройством таких систем является бункерное загрузочное устройство (БЗУ). После того как поток неупорядоченных штучных деталей поступил в БЗУ из единой транспортной системы, устройство реализует выполнение трех своих основных функций: захват единичной детали из общей массы, ее ориентирование и выдачу в ориентируемом положении в дальнейшие устройства системы автоматической загрузки по направлению к рабочим органам сборочного или других видов оборудования. В частности, при автоматизированной сборке многоэлементных изделий, когда требуется одновременная загрузка нескольких деталей двумя и более параллельно работающими БЗУ, проектирование оптимальных по всем параметрам БЗУ во многом определяет надежность и стабильность работы всей сборочной линии, а также обеспечение ее требуемой производительности [2, 3].

Проектирование механических дисковых БЗУ, занимающих наибольшую часть всех известных конструкций БЗУ, является многоуровневой задачей, сложность которой обусловлена многими причинами.

Во-первых, каждое БЗУ может функционировать только для деталей одного типа с конкретными геометрическими параметрами. Поэтому изменение одного из размеров детали даже более чем на 5–10 % не позволит использовать уже имеющееся БЗУ для их автоматической загрузки. Это потребует конструктивных изменений захватывающих и ориентирующих органов БЗУ и проверки внесенных изменений на соответствие основным показателям качества устройства.

Во-вторых, для новых деталей, в частности с неявно выраженной асимметрией, требуется разработка новых или совершенствование существующих конструкций БЗУ, так как известные БЗУ, применяемые ранее для деталей с явной асимметрией, перестают быть эффективными для новых деталей с неявно выраженными ключами ориентации [4]. В некоторых случаях для повышения надежности БЗУ возникает необходимость в переходе с активных способов ориентирования детали на пассивные и принятии новых конструкторских решений, которые при таком переходе не приведут к существенному снижению производительности БЗУ.

В-третьих, при захвате единичной детали из общей массы в БЗУ реализован вероятностный принцип работы. Однако известные всем классические формулы для расчета производительности позволяют определить лишь максимально возможные значения производительности БЗУ. Поэтому для определения фактической производительности БЗУ необходимы математические модели, позволяющие учесть принцип вероятности при западении деталей в органы захвата БЗУ.

В-четвертых, при проектировании БЗУ для асимметричных деталей необходимо, чтобы процесс пассивного ориентирования, заключающийся в полном удалении из захватывающих органов БЗУ деталей, частично запавших в них в неправильном положении, был реализован в течение определенного времени на участке, называемом зоной пассивного ориентирования. Поэтому возникает необходимость определения зоны пассивного ориентирования деталей, времени выпадения такой детали из захватывающего органа БЗУ и сопоставления полученных значений со временем, в течение которого вращающийся диск проходит эту зону.

В-пятых, детали, правильно сориентированные в БЗУ, должны быть выданы из захватывающих органов в последующие устройства системы автоматической загрузки. При этом в процессе выдачи из БЗУ такие детали не должны менять полученную ориентацию, а время, в течение которого они выпадают из захватывающего органа в приемник, должно быть достаточным для реализации данного процесса. Решение указанной задачи базируется на определении времени выпадения детали из захватывающего органа и сопоставлении этого времени со временем, в течение которого вращающийся диск проходит эту зону.

В-шестых, для автоматизации процессов расчета основных параметров механического дискового БЗУ целесообразна разработка компьютерных программ, позволяющих в автоматическом режиме рассчитать оптимальные конструктивные и кинематические параметры БЗУ для широкой номенклатуры деталей с неявной асимметрией различных типоразмеров. Это позволит сократить длительность рутинных расчетных операций при проектировании БЗУ.

На рис. 1 представлены основные направления проектирования оптимальных конструкций механических дисковых БЗУ для асимметричных деталей формы тел вращения, отвечающих основным требованиям надежности.



Рис. 1. Основные направления проектирования надежной конструкции механического дискового бункерного загрузочного устройства для асимметричных деталей формы тел вращения:

1 – вращающийся диск; 2 – захватывающий и ориентирующий органы (карманы);
3 – окно для выдачи деталей; 4 – стенка бункера; 5 – деталь (увеличено); 6 – стойка

Рассмотрим, как реализуется каждый из этапов проектирования БЗУ для асимметричных деталей формы тел вращения.

На первом этапе проектирования конструируются основные рабочие органы БЗУ – органы захвата и ориентирования, равномерно расположенные на вращающемся диске БЗУ с некоторым постоянным шагом (см. рис. 1). В основе их конструирования должны быть заложены два следующих основных принципа.

Во-первых, в захватывающий орган должна попасть только та деталь, которая находится в правильном положении. Вероятность ее западания в карман вращающегося диска должна быть

максимальной, но при этом размеры захватывающего органа не должны позволить одновременному западанию в него нескольких деталей.

Во-вторых, детали, находящиеся в неправильном положении, могут лишь запасть в карман только частично. При этом величина их погружения в карман должна быть достаточной для того, чтобы в зоне ориентирования такие детали под действием собственного веса покинули захватывающие органы (в случае пассивного ориентирования) или переориентировались в правильное положение (в случае активного ориентирования).

Однако не для всех асимметричных деталей можно применять активное ориентирование деталей в конструкции БЗУ. Так, при загрузке деталей с неявной асимметрией в известных и ранее применяемых БЗУ возникли проблемы в распознавании геометрических признаков асимметрии. Это привело к необходимости перехода с активных на пассивные способы ориентирования путем разработки и использования новых признаков конструирования захватывающих и ориентирующих органов БЗУ. Запатентованные усовершенствованные конструкции БЗУ и описание принципа их работы представлены в работах [5, 6].

Высокая вероятность захвата карманом детали, находящейся в правильном положении, и полное удаление из кармана неправильно запавшей детали являются основными принципами, к которым нужно стремиться при проектировании БЗУ для обеспечения требуемых значений производительности и надежности. Соблюдение указанных принципов требует разработки конструктивных ограничений на параметры захватывающего и ориентирующего органов БЗУ, базирующейся на графоаналитическом методе решения.

На втором этапе проектирования решаются задачи построения математической модели производительности БЗУ по захвату. Попытки математического описания производительности БЗУ предпринимались советскими и многими зарубежными учеными [7–9].

Однако практически все они носили эмпирический характер, так как опирались на результаты экспериментов на натурных моделях БЗУ, а также собственный опыт и наблюдения. В работах с помощью законов классической механики были получены выражения для описания максимально допустимых конструктивных и кинематических параметров БЗУ. Поэтому полученные выражения не позволяли комплексно смоделировать оптимальную конструкцию БЗУ, а были посвящены лишь решению частных практических задач по определению тех или иных параметров. Эмпирические зависимости для определения производительности не учитывали геометрических свойств загружаемых деталей, их конфигурацию, а также смещение центра масс вдоль продольной оси симметрии. Однако результаты экспериментальных исследований, наиболее полно представленные в работе [10], представляют огромную ценность для исследования производительности механических БЗУ, так как визуализируют общий вид функции зависимости производительности Π (шт./мин.) от окружной скорости v захватывающих органов (м/с):

$$\Pi = \frac{60 \cdot v}{t} \cdot \eta = \frac{60 \cdot v}{t} \cdot (a - \varepsilon v^4),$$

где t – шаг карманов, м; η – коэффициент выдачи БЗУ (вероятность захвата); a, ε – эмпирические коэффициенты, полученные для каждой определенной конструкции БЗУ и конкретной загружаемой им детали [10].

Принципиально другой подход к математическому описанию коэффициента выдачи η был изложен в работе [11] с использованием теории вероятности, согласно которому вероятность захвата определялась по выражению

$$\eta = p_i \cdot p_v \cdot p_c,$$

где p_i – вероятность нахождения детали на пути кармана в благоприятном для захвата положении; p_v – вероятность отсутствия помех захвату детали от скорости карманов; p_c – вероятность отсутствия помех захвату от взаимосцепляемости деталей.

Полученные зависимости для определения вероятностных коэффициентов модели учитывали геометрические размеры деталей, число осей симметрии и смещение центра масс, но были представлены лишь для некоторых частных случаев и конкретных конструкций БЗУ. При этом не все вероятностные коэффициенты адекватно описывали факторы, влияющие на процесс захвата, а полученные выражения для их определения также не позволяли выявить оптимальные параметры БЗУ для обеспечения максимальной производительности.

Для сравнения на рис. 2 приведены зависимости коэффициентов выдачи от окружной скорости захватывающих органов, полученные экспериментально в работе [10] и рассчитанные по методике

[11], на примере механического дискового БЗУ с тангенциальными профильными карманами для цилиндрических стаканов с асимметрией.

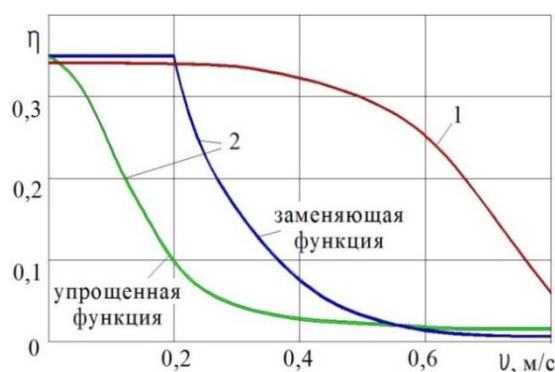


Рис. 2. Результаты сравнения значений коэффициента выдачи цилиндрических стаканов с асимметрией в механическом дисковом бункерном загрузочном устройстве с тангенциальными профильными карманами:

1 – эмпирическая зависимость [10]; *2* – вероятностные зависимости по двум вариантам расчета [11]

Теоретически полученные вероятностные зависимости коэффициента выдачи, в том числе с использованием заменяющей функции, представленные на графиках 2, противоречат экспериментальным исследованиям, так как практически на всем диапазоне значений окружной скорости захватывающих органов не совпадают с эмпирической зависимостью *1*. Это свидетельствует о нецелесообразности использования теоретических моделей для описания вероятностных коэффициентов, характеризующих влияние окружной скорости на захват детали, в том виде, в котором они представлены в работе [11]. Тем не менее, при окружных скоростях захватывающих органов близких к нулю максимальное значение коэффициента выдачи практически полностью совпадает на всех графиках, представленных на рис. 2.

В работе [12] изложена новая апробированная концепция построения математических моделей производительности и коэффициента выдачи механических дисковых БЗУ, учитывающая недостатки известных подходов советских учёных и обобщающая результаты многолетних исследований. При построении модели решаются следующие научные задачи: определение зоны захвата, определение максимальной окружной скорости захватывающих органов по захвату и определение вероятностей каждого параметра процесса захвата. На основе предложенной концепции были получены теоретические модели производительности и коэффициента выдачи как усовершенствованных, так и других типов дисковых БЗУ, показавшие высокую степень соответствия результатам оригинальных авторских экспериментов, а также экспериментов других авторов.

Наличие таких моделей на ранних этапах проектирования позволит оценить производительность БЗУ, принять решение о целесообразности принятия тех или иных конструкторских решений и скорректировать параметры БЗУ с целью обеспечения требуемых показателей.

На третьем этапе проектирования должны решаться вопросы обеспечения надежности БЗУ при выполнении процесса ориентирования деталей.

Анализ отечественных и зарубежных научных работ показал, что все они посвящены исследованию процессов активного ориентирования асимметричных деталей на вертикальных неподвижных опорах сначала в стационарных системах загрузки, а позже и в роторных с помощью гравитационных ориентаторов. Первые математические модели движения деталей строились на основе принципа Д'Аламбера, а позже – в форме уравнений Лагранжа II-го рода.

В случае пассивного ориентирования деталь, частично запавшая в сконструированный на предыдущих этапах проектирования карман, опирается на его основание, боковую стенку и край вращающегося диска. Затем, пройдя последовательно все этапы, как показано на рис. 3, деталь полностью удаляется из кармана [13].

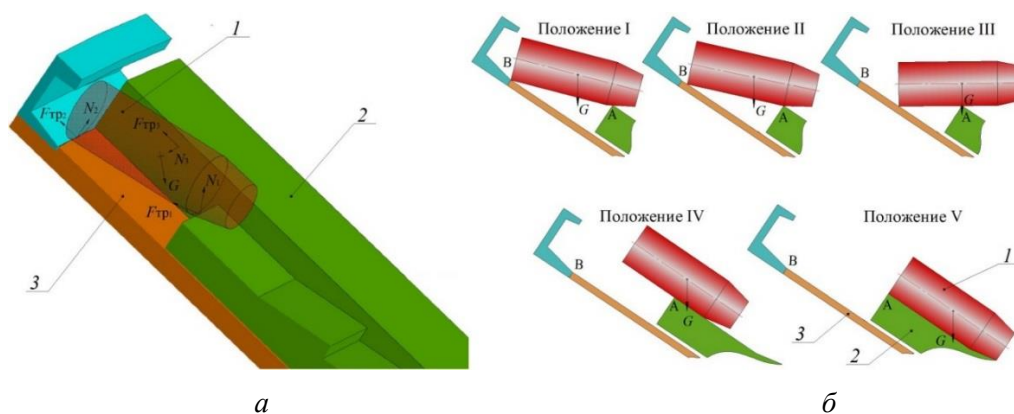


Рис. 3. Начальное (а) и граничные (б) положения детали с торцом в виде усеченного конуса в бункерном загрузочном устройстве с радиальными карманами в процессе пассивного ориентирования:

1 – деталь; 2 – вращающийся диск; 3 – основание кармана

Задача по определению начальных условий данного процесса решается с помощью уравнений статического равновесия детали с коническим торцом в захватывающем органе устройства. Это позволяет определить сначала угол, при котором начинается движение детали, а затем – всю зону, на протяжении которой возможно ее полное удаление из кармана. Полученные значения указанных параметров являются начальными условиями для решения следующих задач: определение общего времени полного удаления детали из кармана и радиального паза вращающегося диска с помощью уравнений Лагранжа II-го рода и времени, в течение которого диск проходит зону пассивного ориентирования. Сравнение значений длительности движения детали и диска позволит получить граничные значения его кинематических параметров, при которых возможно надежное ориентирование деталей.

Аналогичные научные задачи решаются и на четвертом этапе проектирования при оценке условий реализации процесса выдачи деталей из кармана БЗУ в приемный лоток.

Для снижения трудоемкости при выполнении расчетов производительности БЗУ и выбора его оптимальных параметров были разработаны программы, позволяющие в автоматическом режиме, а также в режиме верификации с визуализацией результатов, определять максимальную производительность БЗУ и выбрать скорость, при которой будет обеспечиваться его требуемая производительность для широкой номенклатуры асимметричных деталей с неявной асимметрией [14]. Разработанные для усовершенствованных БЗУ компьютерные программы, основанные на результатах математического моделирования производительности, могут быть использованы и для деталей с явной асимметрией.

Таким образом, современное проектирование механических дисковых БЗУ для асимметричных деталей формы тел вращения должно рассматриваться не с позиций создания просто работоспособной конструкции. Оно должно быть реализовано в рамках научно обоснованного методологического подхода, включающего все особенности функционирования БЗУ и учитывающего взаимосвязанное влияние его основных параметров и свойств деталей. Это позволит обеспечить наибольшую эффективность, как на всех этапах проектирования БЗУ, так и в процессе его эксплуатации.

Список литературы

- 1 Пистолетные и снайперские патроны. Гранатометные выстрелы / В. К. Зеленко, А. В. Брызжев, В. В. Злобин, В. М. Королев. – Тула, Инфра, 2008. – 120 с.
- 2 Дьякова, Э. В. Проектирование систем автоматической загрузки деталей формы тел вращения с асимметрией по торцам / Э. В. Дьякова, Е. В. Пантюхина // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : сборник Материалов XVI Международной научно-технической конференции. – Вологда, 2022. – С. 31–38. – ISBN 978-5-907606-00-5.

References

- 1 Pistol and sniper cartridges. Grenade launchers / V. K. Zelenko, A. V. Bryzhev, V. V. Zlobin, V. M. Korolev. – Tula, Infra, 2008. – 120 p.
- 2 Dyakova, E. V. Designing systems for automatic loading of parts of the shape of rotation bodies with asymmetry at the ends / E. V. Dyakova, E. V. Pantyukhina // Automation and energy saving in mechanical engineering, energy and transport: Materials of the XVI International Scientific and Technical Conference. – Vologda, 2022. – P. 31–38. – ISBN 978-5-907606-00-5.

3 **Ядыкин, Е. А.** Оценка перемежающихся отказов стационарных систем автоматической загрузки технологических роторных машин / Е. А. Ядыкин, Е. В. Давыдова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 10. – С. 107–112. – ISSN 2071-6168.

4 **Пантюхина, Е. В.** Проблемы автоматической загрузки деталей формы тел вращения с неявной асимметрией традиционными загрузочными устройствами / Е. В. Пантюхина // Современные технологии в науке и образовании – СТНО–2021 : сборник трудов IV Международного научно-технического форума : в 10 т. – Рязань, 2021. – С. 95–101. – ISBN 978-5-7722-0327-9.

5 **Пантюхина, Е. В.** Механические дисковые бункерные загрузочные устройства для стержневых деталей с неявно выраженными ключами ориентации / Е. В. Пантюхина, В. В. Прейс, А. В. Хачатурян // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – 2018. – № 3 (3). – С. 16–25. – ISSN 2658-4727.

6 **Пантюхина, Е. В.** Механические бункерные загрузочные устройства для элементов патронов стрелкового оружия с неявной асимметрией / Е. В. Пантюхина, В. В. Прейс // Инновационные технологии и технические средства специального назначения : Труды двенадцатой общероссийской научно-практической конференции : в 3 т. Т. 2. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 79–85. – ISBN 978-5-94652-656-2.

7 Автоматическая загрузка технологических машин : справочник / И. С. Бляхеров и др. ; под общей редакцией И. А. Клусова. – Москва : Машиностроение, 1990. – 400 с. – ISBN 5-217-01111-4.

8 **Boothroyd, G.** Assembly Automation and Product Design / G. Boothroyd // Second Edition (CRC Press, Taylor & Francis Group). – 2005. – 536 p. – ISBN 9780429121258.

9 **Ghosh, S.** Assembly Line – Theory and Practice / S. Ghosh, S. P. Singh. – Rijeka, Croatia : InTech Europe, 2011. – P. 149–178. – ISBN 978-953-307-995-0.

10 Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками / В. Ф. Прейс, И. С. Бляхеров, В. В. Прейс, Н. А. Усенко ; под редакцией В. Ф. Прейса. – Москва : Машиностроение, 1975. – 280 с.

11 **Медвидь, М. В.** Автоматические ориентирующие загрузочные устройства и механизмы / М. В. Медвидь. – Москва : Машгиз, 1963. – 299 с.

12 **Pantyukhina, E. V.** Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of

3 **Yadykin, E. A.** Assessment of intermittent failures of stationary systems for automatic loading of technological rotary machines / E. A. Yadykin, E. V. Davydova // Izvestia of Tula State University. Technical sciences. – 2015. – No. 10. – P. 107–112. – ISSN 2071-6168.

4 **Pantyukhina, E. V.** Problems of automatic loading of parts of the shape of rotation bodies with implicit asymmetry with traditional loading devices / E. V. Pantyukhina // Modern technologies in science and education – MTSE–2021 : Collection of works of the IV International Scientific and Technical Forum: in 10 volumes. – Ryazan, 2021. – P. 95–101. – ISBN 978-5-7722-0327-9.

5 **Pantyukhina, E. V.** Mechanical disk hopper feeding devices for rod parts with implicitly expressed orientation keys / E. V. Pantyukhina, V. V. Preys, A. V. Khachaturian // Automation and measurements in machine and instrumentation. – 2018. – No. 3 (3). – P. 16–25. – ISSN 2658-4727.

6 **Pantyukhina, E. V.** Mechanical bunker feeding devices for small arms cartridge elements with implicit asymmetry / E. V. Pantyukhina, V. V. Preys // Innovative technologies and technical means of special purpose : proceedings of the twelfth all-Russian scientific and practical conference: in 3 volumes. V. 2. – St. Petersburg, 2020. – P. 79–85. – ISBN 978-5-94652-656-2.

7 Automatic feeding of technological machines: Reference book / I. S. Blyakherov, etc.; under the general edition I. A. Klusova. – Moscow : Mechanical, 1990. – 400 p. – ISBN 5-217-01111-4.

8 **Boothroyd, G.** Assembly Automation and Product Design / G. Boothroyd // Second Edition (CRC Press, Taylor & Francis Group). – 2005. – 536 p. – ISBN 9780429121258.

9 **Ghosh, S.** Assembly Line – Theory and Practice / S. Ghosh, S. P. Singh. – Rijeka, Croatia : InTech Europe, 2011. – P. 149–178. – ISBN 978-953-307-995-0.

10 Automation of press feeding with piece blanks / V. F. Preys, I. S. Blyakherov, V. V. Preys, N. A. Usenko; edited by V. F. Preys. – Moscow : Mechanical, 1975. – 280 p.

11 **Medvid, M. V.** Automatic orienting loading devices and mechanisms / M. V. Medvid. – Moscow : Mashgiz, 1963. – 299 p.

12 **Pantyukhina, E. V.** Integrated approach methodology for evaluating the loading device

mechanical disk hopper-feeding devices / E. V. Pantyukhina // IOP Conf. Series : Journal of Physics : Conference Series. – 2020. – Vol. 1546. – P. 012024. – DOI 10.1088/1742-6596/1546/1/012024.

13 **Пантюхина, Е. В.** Пассивное ориентирование деталей в механическом дисковом бункерном загрузочном устройстве с кольцевым ориентатором и радиальными пазами / Е. В. Пантюхина, В. В. Прейс, О. В. Пантюхин // Динамика систем, механизмов и машин. – 2020. – Т. 8. – № 2. – С. 73–83. – ISSN 2310-9793.

14 **Пантюхина, Е. В.** Разработка программного обеспечения для расчета фактической производительности бункерных загрузочных устройств для деталей с неявно выраженной асимметрией торцов / Е. В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 9. – С. 433–441. – ISSN 2071-6168.

performance of mechanical disk hopper-loading devices / E. V. Pantyukhina // IOP Conf. Series : Journal of Physics : Conference Series. – 2020. – Vol. 1546. – P. 012024. – DOI 10.1088/1742-6596/1546/1/012024.

13 **Pantyukhina, E. V.** Passive orientation of parts in a mechanical disk hopper loading device with an annular orientator and radial grooves / E. V. Pantyukhina, V. V. Preys, O. V. Pantyukhin // Dynamics of systems, mechanisms and machines. – 2020. – V. 8. – No. 2. – P. 73–83. – ISSN 2310-9793.

14 **Pantyukhina, E. V.** Development of software for calculating the actual capacity of hopper loading devices for parts with implicitly expressed asymmetry of the ends / E. V. Pantyukhina // Izvestia of Tula State University. Technical sciences. – 2020. – No. 9. – P. 433–441. – ISSN 2071-6168.

S. A. Vasin, E. V. Pantyukhina

MAIN DIRECTIONS FOR DESIGN OF MECHANICAL DISK HOPPER LOADING DEVICES FOR ASYMMETRIC PARTS OF ROTATION BODIES SHAPE

Abstract. The paper considers the stages of designing mechanical disk hopper loading devices, during which high reliability and the required performance of systems for automatically loading asymmetric parts of the shape of rotation bodies into modern technological equipment will be ensured. The main tasks of each stage and ways to solve them are shown, which contribute to improving the reliability and ensuring the required capacity of the hopper loading device for parts with asymmetry. The solution of the tasks in the specified order allows, at the early stages of design, to develop the design of the bunker loading device that is optimal in all respects and does not require expensive investments in the creation of prototypes for testing to evaluate its performance.

Keywords: automatic loading, bunker loading device, loading device design, asymmetric parts, loading device performance.

For citation: Vasin, S. A. Main directions for design of mechanical disk hopper loading devices for asymmetric parts of rotation bodies shape / S. A. Vasin, E. V. Pantyukhina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_8.

Сведения об авторах

Васин Сергей Александрович

Тульский государственный университет (ТулГУ),
кафедра «Городского строительства, архитектуры
и дизайна»,

доктор технических наук, профессор,
e-mail: vasin_sa53@mail.ru

Пантюхина Елена Викторовна

Тульский государственный университет (ТулГУ),
кафедра «Промышленная автоматика и
робототехника»,

кандидат технических наук, доцент,
e-mail: e.v.pant@mail.ru

Information about the authors

Vasin Sergey Alexandrovich

Tula State University (TulSU),
Chair «Urban Construction, Architecture
and Design»,

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: vasin_sa53@mail.ru

Pantyukhina Elena Viktorovna

Tula State University (TulSU),
Chair «Industrial Automation and Robotics»,
Candidate of Engineering Sciences,

Associate Professor,
e-mail: e.v.pant@mail.ru

М. Е. Николаев, Е. Ю. Козловцева, А. В. Калачев

ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНЫЙ АГРЕГАТ С УВЕЛИЧЕННОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНОЙ

Аннотация. Предлагается использовать погрузочно-транспортный агрегат на базе штабелера с манипулятором последовательной структуры, поворотной платформой и универсальным клещевым захватом, что позволит увеличить рабочую зону обслуживания относительно вилочного погрузчика, функциональные возможности погрузчика, уменьшить затрачиваемое время на маневрирование шасси погрузчиком до 12 % и увеличить коэффициент производительности погрузочно-транспортного агрегата до 0,7.

В результате проведенных исследований разработана конструкция погрузочно-транспортного агрегата. Предложен технологический процесс погрузки, транспортировки и укладки бочек с нефтью в складских помещениях. Посчитана степень подвижности манипуляционного механизма погрузчика по формуле Сомова-Мальшева. Проведен кинематический анализ, рассчитана теоретическая рабочая зона обслуживания выходного звена грузозахватного органа погрузчика, сформированная в программном комплексе Mathcad.

Ключевые слова: погрузчик, манипулятор, степень подвижности, кинематический анализ, зона обслуживания, грузозахватный орган, механизм.

Для цитирования: 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. С. 16–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_16.

Введение

В настоящее время в промышленности на складских работах большое применение находят себе погрузочно-транспортные агрегаты, используемые для выполнения технологического процесса погрузки, транспортировки и укладки бочек с нефтью. В частных случаях функциональных возможностей погрузчика хватает при выполнении погрузочно-транспортных работ, но при укладке бочек или возникновении препятствий необходимо маневрировать с помощью шасси погрузчика, что в свою очередь увеличивает время выполнения технологического процесса и уменьшает производительность погрузчика. Поэтому разработана конструкция погрузочно-транспортного агрегата. Предлагается провести структурный и кинематический анализ механизма погрузчика с целью увеличения рабочей зоны обслуживания манипуляционного устройства погрузочно-транспортного агрегата и уменьшения маневрирования шасси погрузчика при погрузке и укладке бочек с нефтью в складских помещениях [1, 2].

Основная часть

Погрузочно-транспортный агрегат с увеличенной рабочей зоной (рис. 1), содержит раму 1 с закреплёнными на ней грузоподъемником 2, противовесом 3, блоком аккумуляторных батарей 4, шасси погрузчика 5, выполненное с колесной формулой 6х6, а также поворотную платформу 6. Манипулятор последовательной структуры состоит из исполнительных звеньев 7, пяти электроприводов 8, соединенных между собой посредством вращательных цилиндрических шарниров 9 с кинематической парой пятого класса. Грузозахватный орган выполнен в виде двух клещей 10, тяг 11, управляемого электропривода 12 и двух сервоприводов 13, соединенных между собой посредством вращательных цилиндрических шарниров 14 с кинематической парой пятого класса [3, 4]. Технологический процесс погрузочно-транспортной работы в складском помещении осуществляется следующим образом (рис. 2).

Погрузчик-штабелер с увеличенной рабочей зоной с помощью шасси 5 с колесной формулой 6х6 перемещается по складскому помещению до захватываемого объекта, после чего останавливается и по необходимости осуществляет поворот рамы 1 на необходимый угол.

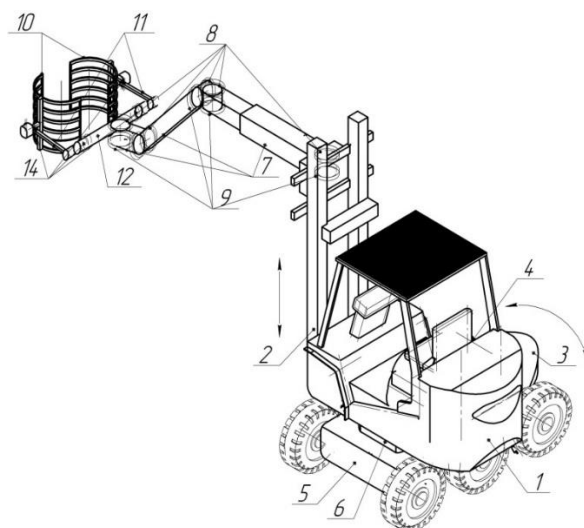


Рис. 1. Общий вид погрузочно-транспортного агрегата:

1 – рама; 2 – грузоподъемник; 3 – противовес; 4 – блоком аккумуляторных батарей, 5 – шасси; 6 – поворотная платформа; 7 – исполнительные звенья; 8, 12 – электропривода; 9, 14 – вращательные цилиндрические шарниры с кинематической парой пятого класса; 10 – звенья грузозахватного органа; 11 – тяги; 13 – сервоприводы

Далее с помощью грузоподъемника 2 осуществляет вертикальное перемещение исполнительных звеньев 7, затем с помощью электроприводов 8 происходит подвод грузозахватного органа к грузу, далее с помощью электропривода 12 и тяг 11 осуществляется сжатие клещей 10. Серводвигатели выполняют вращательную функцию клещей 10 для обеспечения наилучшей маневренности грузозахватного органа.

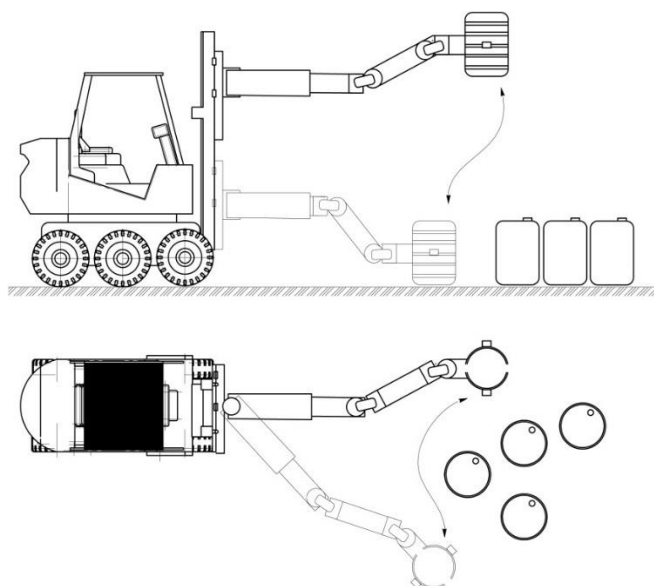


Рис. 2. Схема технологического процесса погрузки паллетов в складском помещении

Одними из главных задач при проектировании механизма погрузочно-транспортного агрегата является расчет структурных и кинематических параметров манипулятора погрузчика. На начальных этапах исследования может возникнуть вопрос о заклинивании и потере устойчивости механизма при выполнении технологических операций погрузки, разгрузки и транспортировки грузов. Для этого необходимо рассчитать степень подвижности манипуляционного механизма погрузчика [3, 4].

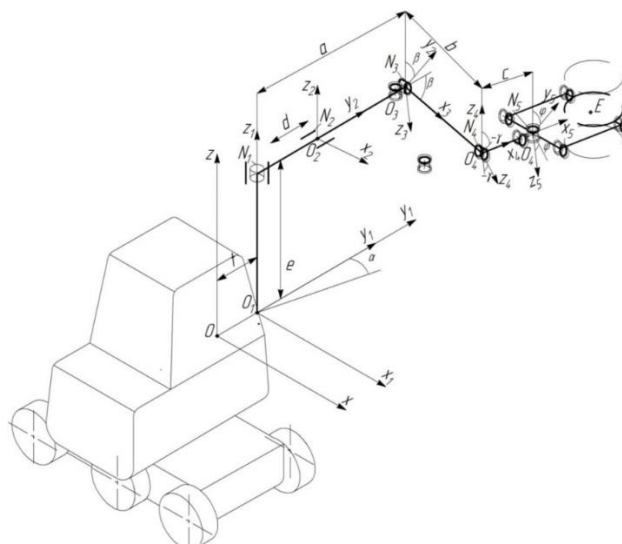


Рис. 3. Кинематическая схема погрузчика-штабелера

В данном случае структурная схема механизма имеет одно неподвижное звено и пять подвижных звеньев (N_1, N_2, N_3, N_4, N_5) [5, 6]. По условию нормальности число звеньев должно соответствовать степени подвижности $W = N$. Степень подвижности манипуляционного механизма погрузчика определялась по формуле Сомова-Малышева:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 = 5,$$

где $W(n, p_i)$ – степень подвижности механизма погрузочно-транспортного агрегата; n – подвижные звенья манипуляционного механизма; p_i – кинематические пары i -й подвижности.

Учитывая глобальное передвижение шасси при выполнении технологической операции погрузки-разгрузки грузов в складском помещении, степень подвижности $W=6$.

Задача позиционирования манипуляционного механизма заключается в определении обобщённых координат $\alpha, \beta, \gamma, \varphi$ при движении выходного звена грузозахватного органа, определяемого перемещением относительно центра неподвижной декартовой системы координат $Oxyz$ и направляющих косинусов a_{pq} от подвижной $O_5x_5y_5z_5$ системы координат. Для решения этой задачи необходимо определить декартовы координаты $x_E(t), y_E(t), z_E(t)$ точки подвеса в абсолютной системе отсчета $Oxyz$ [7, 8].

Положение рабочего органа определяем произведением матриц перехода $M_{i-1,i}$, описывающих положение i звена относительно $(i-1)$.

$$M_{05} = M_{01} \times M_{12} \times M_{23} \times M_{34} \times M_{45}.$$

Связь между единичными векторами i и $(i-1)$ в декартовых системах координат осуществляется с помощью матриц перехода $M_{i-1,i}$

$$\begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(x_{i-1}, x_i) & \cos(x_{i-1}, y_i) & \cos(x_{i-1}, z_i) \\ \cos(y_{i-1}, x_i) & \cos(y_{i-1}, y_i) & \cos(y_{i-1}, z_i) \\ \cos(z_{i-1}, x_i) & \cos(z_{i-1}, y_i) & \cos(z_{i-1}, z_i) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i-1,i} \\ y_{i-1,i} \\ z_{i-1,i} \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $x_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ – единичный вектор в i подвижной декартовой системе координат; $x_{i-1,i} = [x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}]^T$ – вектор начала i ($i-1$) в декартовой системе координат, полученный с помощью направляющих косинусов.

В общем виде матричное преобразование можно представить как,

$$x_{i-1} = M_{i-1,i} x_i,$$

В результате расчетов, при последовательном переходе декартовых систем координат $M_{01}, M_{21}, M_{23}, M_{34}, M_{45}$ к нулевой $Oxyz$, получаем

$$M_{05} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\alpha(d-a+Vy_2)+c(\sin\beta\sin\alpha^2+\cos\gamma\cos\beta\sin\alpha)-b\cos\beta\sin\alpha \\ f-\cos\alpha(d-a+Vy_2)+\cos\alpha(d+Vy_2)-c(\cos\alpha\sin\beta\sin\alpha+\cos\gamma\cos\beta\cos\alpha)+b\cos\beta\cos\alpha \\ Vz_1+e-c(\cos\gamma\sin\beta-\cos\beta\sin\alpha+b\sin\beta) \\ 1 \end{bmatrix},$$

где a_{sk} – направляющие косинусы.

Из матрицы видно, что точка E – координата точки грузозахватного органа – не зависит от изменения значения угла φ .

Поэтому для определения конфигурации зоны обслуживания манипуляционного устройства погрузчика, нужна система из трех уравнений.

$$\begin{cases} x_E = \sin\alpha(d-a+\Delta y_2)+c(\sin\beta\sin\alpha^2+\cos\gamma\cos\beta\sin\alpha)-b\cos\beta\sin\alpha \\ y_E = f-\cos\alpha(d-a+\Delta y_2)+\cos\alpha(d+\Delta y_2)-c(\cos\alpha\sin\beta\sin\alpha+\cos\gamma\cos\beta\cos\alpha)+b\cos\beta\cos\alpha \\ z_E = \Delta z_1+e-c(\cos\gamma\sin\beta-\cos\beta\sin\alpha+b\sin\beta) \end{cases} \quad (1)$$

С помощью уравнений связей (1) сформирована зона обслуживания погрузочно-транспортного агрегата [9, 10]. Расчет произведен в программном комплексе Mathcad.

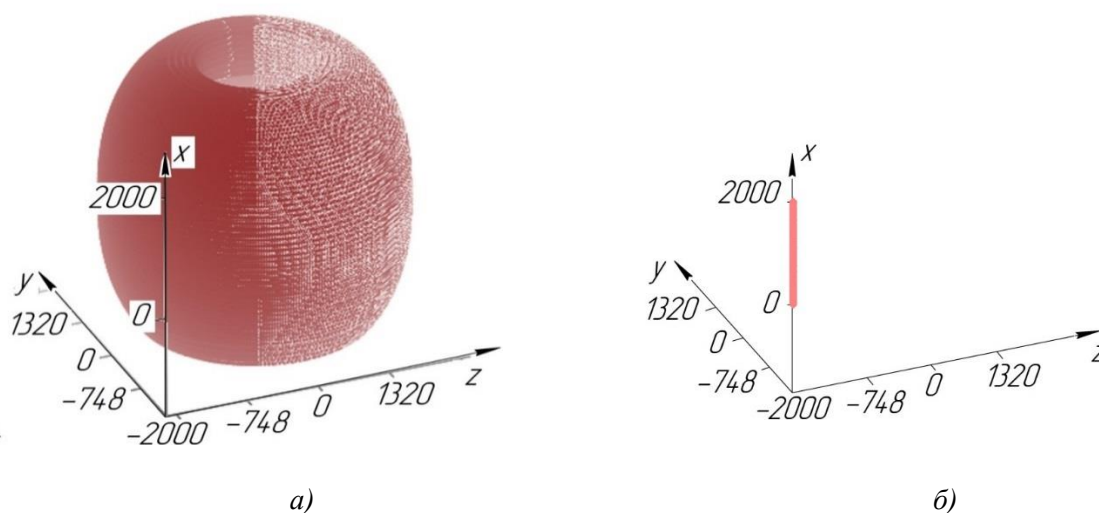


Рис. 4. Конфигурация зоны обслуживания выходного звена грузозахватного органа с программного комплекса Mathcad:

a – рабочая зона обслуживания выходного звена грузозахватного органа погрузочно-транспортного агрегата; b – рабочая зона обслуживания выходного звена грузозахватного органа вилочного погрузчика

Таким образом, из формы рабочей зоны манипулятора на рис. 4 видно, что точка E перемещается по оси x от $\min(x) = -2000$ мм до $\max(x) = 2002$ мм; по оси z от $\min(z) = -748.528$ мм до $\max(z) = 1320$ мм; по оси y $\min(y) = -748$ мм до $\max = 1320$ мм, что значительно больше, чем у базовой модели вилочного погрузчика, у которого форма рабочей зоны обслуживания изменяется только по одной оси без учета глобального перемещения шасси x от $\min(x) = 0$ мм до $\max(x) = 2000$ мм.

Выводы

Разработана конструкция погрузочно-транспортного агрегата. Предложен технологический процесс погрузки, транспортировки и укладки бочек с нефтью в складских помещениях. Посчитана степень подвижности манипуляционного механизма погрузчика по формуле Сомова-Мальшева. Проведен кинематический анализ, рассчитана теоретическая рабочая зона обслуживания выходного звена грузозахватного органа погрузчика, сформированная в программном комплексе Mathcad.

В результате проведенных исследований получили увеличенную зону обслуживания погрузчика относительно базовой модели за счет использования поворотной платформы, манипулятора последовательной структуры и применения электроприводов.

Список литературы

- 1 **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.
- 2 **Илесалиев, Д. И.** К вопросу о схеме размещения стеллажей на складе // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – № 1. – С. 99–106. – ISSN 2413-9920.
- 3 **Карпенко, М.** Перспектива использования гидравлического энергосберегающего привода / М. Карпенко, Л. Е. Пелевин, М. Богдвичус // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2017. – № 3 (41). – С. 7–12. – ISSN 2074-1146.
- 4 **Ковалёва, Т. Е.** Сравнительный анализ вилок погрузчика компьютерным моделированием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 316–318. – ISSN 2071-6168.
- 5 **Семенов, Д. А.** Автоматизация рабочего цикла вилочного погрузчика // Научные известия. – 2022. – № 28. – С. 201–204. – ISSN 2413-6492.
- 6 **Сахапов, Р. Л.** Оценка комбинированных машин с грузоподъемными устройствами / Р. Л. Сахапов, М. М. Махмутов, М. М. Земдикханов, М. М. Махмутов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – № 1–2. – С. 282–287. – ISSN 1990-5378.
- 7 **Юхимец, Д. А.** Метод формирования пространственных траекторий мобильного робота в неизвестной обстановке / Д. А. Юхимец, А. С. Губинков, А. В. Зуев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2018. – № 2 (19). – С. 46–51. – ISSN 1990-5378.
- 8 **Nikolaev, M. E.** Definition of service area of agricultural loading robot with manipulator of parallel-sequential structure / M. E. Nikolaev, I. A. Nesmianov, E. N. Zaharov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – No. 747(1). – DOI 10.1088 1757-899X 747 1 012125.
- 9 **Nikolaev, M.** 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. – 245 p. – DOI 10.1007 978 981 16 3349 2_20.

References

- 1 **Zhadanovsky, B. V.** Organization of construction and installation 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.
- 2 **Pesaliev, D. I.** On the issue of the layout of shelving in a warehouse // Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University. – 2017. – No. 1. – P. 99–106. – ISSN 2413-9920.
- 3 **Karpenko, M.** The prospect of using a hydraulic energy-saving drive / M. Karpenko, L. E. Pelevin, M. Bogdevicius // Technical and technological problems of service. – 2017. – No. 3 (41). – P. 7–12. – ISSN 2074-1146.
- 4 **Kovaleva, T. E.** Comparative analysis of forklift forks by computer modeling // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2022. – No. 3. – P. 316–318. – ISSN 2071-6168.
- 5 **Semenov, D. A.** Automation of the working cycle of a forklift truck // Scientific News. – 2022. – No. 28. – P. 201–204. – ISSN 2413-6492.
- 6 **Sakhapov, R. L.** Evaluation of combined machines with lifting devices / R. L. Sakhapov, M. M. Makhmutov, M. M. Zemdikhanov, M. M. Makhmutov // Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 19. – No. 1–2. – P. 282–287. – ISSN 1990-5378.
- 7 **Yukhimets, D. A.** Method of forming spatial trajectories of a mobile robot in an unknown environment / D. A. Yukhimets, A. S. Gubinkov, A. V. Zuev // Robotics and technical cybernetics. – 2018. – No. 2 (19). – P. 46–51. – ISSN 1990-5378.
- 8 **Nikolaev, M. E.** Definition of the service area of an agricultural loading robot with a manipulator of parallel-sequential design / M. E. Nikolaev, I. A. Nesmianov, E. N. Zakharov // IOP conference series : Materials science and engineering. – 2020. – No. 747(1). – DOI 10.1088 1757-899X 747 1 012125.
- 9 **Nikolaev, M.** 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. – 245 p. – DOI 10.1007 978 981 16 3349 2_20.

10 Zhoga, V. V. The architecture of the control system for the mobile process robot with walking movers International / V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, S. E. Terekhov, V. A. Belikov // Review of Mechanical Engineering. – 2017. – Т. 11. – No. 5. – P. 337–342. – DOI 10.15866/ireme.v11i5.11597. – ISSN 1970-8734.

10 Zhoga, V. V. The architecture of the control system for the mobile process robot with walking movers International / V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, S. E. Terekhov, V. A. Belikov // Review of Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 11. – No. 5. – P. 337–342. – DOI 10.15866/ireme.v11i5.11597. – ISSN 1970-8734.

M. E. Nikolaev, E. Yu. Kozlovtsseva, A. V. Kalachev

LOADING AND TRANSPORT UNIT WITH AN ENLARGED WORKING AREA

Abstract. It is proposed to use a loading and transport unit based on a stacker with a sequential structure manipulator, a rotary platform and a universal pincer grip, which will increase the service area relative to the forklift, the functionality of the loader, reduce the time spent on maneuvering the chassis by the loader up to 12 % and increase the productivity coefficient of the loading and transport unit up to 0.7.

As a result of the research the design of the loading and transport unit has been developed. The technological process of loading, transporting and laying barrels of oil in warehouses is proposed. The degree of mobility of the handling mechanism of the loader is calculated according to the formula of Somov-Malyshev-Chebyshev. The kinematic analysis is carried out, and it is calculated the theoretical working area of the service of the output link of the loader's lifting body, formed in the Mathcad software package.

Keywords: loader, manipulator, degree of mobility, kinematic analysis, service area, lifting body, mechanism.

For citation: Nikolaev, M. E. Loading and transport unit with an enlarged working area / M. E. Nikolaev, E. Yu. Kozlovtsseva, A. V. Kalachev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 16–21. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_16.

Сведения об авторах

Николаев Максим Евгеньевич

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
кандидат технических наук,
старший преподаватель,
e-mail: mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

Козловцева Елена Юрьевна

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
старший преподаватель,
e-mail: elenakozlovtsseva@gmail.com

Калачев Андрей Викторович

Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического
университета (ИАиС ВолГТУ),
кафедра «Нефтегазовые сооружения»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail : anviko34@yandex.ru

Information about the authors

Nikolaev Maxim Evgenievich

Institute of Architecture and Construction of
Volgograd State Technical University (IAiS Volgstu),
Chair «Oil and Gas Structures»,
Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer,
e-mail: Mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru

Kozlovtsseva Elena Yurievna

Institute of Architecture and Construction of
Volgograd State Technical University (IAiS Volgstu),
Chair «Oil and Gas Structures»,
Senior Lecturer,
e-mail: elenakozlovtsseva@gmail.com

Kalachev Andrey Viktorovich

Institute of Architecture and Construction of
Volgograd State Technical University (IAiS Volgstu),
Chair «Oil and Gas Structures»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: anviko34@yandex.ru

П. А. Поляков

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАНИЙ ПРИЖИМАЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ СООТНОШЕНИЯ ЧАСТОТ

Аннотация. Тормозные устройства подвижного состава отличаются от устройств, применяемых в других видах транспорта, за счет наличия передающего механизма в приводе. Многозвенность прижимающего механизма не только увеличивает прижимное усилие в рабочих парах тормоза, но и становится причиной усиления колебательного процесса в трибоконтакте тормозных устройств. В статье приведены аналитические зависимости для определения угловых перемещений рычага и тормозной колодки прижимающего механизма тормозного устройства. С помощью математического моделирования удалось установить, что с увеличением разницы частот рычага и тормозной колодки прижимающего механизма силового устройства количество и амплитуда отскока тормозной колодки от рабочей поверхности диска возрастают, что приводит к снижению параметров стабильности эксплуатационных характеристик тормоза.

Ключевые слова: нелинейная динамика, колебательный процесс, угловые перемещения, прижимающий механизм, тормозное устройство, рычаг, тормозная колодка, отскок.

Для цитирования: Поляков, П. А. Амплитудно-частотные характеристики колебаний прижимающего механизма тормозного устройства подвижного состава с учетом соотношения частот / П. А. Поляков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 22–31. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_22.

Введение

В работе [1] исследуется движение грузового поезда по криволинейным участкам пути в режиме торможения. Рассмотрено влияние скорости движения, радиуса кривизны кривой, наличия и положения в составе порожних вагонов и ряда других параметров на безопасность движения поезда. В статье [2] разработана упрощенная модель нелинейной динамики тормозного механизма, уравнения которой задаются и решаются теоретическим и численным методами. Результаты показывают, что состояние системы более чувствительно к колебаниям тормозной силы, чем изменение отрицательного наклона коэффициента трения относительно скорости между тормозной колодкой и диском. Целью статьи [3] является проектирование интегрированной системой управления электромагнитного тормоза и фрикционного тормоза и исследование характеристик нелинейного сцепления и динамических характеристик интегрированной системы электромагнитного тормоза и фрикционного тормоза. Точность предложенной математической модели нелинейного сцепления проверяется на аппаратном обеспечении в платформе моделирования контуров, а характеристики нелинейного сцепления интегрированной системы также анализируются с помощью экспериментов. В статье [4] описана нелинейная переходная и стационарная динамика, обусловленная вибрациями, вызванными трением, в дисковом тормозе. На базе модели конечных элементов и непрерывного волнового преобразования исследован вклад основных частот и гармонических составляющих в нелинейную переходную и стационарную динамику для дискового тормозного механизма, подверженную одиночной и множественной неустойчивостям. Научное исследование [5] посвящено анализу возможности применения эталонного адаптивного управления моделью для динамического торможения поезда с целью управления динамическими тормозными усилиями, оставаясь при этом в пределах допустимых усилий сцепления и сцепных устройств. Этот метод управления позволяет точно определить тормозной путь поезда. В статье [6] проиллюстрирована возможность периодических изменений угловой скорости вращения колеса, связанных с существованием определенных режимов работы антиблокировочной системы вблизи максимального значения для характеристики контактной силы.

Вышеперечисленные источники исследуют проблематику взаимодействия тормозных механизмов с точки зрения колебательного процесса, возникающего на протяжении всего цикла торможения. Авторы ставят перед собой цель не только бороться с визгом, возникающим в результате трибо-

контакта фрикционных пар, но и создавать тормозные механизмы, обеспечивающие стабильные выходные параметры: тормозной момент, тормозной путь и т. д. Основной проблемой в плоскости колебательного процесса в тормозных устройствах подвижного состава остается многосвязность прижимающего механизма, каждый элемент которого имеет свою частоту колебаний и оказывает влияние на другие сочлененные с ним элементы.

Проанализированные работы указывают, что тематика нелинейной динамики взаимодействия рабочих пар тормозных механизмов является актуальной по настоящее время.

Основная часть

Тормозные механизмы, применяемые в различных отраслях машиностроения, имеют отличия не только в своей структуре, но и в выходных параметрах. Этот факт предполагает применение различных методов расчета для каждого типа тормозного механизма. Особенностью тормозных механизмов подвижного состава является наличие передаточного механизма в тормозном приводе (рис. 1, а, б) в отличие от тормозных механизмов автомобильной техники (рис. 1, в, г).

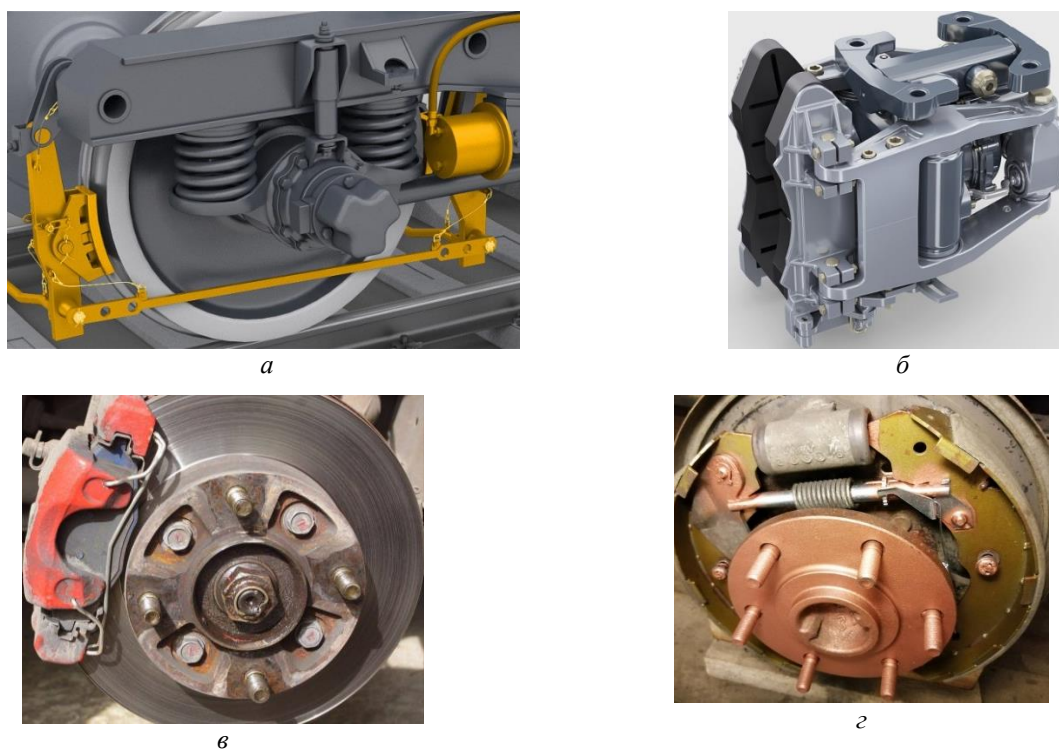


Рис. 1. Тормозные механизмы с передаточным механизмом в тормозном приводе (а, б) и непосредственного действия (в, г)

Наличие передаточного механизма увеличивает усилие для тормозной колодки. Несмотря на данное преимущество, данная система имеет собой недостаток, заключающийся в сниженных значениях параметров стабильности, которые будут определяться колебательным процессом не только колодки, но и рычага. Следуя из этого утверждения, тормозные устройства с передаточным механизмом представляют собой полимассовую колебательную систему, при этом непосредственное влияние на стабильность контакта между колодкой колесом несет рычаг, на котором фиксируется колодка. В дисково-колодочном тормозном механизме этим элементом является рычаг клещевого механизма. Следовательно, колебательная система приобретает характер двухмассовой. Рассмотрим расчетные схемы колодочного и дисково-колодочного тормозных устройств с передаточными механизмами (рис. 2 а, б). Рычаги и колодки тормозного механизма обладают различными значениями угловых перемещений ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$), что обусловлено идентичными частотами колебаний каждого элемента рассматриваемых пар ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$). Ввиду симметричности конструкций колодочного и дисково-колодочного тормоза рассмотрим лишь левую часть прижимающего механизма тормозной колодки. В качестве исходных данных колебательной системы необходимо использовать момент инерции рычага J_p и тормозной колодки J_k в качестве инерционных критериев оценки. Шарнирное соединение рычага и тормозной колодки обладает упругими и демпфирующими свойствами, выражающимися значениями жесткости c_{p1} и коэффициентом диссипации b_{p1} . В свою очередь сопряжение тормозной колодки с металлическим

фрикционным элементом (колесом, тормозным диском) также обладает соответствующими характеристиками жесткости $c_{к1}$ и диссипации $b_{к1}$. Вынужденные колебания вызваны несовершенством сопрягаемых поверхностей, являющимся результатом нарушения технологии производства и длительной эксплуатации. В шарнирном соединении износ втулок тормозных колодок и деформация валика приводят к образованию зазоров, что определяет увеличение начальных угловых колебаний φ_{02} тормозных колодок. Неравномерность износа фрикционного материала и несовершенство рабочих поверхностей металлического фрикционного элемента приводят к вынужденному колебательному процессу на протяжении всего процесса торможения. Вынужденные колебания носят стохастический характер, поэтому трудно прогнозируемы, ввиду чего предопределение вынужденного колебательного процесса необходимо рассматривать с позиции колебаний, изменяемых по гармоническому закону. Для задания исходных данных математической модели необходимо ввести переменные амплитуд гармонических возмущений для рычага M_1 и для колодки M_2 . В качестве еще одного входного параметра необходимо ввести понятие сдвига фаз между амплитудами возбуждающего момента и амплитудами вызываемых этим моментом колебаний $\psi_в$. Ввиду наличия жесткой связи между рычагом и тормозной колодкой изменение сдвига фаз одного элемента будет компенсироваться за счет изменения другого, поэтому целесообразно принять равенство сдвигов фаз колодки и рычага.

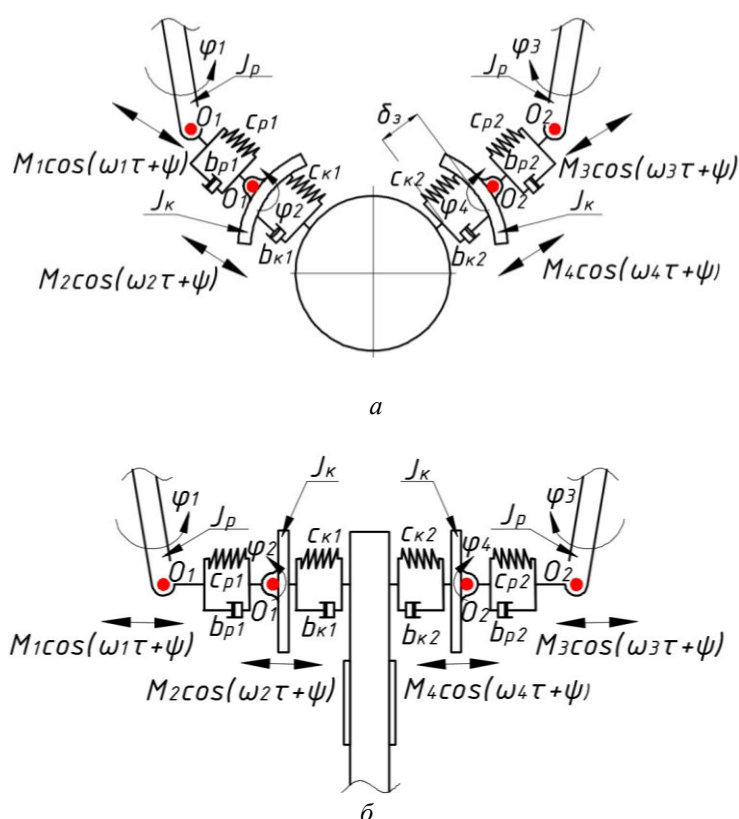


Рис. 2. Двухмассовые колебательные системы прижимающих механизмов колодочного (а) и дисково-колодочного (б) тормозных устройств подвижного состава

В качестве допущений для математического моделирования необходимо зафиксировать следующее условие: величина колебаний тормозной колодки не должна превышать величину зазора между рабочими поверхностями тормоза δ_3 : $M_2 \cos(\omega_2 \tau + \psi) < \delta_3$.

На основе рассматриваемых расчетных схем тормозных устройств запишем дифференциальное уравнение двухмассовой колебательной системы привода тормозного устройства с передаточным механизмом относительно двух неизвестных φ_1 и φ_2 :

$$\begin{bmatrix} J_k & 0 \\ 0 & J_p \end{bmatrix} \frac{d^2}{d\tau^2} \begin{Bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{к1} & -b_{к1} \\ -b_{к1} & b_{к1} + b_{р1} \end{bmatrix} \frac{d}{d\tau} \begin{Bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{к1} & -c_{к1} \\ -c_{к1} & c_{к1} + c_{р1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M_2 \\ M_1 \end{Bmatrix} \cos(\omega\tau + \psi_в), \quad (1)$$

где ω – общая частота вынужденных колебаний, Гц; τ – время торможения, с.

В связи с невозможностью определить влияние параметров рычага тормозного механизма на угловые перемещения тормозной колодки относительно точки O_1 необходимо ввести относительные безразмерные переменные в безразмерных координатах $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\tau}$:

$$\begin{aligned} \bar{J}_k &= \frac{J_k}{J_p + J_k}, & \bar{b}_{k1} &= \frac{b_{k1}}{b_{p1} + b_{k1}}, & \bar{c}_{k1} &= \frac{c_{k1}}{c_{p1} + c_{k1}}, \\ \bar{M}_k &= \frac{|M_2|}{|M_1| + |M_2|}, & \varpi_i &= \frac{\omega_i}{\sqrt{c_{p(k)}/J_{p(k)}}}, \quad i=1,2, & \xi_i &= \frac{b_{p(k)}}{2\sqrt{c_{p(k)}/J_{p(k)}}}, \quad i=1,2, \\ \bar{\delta}_3 &= \frac{\delta_3 b_{k1}}{|M_1| + |M_2|}, & & & & \end{aligned}$$

безразмерные величины

безразмерные координаты

$$\bar{\tau} = \tau \sqrt{c_{k1}/J_k}, \quad \bar{\varphi}_i = \frac{\varphi_i b_{k1}}{|M_1| + |M_2|}, \quad i=1,2.$$

Подставим безразмерные переменные и координаты в дифференциальное уравнение двухмассовой колебательной системы привода тормозного устройства с передаточным механизмом:

$$\begin{bmatrix} \bar{J}_k & 0 \\ 1 - \bar{J}_k & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\varphi}_2 \\ \bar{\varphi}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2\xi}{1 - \bar{b}_{k1}} & \frac{-2\xi}{1 - \bar{b}_{k1}} \\ -\frac{2\xi}{1 - \bar{b}_{k1}} & 2\xi \end{bmatrix} \frac{d}{d\tau} \begin{Bmatrix} \bar{\varphi}_2 \\ \bar{\varphi}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 - \bar{c}_{k1} & 1 - \bar{c}_{k1} \\ -1 & 1 \\ 1 - \bar{c}_{k1} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\varphi}_2 \\ \bar{\varphi}_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{M}_k \\ 1 - \bar{M}_k \end{Bmatrix} \cos(\varpi \bar{\tau} + \psi). \quad (2)$$

где ϖ – безразмерная величина общей вынужденной частоты колебательной системы тормозного устройства с передаточным механизмом.

Решение дифференциального уравнения колебательной системы (2) аналогично общему решению колебательной системы (2) [7], но учитывает общее решение для каждого угла поворота относительно каждой частоты вынужденных колебаний:

$$\begin{cases} \bar{\varphi}_1 = \left(1 - \left[\frac{\xi_p \bar{b}_p}{\bar{J}_p} \right]^2 \right) e^{-\frac{\xi_p \bar{b}_p \bar{\tau}}{\bar{J}_p}} \left(K_1 \sin \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_p}{\bar{J}_p} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_p}{\bar{J}_p} \right)^2} \right] \bar{\tau} + K_2 \cos \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_p}{\bar{J}_p} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_p}{\bar{J}_p} \right)^2} \right] \bar{\tau} \right) + \\ + \left(1 - \left[\frac{\xi_k \bar{b}_k}{\bar{J}_k} \right]^2 \right) e^{-\frac{\xi_k \bar{b}_k \bar{\tau}}{\bar{J}_k}} \left(K_3 \sin \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{\bar{J}_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{\bar{J}_k} \right)^2} \right] \bar{\tau} + K_4 \cos \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{\bar{J}_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{\bar{J}_k} \right)^2} \right] \bar{\tau} \right) + \\ + \left([1 - \varpi_2^2] K_k + [1 - \varpi_1^2] K_{к.р.} \right) \cos(\varpi \bar{\tau}) + \left([1 - \varpi_2^2] K_{р.к.} + [1 - \varpi_1^2] K_{он} \right) \sin(\varpi \bar{\tau}), \\ \bar{\varphi}_2 = e^{-\frac{\xi_p \bar{b}_p \bar{\tau}}{\bar{J}_p}} \left(K_5 \sin \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_p}{\bar{J}_p} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_p}{\bar{J}_p} \right)^2} \right] \bar{\tau} + K_6 \cos \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_p}{\bar{J}_p} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_p}{\bar{J}_p} \right)^2} \right] \bar{\tau} \right) + \\ + e^{-\frac{\xi_k \bar{b}_k \bar{\tau}}{\bar{J}_k}} \left(K_7 \sin \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{\bar{J}_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{\bar{J}_k} \right)^2} \right] \bar{\tau} + K_8 \cos \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{\bar{J}_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{\bar{J}_k} \right)^2} \right] \bar{\tau} \right) + \\ + (K_k + K_{к.р.}) \cos(\varpi \bar{\tau}) + (K_{р.к.} + K_{он}) \sin(\varpi \bar{\tau}), \end{cases} \quad (3)$$

где $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8$ – постоянные коэффициенты, определяющие собственные колебания двухмассовой колебательной системы привода тормозного устройства с передаточным механизмом; $K_k, K_{к.р.}, K_{р.к.}, K_p$ – постоянные коэффициенты, определяющие вынужденные колебания двухмассовой колебательной системы привода тормозного устройства с передаточным механизмом.

Для определения коэффициентов уравнений системы необходимо задаться начальными условиями в общем решении каждого уравнения: $\bar{\tau} = 0, \bar{\varphi}_1 = \bar{\varphi}_{01}, \bar{\varphi}_2 = \bar{\varphi}_{02}, (d\bar{\varphi}_{1(2)}/d\bar{\tau})_0 = 0$.

Исходя из заданных условий постоянные коэффициенты, определяющие собственные колебания системы, будут равны:

$$K_2 = K_4 = \bar{\varphi}_{01}, \quad K_6 = K_8 = \bar{\varphi}_{02}, \quad K_1 = \frac{1}{\sqrt{(\bar{c}_p/\bar{J}_p)^2 - (\bar{b}_p/\bar{J}_p)^2}} \left[\xi_k \left(\frac{\bar{b}_p}{\bar{J}_p} \right)^- \bar{\varphi}_{01} \right],$$

$$K_3 = \frac{1}{\sqrt{(\bar{c}_k/\bar{J}_k)^2 - (\bar{b}_k/\bar{J}_k)^2}} \left[\xi_p \left(\frac{\bar{b}_k}{\bar{J}_k} \right)^- \bar{\varphi}_{01} \right], \quad K_5 = \frac{1}{\sqrt{(\bar{c}_p/\bar{J}_p)^2 - (\bar{b}_p/\bar{J}_p)^2}} \left[\xi_k \left(\frac{\bar{b}_p}{\bar{J}_p} \right)^- \bar{\varphi}_{02} \right],$$

$$K_7 = \frac{1}{\sqrt{(\bar{c}_k/\bar{J}_k)^2 - (\bar{b}_k/\bar{J}_k)^2}} \left[\xi_p \left(\frac{\bar{b}_k}{\bar{J}_k} \right)^- \bar{\varphi}_{02} \right].$$

А постоянные коэффициенты, определяющие вынужденные колебания системы, K_k , $K_{к:р}$, $K_{р:к}$, K_p будут определены из следующих зависимостей:

$$K_k = \left[\frac{(1 - \varpi_2^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_2^2 (\varpi_2^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_k \varpi_2 \varpi \sin \psi + (\varpi_2^2 - \varpi^2) \cos \psi}{(\varpi_2^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_k \varpi_2 \varpi)^2} \right],$$

$$K_{к:р} = \left[\frac{(1 - \varpi_1^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_1^2 (\varpi_1^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_p \varpi_1 \varpi \sin \psi + (\varpi_1^2 - \varpi^2) \cos \psi}{(\varpi_1^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_p \varpi_1 \varpi)^2} \right],$$

$$K_p = \left[\frac{(1 - \varpi_1^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_1^2 (\varpi_1^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_p \varpi_1 \varpi \cos \psi + (\varpi_1^2 - \varpi^2) \sin \psi}{(\varpi_1^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_p \varpi_1 \varpi)^2} \right],$$

$$K_{р:к} = \left[\frac{(1 - \varpi_2^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_2^2 (\varpi_2^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_k \varpi_2 \varpi \cos \psi + (\varpi_2^2 - \varpi^2) \sin \psi}{(\varpi_2^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_k \varpi_2 \varpi)^2} \right].$$

Подставляя все значения постоянных коэффициентов в систему (3), получим уравнения для определения угловых перемещений φ_1 и φ_2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{(|M_1| + |M_2|)}{b_k} \times \\ \times \left(1 - \left[\frac{\xi_p \bar{b}_p}{\bar{J}_p} \right]^2 \right) e^{-\frac{\xi_k \bar{b}_p \bar{\tau}}{\bar{J}_p}} \left(\frac{1}{\sqrt{(\bar{c}_p/\bar{J}_p)^2 - (\bar{b}_p/\bar{J}_p)^2}} \left[\xi_k \left(\frac{\bar{b}_p}{\bar{J}_p} \right)^- \bar{\varphi}_{01} \right] \sin \left[\sqrt{(\bar{c}_p/\bar{J}_p)^2 - (\bar{b}_p/\bar{J}_p)^2} \right] \bar{\tau} + \right. \\ \left. + \bar{\varphi}_{01} \cos \left[\sqrt{(\bar{c}_p/\bar{J}_p)^2 - (\bar{b}_p/\bar{J}_p)^2} \right] \bar{\tau} \right) + \\ \dots \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& \dots \\
& + \left(1 - \left[\frac{\xi_p \bar{b}_k}{J_k} \right]^2 \right) e^{-\frac{\xi_p \bar{b}_k \bar{\tau}}{J_k}} \left[\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{J_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{J_k} \right)^2}} \left[\xi_p \left(\frac{\bar{b}_k}{J_k} \right) \bar{\Phi}_{01} \right] \sin \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{J_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{J_k} \right)^2} \right] \bar{\tau} + \right. \\
& \left. + \bar{\Phi}_{01} \cos \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{J_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{J_k} \right)^2} \right] \bar{\tau} \right] + \\
& + \left(\left[1 - \varpi_2^2 \right] \left[\frac{(1 - \varpi_2^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_2^2 (\varpi_2^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_k \varpi_2 \varpi \sin \psi + (\varpi_2^2 - \varpi^2) \cos \psi}{(\varpi_2^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_k \varpi_2 \varpi)^2} \right] + \right. \\
& \left. + \left[1 - \varpi_1^2 \right] \left[\frac{(1 - \varpi_1^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_1^2 (\varpi_1^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_p \varpi_1 \varpi \sin \psi + (\varpi_1^2 - \varpi^2) \cos \psi}{(\varpi_1^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_p \varpi_1 \varpi)^2} \right] \right) \cos(\varpi \bar{\tau}) \\
& + \left(\left[1 - \varpi_2^2 \right] \left[\frac{(1 - \varpi_2^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_2^2 (\varpi_2^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_k \varpi_2 \varpi \cos \psi + (\varpi_2^2 - \varpi^2) \sin \psi}{(\varpi_2^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_k \varpi_2 \varpi)^2} \right] + \right. \\
& \left. + \left[1 - \varpi_1^2 \right] \left[\frac{(1 - \varpi_1^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_1^2 (\varpi_1^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_p \varpi_1 \varpi \cos \psi + (\varpi_1^2 - \varpi^2) \sin \psi}{(\varpi_1^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_p \varpi_1 \varpi)^2} \right] \right) \sin(\varpi \bar{\tau}), \\
& \Phi_2 = \frac{(|M_1| + |M_2|)}{b_k} e^{-\frac{\xi_p \bar{b}_p \bar{\tau}}{J_p}} \left[\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_p}{J_p} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_p}{J_p} \right)^2}} \left[\xi_k \left(\frac{\bar{b}_p}{J_p} \right) \bar{\Phi}_{02} \right] \sin \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_p}{J_p} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_p}{J_p} \right)^2} \right] \bar{\tau} + \right. \\
& \left. + \bar{\Phi}_{02} \cos \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_p}{J_p} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_p}{J_p} \right)^2} \right] \bar{\tau} \right] + \\
& + e^{-\frac{\xi_p \bar{b}_k \bar{\tau}}{J_k}} \left[\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{J_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{J_k} \right)^2}} \left[\xi_p \left(\frac{\bar{b}_k}{J_k} \right) \bar{\Phi}_{02} \right] \sin \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{J_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{J_k} \right)^2} \right] \bar{\tau} + \right. \\
& \left. + \bar{\Phi}_{02} \cos \left[\sqrt{\left(\frac{\bar{c}_k}{J_k} \right)^2 - \left(\frac{\bar{b}_k}{J_k} \right)^2} \right] \bar{\tau} \right] + \\
& + \left(\left[\frac{(1 - \varpi_2^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_2^2 (\varpi_2^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_k \varpi_2 \varpi \sin \psi + (\varpi_2^2 - \varpi^2) \cos \psi}{(\varpi_2^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_k \varpi_2 \varpi)^2} \right] + \right. \\
& \left. + \left[\frac{(1 - \varpi_1^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \varpi_1^2 (\varpi_1^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_p \varpi_1 \varpi \sin \psi + (\varpi_1^2 - \varpi^2) \cos \psi}{(\varpi_1^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_p \varpi_1 \varpi)^2} \right] \right) \cos(\varpi \bar{\tau}) + \\
& \dots
\end{aligned}
\right.
\end{aligned}$$

$$\left\{ \dots + \left[\frac{(1 - \omega_2^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \omega_2^2 (\omega_2^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_k \omega_2 \varpi \cos \psi + (\omega_2^2 - \varpi^2) \sin \psi}{(\omega_2^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_k \omega_2 \varpi)^2} \right] + \left[\frac{(1 - \omega_1^2 \bar{M}_k)(1 - \bar{J}_k)}{1 + \bar{J}_k \omega_1^2 (\omega_1^2 - 2)} \right] \left[\frac{2\xi_p \omega_1 \varpi \cos \psi + (\omega_1^2 - \varpi^2) \sin \psi}{(\omega_1^2 - \varpi^2)^2 + (2\xi_p \omega_1 \varpi)^2} \right] \right\} \sin(\varpi \bar{\tau}). \quad (4)$$

Полученные аналитические зависимости изменения угловых перемещений необходимо проанализировать, для чего необходимо задаться следующими исходными данными [8]:

- для рычага тормозного устройства $\varphi_{01} = 5^\circ$, $J_p = 22 \text{ кгм}^2$, $c_p = 10 \text{ Н/м}$, $b_p = 7 \text{ (Нс)/м}$;
- для тормозной колодки $\varphi_{02} = 0,5^\circ$, $J_k = 12 \text{ кгм}^2$, $c_k = 5 \text{ Н/м}$, $b_k = 2 \text{ (Нс)/м}$.

Важно отследить наступление момента краткосрочного размыкания рабочих поверхностей тормозного механизма (отскока тормозной колодки) во время процесса торможения. При условии $\omega_1 > \omega_2$ на протяжении торможения произойдет всплеск нарастания колебаний, тогда как при условии $\omega_1 \leq \omega_2$ этого всплеска не будет.

Рассмотрим первое условие подробнее с точки зрения соотношения частот колебаний рычага и колодки тормозного устройства (рис. 3).

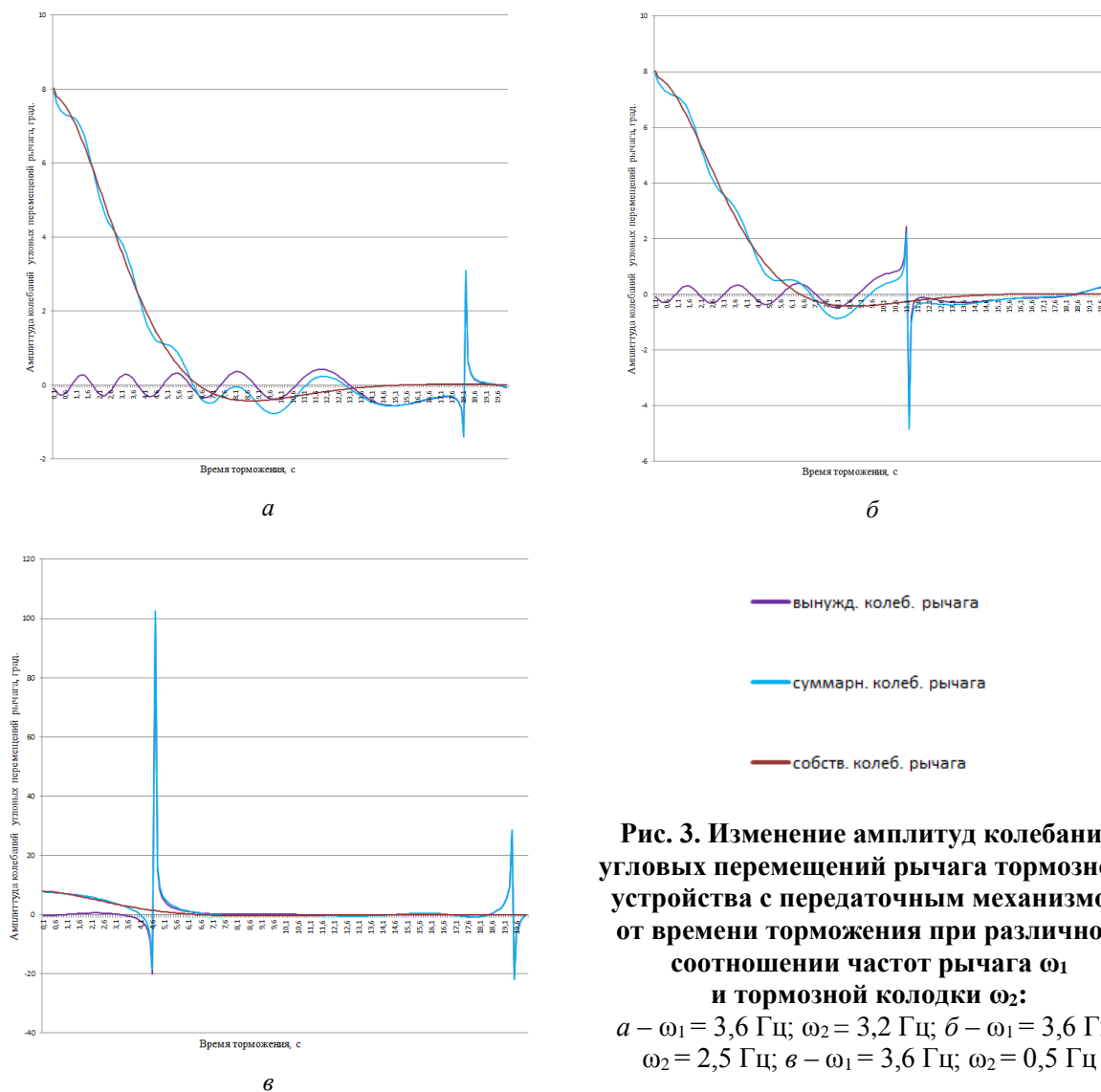


Рис. 3. Изменение амплитуд колебаний угловых перемещений рычага тормозного устройства с передаточным механизмом от времени торможения при различном соотношении частот рычага ω_1 и тормозной колодки ω_2 :
 а – $\omega_1 = 3,6 \text{ Гц}$; $\omega_2 = 3,2 \text{ Гц}$; б – $\omega_1 = 3,6 \text{ Гц}$; $\omega_2 = 2,5 \text{ Гц}$; в – $\omega_1 = 3,6 \text{ Гц}$; $\omega_2 = 0,5 \text{ Гц}$

При значениях $\omega_1 = 3,6$ Гц и $\omega_2 = 3,2$ Гц резонанс будет наступать при завершении 20-й секунды периода торможения (рис. 3, а), тогда как с уменьшением частоты колебаний колодки ($\omega_2 = 2,5$ Гц) наступление момента отскока будет смещаться в середину процесса торможения (рис. 3, б). Снижение частоты вращения до значения ($\omega_2 = 0,5$ Гц) позволяет наблюдать два отскока за период торможения (рис. 3, в).

Рассмотрим второе условие подробнее с точки зрения соотношения частот колебаний рычага и колодки тормозного устройства (рис. 4).

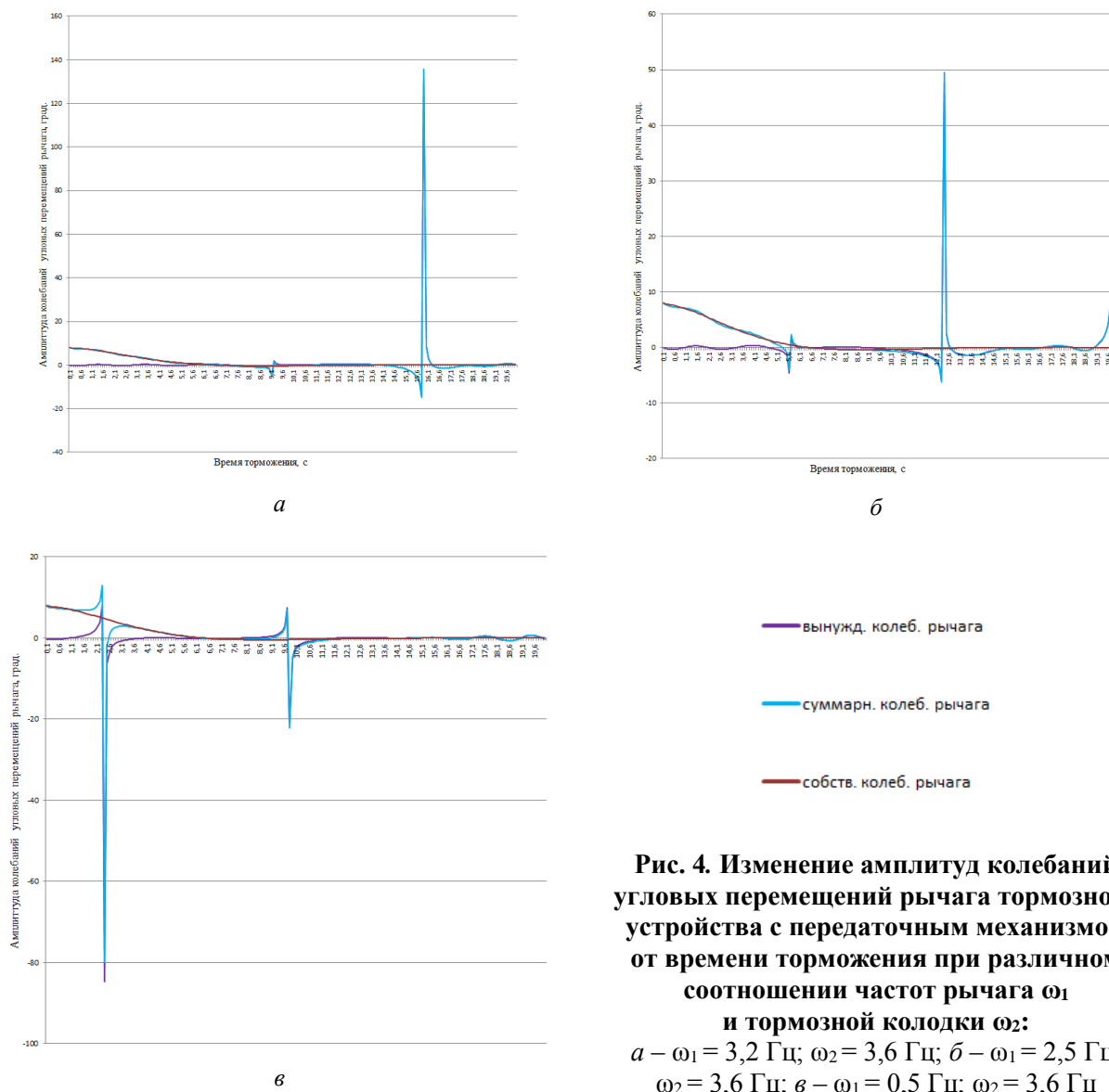


Рис. 4. Изменение амплитуд колебаний угловых перемещений рычага тормозного устройства с передаточным механизмом от времени торможения при различном соотношении частот рычага ω_1 и тормозной колодки ω_2 :
 а – $\omega_1 = 3,2$ Гц; $\omega_2 = 3,6$ Гц; б – $\omega_1 = 2,5$ Гц; $\omega_2 = 3,6$ Гц; в – $\omega_1 = 0,5$ Гц; $\omega_2 = 3,6$ Гц

При значениях $\omega_1 = 3,2$ Гц и $\omega_2 = 3,6$ Гц резонанс будет наступать по завершении времени торможения (рис. 4, а). На 9-й секунде между рабочими парами тормоза произойдет предварительный отскок, предшествующий наступлению резонанса. С уменьшением частоты колебаний рычага ($\omega_1 = 2,5$ Гц) предварительный отскок смещается в зону затухания собственных колебаний рычага (рис. 4, б). При этом на протяжении всей диаграммы помимо предварительного отскока рычага будут наблюдаться еще два отскока (12,1 и 19,6 с). Снижение частоты вращения до значения ($\omega_1 = 0,5$ Гц) позволяет наблюдать два отскока (без предварительного отскока) за период торможения (рис. 4, в). Первый отскок будет происходить в моменте неустановившихся собственных колебаний рычага, тогда как второй будет происходить исключительно в зоне влияния лишь вынужденных колебаний.

Заключение

В результате проведенных исследований были получены аналитические зависимости угловых перемещений рычагов и тормозных колодок тормозных устройств с передаточными механизмами. Полученные изменения угловых перемещений позволили обосновать взаимное влияние рычага и сочлененной с ним тормозной колодки на колебательный процесс, протекающий в период торможения. Результаты математического моделирования позволяют прогнозировать наступление резонанса в процессе торможения в зависимости от соотношения частот рычага и тормозной колодки. Колебательный процесс при взаимодействии рабочих пар тормозных устройств влияет на стабильность выдаваемых выходных параметров механизма, что в итоге сказывается на безопасности процесса торможения. С увеличением разницы частот рычага и тормозной колодки силовых устройств количество и амплитуда отскока тормозной колодки от поверхности возрастают, что приводит к снижению выходных эксплуатационных параметров тормоза.

Список литературы

1 **Ковтун, Е. Н.** Динамические характеристики грузовых вагонов при торможении поезда на криволинейных участках пути / Е. Н. Ковтун, О. М. Маркова, В. В. Малый // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3(46). – С. 69–74. – ISSN 1994-831X.

2 Nonlinear dynamics modeling and analysis of disc brake squeal considering acting process of brake force / X. Liu, Y. Zhao, Y. Shan, T. He // Journal of Vibroengineering. – 2014. – Vol. 16, No. 4. – P. 1964–1976.

3 **He, R.** Nonlinear Coupling Characteristics Analysis of Integrated System of Electromagnetic Brake and Frictional Brake of Car / R. He, D. Hu // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – 14 p. – DOI 10.1155/2015/928152.

4 **Sinou, J.-J.** Transient non-linear dynamic analysis of automotive disc brake squeal – On the need to consider both stability and non-linear analysis / J.-J. Sinou // Mechanics Research Communications. – 2010. – Vol. 37, Iss. 1. – P. 96–105. – DOI 10.1016/j.mechrescom.2009.09.002.

5 **Ahmad, H. A.** Dynamic Braking Control for Accurate Train Braking Distance Estimation under Different Operating Conditions : Dissertation of Doctor of Philosophy In Mechanical Engineering / Husain A. Ahmad. – Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2013. – 119 p.

6 Stability of oscillatory processes in the wheel's angular velocity during ABS operation / I. V. Álvarez, P. A. Kruchinin, A. F. Ramírez, J. J. O. Hidalgo // 2012 IEEE Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. – Cuernavaca, Mexico, 2012. – P. 255–260. – DOI 10.1109/CERMA.2012.48.

7 **Поляков, П. А.** Влияние конструкции прижимающих механизмов тормоза дисково-колодочного типа на колебания, возникающее в контакте фрикционного узла / П. А. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 5. –

References

1 **Kovtun, E. N.** Dynamic characteristics of freight cars during train braking on curved sections of track / E. N. Kovtun, O. M. Markova, V. V. Maly // Transport of the Russian Federation. – 2013. – No. 3(46). – P. 69–74. – ISSN 1994-831X.

2 Nonlinear dynamics modeling and analysis of disc brake squeal considering acting process of brake force / X. Liu, Y. Zhao, Y. Shan, T. He // Journal of Vibroengineering. – 2014. – Vol. 16, No. 4. – P. 1964–1976.

3 **He, R.** Nonlinear Coupling Characteristics Analysis of Integrated System of Electromagnetic Brake and Frictional Brake of Car / R. He, D. Hu // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – 14 p. – DOI 10.1155/2015/928152.

4 **Sinou, J.-J.** Transient non-linear dynamic analysis of automotive disc brake squeal – On the need to consider both stability and non-linear analysis / J.-J. Sinou // Mechanics Research Communications. – 2010. – Vol. 37, Iss. 1. – P. 96–105. – DOI 10.1016/j.mechrescom.2009.09.002.

5 **Ahmad, H. A.** Dynamic Braking Control for Accurate Train Braking Distance Estimation under Different Operating Conditions : Dissertation of Doctor of Philosophy In Mechanical Engineering / Husain A. Ahmad. – Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2013. – 119 p.

6 Stability of oscillatory processes in the wheel's angular velocity during ABS operation / I. V. Álvarez, P. A. Kruchinin, A. F. Ramírez, J. J. O. Hidalgo // 2012 IEEE Ninth Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. – Cuernavaca, Mexico, 2012. – P. 255–260. – DOI 10.1109/CERMA.2012.48.

7 **Polyakov, P. A.** The influence of the design of the clamping mechanisms of the disc-pad brake on the vibrations arising in the contact of the friction unit / P. A. Polyakov // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. – 2022. – No. 5. – P. 408–420. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-408-420.

C. 408–420. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-408-420.

8 **Косаревский, В. В.** Улучшение динамических характеристик и повышение долговечности рычажных передач тормозных систем : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.02.02 / Косаревский Валерий Валерьевич. – Ростов-на-Дону, 2020. – 184 с.

8 **Kosarevsky, V. V.** Improving dynamic characteristics and increasing the durability of lever gears of brake systems : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.02.02 / Kosarevsky Valery Valerievich. – Rostov-on-Don, 2020. – 184 p.

P. A. Polyakov

AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF OSCILLATIONS ROLLING STOCK BRAKING MECHANISM INCLUDING FREQUENCY RATIO

Abstract. Rolling stock braking devices differ from devices used in other types of transport due to the presence of a transmission mechanism in the drive. The multiplicity of the clamping mechanism provides not only an increase in the clamping force in the working pairs of the brake, but also causes an increase in the oscillatory process in the tribocontact of the braking devices. The article presents analytical dependencies for determining the angular movements of the lever and brake pad of the clamping mechanism of the braking device. Using mathematical modeling, it was found that with an increase in the frequency difference between the lever and the brake pad of the clamping mechanism of the power device, the number and amplitude of the rebound of the brake pad from the working surface of the disc increases, which leads to a decrease in the stability parameters of the brake performance.

Keywords: nonlinear dynamics, oscillatory process, angular displacement, clamping mechanism, braking device, lever, brake pad, rebound.

For citation: Polyakov, P. A. Amplitude-frequency characteristics of oscillations rolling stock braking mechanism including frequency ratio / P. A. Polyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 22–31. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_22.

Сведения об авторе

Поляков Павел Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Научно-производственный центр
«Охрана труда»,
ведущий научный сотрудник;

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
кафедра «Транспортные процессы
и технологические комплексы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Information about the author

Polyakov Pavel Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Research and Production Center
«Labor Protection»,
Leading Researcher;

Kuban State Technological University (KubSTU),
Chair «Transport Processes
and Technological Complexes»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

П. А. Поляков

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ УСТРОЙСТВ ДИСКОВО-КОЛОДОЧНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Аннотация. Разработана методика проектирования силовых устройств дисково-колодочного типа с различными прижимающими механизмами на основе оценки эксплуатационных параметров стабильности, эффективности и энергоемкости указанных устройств. Ее отличие от известных ранее методов расчета состоит в учете количества, размеров и геометрии размещения прижимающих элементов тормозного устройства. Итоги расчетов эксплуатационных параметров тормозных устройств с полиприжимающими элементами по предложенной методике привели к выводу о преимуществе тормозного механизма с двумя прижимающими элементами перед серийными механизмами с идентичными параметрами диска и колодок. Другой особенностью методики является связь между эксплуатационными параметрами тормоза и теплоотдающей способностью узла охлаждения устройства. В результате расчета температурного поля и способности теплопередачи от нагретых поверхностей механизма внешней среде с использованием разработанной многослойной тепловой модели «вентилируемый тормозной диск – внешняя среда» установлено, что силовое устройство с двумя прижимающими элементами увеличивает тормозной момент в центре давления относительно серийного тормозного механизма на 29,7 %, а коэффициенты стабильности и колебаний тормозного момента данного устройства возрастают соответственно на 14,1 и 3,6 %.

Ключевые слова: дисково-колодочный тормоз, тормозной момент, стабильность, эффективность, энергоемкость, прижимающий механизм, прижимающий элемент, структурно-параметрический синтез.

Для цитирования: Поляков, П. А. Методика проектирования силовых устройств дисково-колодочного типа на основе структурно-параметрического синтеза / П. А. Поляков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 32–43. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_32.

Введение

Одним из родоначальников отечественной школы разработки проектных расчетов тормозных механизмов является М. П. Александров. В своих работах [1, 2] он изложил последовательность и особенности расчетов тормозных устройств различных типов, которые применяются в настоящее время при создании и оценке эксплуатационных свойств тормозных механизмов различной отраслевой направленности. Согласно двум научным трудам зависимость для определения тормозного момента базируется на среднем радиусе рабочих поверхностей тормозного диска. А. В. Чичинадзе [3] предложил корректирующие коэффициенты для определения радиуса приложения прижимающей силы. Корректирующие коэффициенты базируются на соотношении внешнего и внутреннего радиусов тормозной колодки. К сожалению, данная коррекция методики расчета не учитывает поливариантные прижимающие механизмы. В диссертационной работе [4] разработана математическая модель определения момента трения, действующего в паре «тормозной диск – фрикционная накладка» железнодорожного состава (рис. 1). Момент трения определяется из среднего значения тормозного момента:

$$M_{\text{ср}} = f[p]r_{\text{ср}} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{\Theta} \rho d\rho d\Theta = f[p]\pi(r_2^2 - r_1^2)\chi r_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где $[p]$ – среднее удельное контактное давление в паре «тормозной диск – фрикционная накладка», МПа; r_2 , r_1 , $r_{\text{ср}}$ – внешний, внутренний и средний радиусы тормозного диска, м; χ – соотношение ширины фрикционной накладки к ширине кольца тормозного диска.

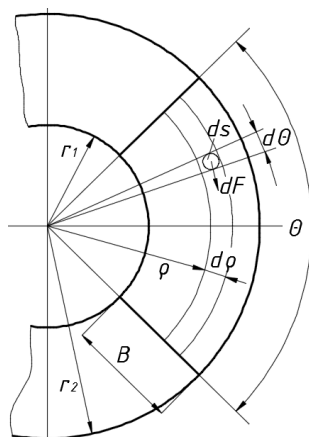


Рис. 1. Математическая модель определения момента трения, действующего в паре «тормозной диск – фрикционная накладка» железнодорожного состава

Согласно полученной формуле (1) при замене контактного давления на единичную силу момент трения определяется из следующей зависимости:

$$M_{\text{тр}} = \frac{2}{3} f P \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (2)$$

где P – сила давления на площадку трения, Н.

Предложенная зависимость (2) базируется на соотношении геометрических размеров тормозных колодок, не учитывая того, что в паре «тормозной диск – фрикционная накладка» подвижного состава на тормозную колодку оказывают воздействие два прижимающих элемента.

Помимо эксплуатационных характеристик тормоза отдельным видом расчетов является тепловой расчет фрикционных узлов, занимающий нишу проверочного расчета. В работе [5] основное внимание смещено на распределение температурных полей, без учета процесса теплоотдачи от нагретых поверхностей. Из множества проанализированных источников можно сделать вывод, что определение температурных полей не имеет связи с расчетом штатных узлов охлаждения. В работе [6] предложен метод проектирования тормозных механизмов дисково-колодочного типа, базирующегося на методах структурно-параметрического синтеза и геометрического программирования, в котором решалась обратная задача – определение конструктивных параметров из эксплуатационных характеристик тормоза. Недостатком этого расчета является тот факт, что заданный тормозной момент может реализовываться различными тормозными устройствами дисково-колодочного типа с разнообразными компоновками прижимающих элементов.

Как показано выше, перечисленные источники исследуют проблематику проектирования тормозных механизмов дисково-колодочного типа. В результате анализа нормативных литературных источников можно сделать вывод, что определение основной характеристики силовых устройств дисково-колодочного типа базируется на распределенном давлении между взаимодействующими площадками, сосредоточенная сила которого расположена в середине ширины тормозного диска. Данная методика не отражает эксплуатационные параметры тормозных устройств с моноприжимающим элементом, тогда как устройства с полиприжимающими элементами вообще не имеет соответствующей методики расчета.

Тормозные механизмы вне зависимости от отрасли являются основным компонентом системы активной безопасности, что должно стимулировать разработчиков проявлять при создании этих устройств повышенную точность в расчетах. Помимо указанного пробела в разрабатываемых методиках необходимо связывать параметры эффективности, стабильности и энергоемкости тормозных устройств. Энергоемкость – это параметр, который пропорционально зависит от развиваемого тормозного момента проектируемого тормоза. Генерируемое на рабочих поверхностях тормозного механизма тепло должно в сжатые сроки максимально рассеиваться во внешнюю среду, что предопределяет разработку регламентов выбора узла и режима охлаждения тормозного диска.

На основании проведенного критического анализа литературных источников и формулирования основных задач при проектировании тормозных механизмов необходимо разработать алгоритм методики проектирования (рис. 2).



Рис. 2. Алгоритм методики проектирования тормозных механизмов дисково-колодочного типа

В качестве исходных данных для методики проектирования будут выступать следующие параметры: давление в приводе p_v (для тормозного механизма непосредственного воздействия) или давление с учетом передаточного числа U_{pn} (для прижимающего механизма с рычажной передачей), наружный диаметр тормозного диска D , угол обхвата фрикционной накладкой рабочей поверхности диска Θ и диаметр ступицы $d_{ст}$, угловая скорость ω , коэффициент трения фрикционной накладки f .

Дальнейшим шагом проектирования является проверка параметров прижимающих элементов механизма из условий применимости:

$$\begin{cases} d_{пз} \leq B - 2n_{пз} \delta_{ст}, \\ n_{пз} d_{пз} \leq \frac{\pi\Theta}{720} (D + d_{ст}) - 2n_{пз} \delta_{ст}, \\ B - (m_{пз} d_{пз} + 2n_{пз} \delta_{ст}) \leq d_{пз}, \\ l_{ск} \leq d_{пз} / 2, \end{cases} \quad (3)$$

где $d_{пз}$ – диаметр прижимающего элемента, м; B – ширина рабочей поверхности тормозного диска; $n_{пз}$ – количество прижимающих элементов; $\delta_{ст}$ – толщина стенки между прижимающими элементами, м; $m_{пз}$ – количество рядов прижимающих элементов, $l_{ск}$ – длина свободного края тормозной колодки, м.

Первое условие определяет габаритные размеры прижимающего элемента в соответствии с шириной рабочей поверхности тормозного диска. Второе условие предписывает расположение и количество прижимающих элементов, которое должно быть меньше, чем длина фрикционной накладки. Третье условие включает в себе ограничение на расстояние между прижимающими элементами в радиальном направлении, которое не может быть больше диаметра прижимающего элемента. Четвертое условие определяет величину свободного края фрикционной накладки относительно габаритов прижимающего элемента.

Используя условия применимости, можно варьировать конструктивными параметрами прижимающего механизма тормозного устройства до однозначного их применения. Примеры размещения прижимающих элементов представлены на рис. 3, а, б.

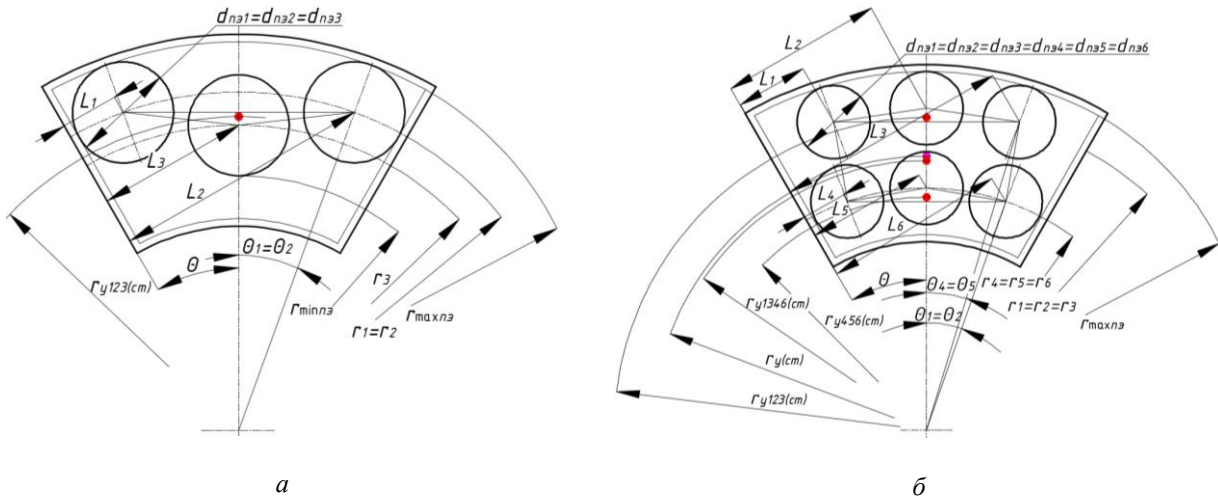


Рис. 3. Примеры размещения прижимающих элементов на тормозной колодке: с тремя (а) и с шестью (б) прижимающими элементами; L_i – расстояние от края колодки до центра i -го прижимающего элемента; r_i – радиус от оси вращения до центра i -го прижимающего элемента; Θ_i – угол между осью симметрии колодки и центром i -го прижимающего элемента; $r_{\max ш}$, $r_{\min ш}$ – радиусы от оси вращения диска до наиболее и наименее удаленного прижимающего элемента; $r_{y(ст)}$ – радиус от оси вращения диска до статического положения центра давления

Следующим шагом необходимо определить положение центра давления в системе «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск» – в радиальном направлении:

для прижимающего механизма
непосредственного действия:

$$r_y = \frac{\left[f \sum_{i=1}^n P_i r_i + J_d \dot{\omega} + J_{к1} \ddot{\phi}_1 + J_{к2} \ddot{\phi}_2 - mg \left(\frac{r_{\text{внеш}} - r_{\text{вн}}}{2} \right) \right] \cos \left[\frac{\Theta}{2} \right]}{f \sum_{i=1}^n P_i \cos \left[\frac{\Theta_i}{2} \right]}, \quad (4)$$

для прижимающего механизма
с передаточным механизмом:

$$r_y = \frac{\left[f_{ш} \sum_{i=1}^n P_i r_i + J_d \varepsilon + J_{к1} \ddot{\phi}_1 + J_{к2} \ddot{\phi}_2 + mg \left(\frac{r_{\text{внеш}} - r_{\text{вн}}}{2} \right) \right] \cos \left[\frac{\Theta}{2} \right]}{f_{ш} \sum_{i=1}^n P_i}, \quad (5)$$

– в тангенциальном направлении:

для прижимающего механизма
непосредственного действия:

$$L_A = \frac{\left[\sum_{i=1}^n P_i L_i + J_d \dot{\omega} + J_{к1} \ddot{\phi}_1 + J_{к2} \ddot{\phi}_2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_i + m \ddot{x} \right)}{(1 + f_c f)} f t_o \right] (1 + f_c f)}{\sum_{i=1}^n P_i + f_c f m \ddot{x}}, \quad (6)$$

для прижимающего механизма
с передаточным механизмом:

$$L_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i L_i + J_d \dot{\omega} + J_{к1} \ddot{\phi}_1 + J_{к2} \ddot{\phi}_2 + f t_o \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (7)$$

где P_i – прижимающая сила i -го элемента, Н; J_d , $J_{к1}$, $J_{к2}$ – момент инерции тормозного диска, первой и второй тормозных колодок, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; ϕ_1 , ϕ_2 – угловое перемещение первой и второй колодок, град.; m – масса колодки, кг; x – поперечное перемещение тормозных колодок, м; $r_{\text{внеш}}$, $r_{\text{вн}}$ – внешний и внутренний радиусы тормозной колодки, м; $f_{ш}$, f_c – коэффициент трения в шарнире клещевого механизма, в суппорте тормозного механизма; t_o – плечо шарнира или суппорта прижимающего механизма, м.

В дальнейшем для оценки параметров стабильности тормозного механизма необходимо определить максимальное $M_{T\max}$, минимальное $M_{T\min}$ значение тормозного момента и тормозной момент в положении центра давления $M_{T\text{ПЦД}}$:

$$M_{T\max} = \frac{\pi f p \Theta (D^2 - d_{\text{ст}}^2)}{1440} r_{\max \text{пз}}, \quad (8)$$

$$M_{T\min} = \frac{\pi f p \Theta (D^2 - d_{\text{ст}}^2)}{1440} r_{\min \text{пз}}, \quad (9)$$

$$M_{T\text{ПЦД}} = \frac{\pi f p \Theta (D^2 - d_{\text{ст}}^2) r_y}{1440}. \quad (10)$$

После определения значений тормозных моментов необходимо найти величины коэффициентов стабильности и колебания тормозного момента и коэффициента эффективности торможения:

$$K_{\text{ст}} = \frac{M_{T\text{ПЦД}}}{M_{T\max}}, \quad (11)$$

$$K_{\text{пзм}} = \frac{M_{T\min}}{M_{T\max}}, \quad (12)$$

$$\beta_{\text{эф}} = \frac{K_{\text{ст}}}{\tau_T^2}. \quad (13)$$

Для оценки параметров энергоемкости тормозных механизмов необходим расчет генерируемого теплового потока на рабочих поверхностях силового устройства:

$$q_{\Gamma} = M_{T\text{ПЦД}} \omega. \quad (14)$$

Температура в контакте фрикционного узла силового устройства определяется из зависимости:

$$T_{\text{рп}} = T_0 + \frac{2\sqrt{\tau_T} \sigma_{\text{тм}} f p A_{\text{фн}} \omega r_y}{\sqrt{\pi} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}, \quad (15)$$

где T_0 – температура внешней среды, К; $\sigma_{\text{тм}}$ – коэффициент распределения тепловых потоков в тормозном механизме; $A_{\text{фн}}$ – площадь фрикционной накладке, м²; λ_1 – коэффициент теплопроводности тормозного диска, Вт/(м·К); c_1 – теплоемкость тормозного диска, Вт/(м·К); ρ_1 – плотность тормозного диска, кг/м³.

Величина энергоемкости тормозного механизма дисково-колодочного тормозного механизма определяется из зависимости:

$$E_T = \frac{q_{\Gamma}}{T_T}. \quad (16)$$

В дальнейшем необходимо задаться количеством и временем циклов нагрева и охлаждения для определения величин остаточной температуры на рабочей поверхности тормозного диска:

$$T_T = e^{\frac{-K_1 F_0}{\tau_0 a}} (T - T_0) + T_0, \quad (17)$$

где K_1 – коэффициент теплопередачи от рабочих поверхностей диска во внешнюю среду, Вт/(м·К); τ_0 – время охлаждения за один цикл, с; F_0 – критерий Фурье; a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Для расчета теплообменных параметров от поверхностей тормозного диска необходимо учесть многослойность тепловой модели «вентилируемый тормозной диск – внешняя среда» (рис. 4).

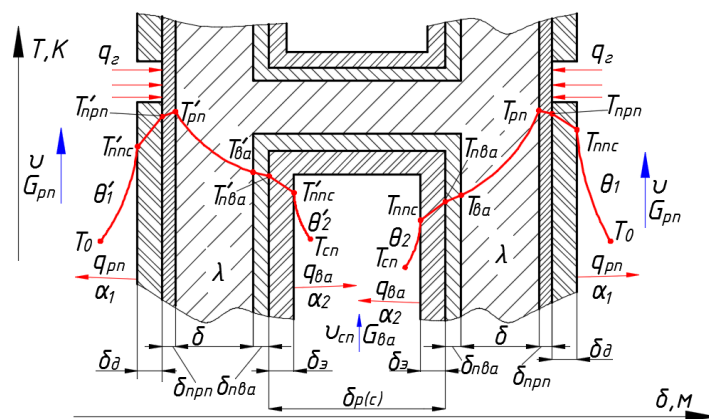


Рис. 4. Тепловая модель «вентилируемый тормозной диск – внешняя среда»:

$T_{пнс}$, $T'_{пнс}$ – температуры на границы пограничного слоя и внешней среды; $T_{рп}$, $T'_{рп}$ – температуры на границе тела тормозного диска и приповерхностных слоев рабочих поверхностей; $T_{ва}$, $T'_{ва}$ – температуры на границе тела диска и приповерхностных слоев вентиляционного аппарата; $T_{прп}$, $T'_{прп}$ – температуры на границе приповерхностных слоев рабочих поверхностей и пограничного слоя воздушного потока; $T_{пва}$, $T'_{пва}$ – температуры на границе приповерхностных слоев вентиляционного аппарата и пограничного слоя воздушного потока; T_0 – температура внешней среды, обтекающей рабочие поверхности диска; $T_{сн}$ – температура внешней среды внутри узла охлаждения; θ_1 , θ'_1 – перепады температур от рабочих поверхностей диска; θ_2 , θ'_2 – перепады температур от нерабочих поверхностей; δ_d – толщина пограничного слоя воздушного потока, обтекающего рабочие поверхности; $\delta_{прп}$ – толщина приповерхностных слоев рабочих поверхностей; δ – толщина тела металлического элемента; $\delta_{пва}$ – толщина приповерхностных слоев поверхностей вентиляционного аппарата; $\delta_з$ – толщина пограничного слоя воздушного потока, обтекающего нерабочие поверхности; $q_{рп}$ – тепловой поток от рабочих поверхностей; $q_{ва}$ – тепловой поток от нерабочих поверхностей; α_1 , α_2 – коэффициент теплоотдачи от рабочих и нерабочих поверхностей; v , $v_{сн}$ – продольные скорости потока воздуха, омывающего рабочие и нерабочие поверхности; $G_{рп}$ – расход потока воздуха, омывающего рабочие поверхности; $G_{ва}$ – расход потока воздуха, омывающего нерабочие поверхности

Из условия многослойности тепловой модели тормозного диска коэффициент теплопередачи будет определяться из зависимости:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{\pi}{360} \left(\frac{2B}{\lambda} [360 - \Theta] + \frac{\delta_d}{\lambda_{п}} \right) + \frac{1}{\alpha_1}}. \quad (18)$$

где $\lambda_{п}$ – коэффициент теплопроводности пограничного слоя воздушного потока, омывающего рабочие поверхности тормозного диска, Вт/(м·К).

Коэффициент теплоотдачи будет выбираться из номограммы [7] в зависимости от температуры внешней среды и скорости свободного потока воздуха.

Для определения величины температур $T_{ва}$ и $T'_{ва}$ необходимо определить величины θ_1 , θ'_1 , предварительно задавшись критерием Био и используя метод распределения температур по толщине [8].

Тепловой поток от поверхностей вентиляционного аппарата во внешнюю среду будет равен:

$$q_{ва} = q_{г} \theta_{г}. \quad (19)$$

Задавшись величиной площади элементов узла охлаждения $A_{зо}$, находим коэффициент теплоотдачи от нерабочих поверхностей по формуле:

$$\alpha_2 = \frac{q_{ва}}{A_{нп} \tau_o (T_{ва} - T_0)}, \quad (20)$$

где $A_{нп}$ – площадь нерабочих поверхностей тормозного диска, м².

Используя принцип многослойности тепловой модели, необходимо найти коэффициент теплопередачи от поверхностей вентиляционного аппарата:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} \left(\frac{2\pi B}{360} + A_{30} \right) + \frac{\delta_3}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (21)$$

Согласно полученным значениям K_2 , используя номограмму [7], определим величину скорости свободного потока внешней среды $v_{сп}$, протекающего через вентиляционный аппарат тормозного диска. Из значений скорости свободного потока внешней среды [9] необходимо определить коэффициент трения воздушного потока о поверхности вентиляционного аппарата $c_{сп}$.

Для выбора структуры и режима охлаждения определены основные критерии структурно-параметрического синтеза θ_T и $c_{сп}$. Диапазоны значений критериев, определяющих структуру и режим охлаждения, сведены в таблицы (табл. 1, 2). Данные диапазоны были получены в результате экспериментальных исследований.

Таблица 1

**Диапазоны коэффициента трения воздушного потока о поверхности
в зависимости от структуры вентиляционного аппарата**

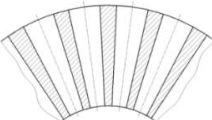
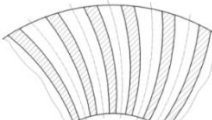
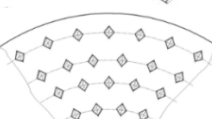
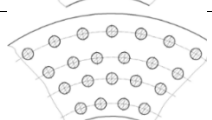

| Проектируемая структура | Иллюстрация | Диапазон коэффициента трения $c_{сп}$ |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Вентиляционный аппарат с радиальными вентиляционными каналами |  | $c_{сп} = 0,0065-0,00887$ |
| Вентиляционный аппарат с криволинейными вентиляционными каналами |  | $c_{сп} = 0,0089-0,0108$ |
| Вентиляционный аппарат с призматическими сегментами |  | $c_{сп} = 0,0109-0,0126$ |
| Вентиляционный аппарат с цилиндрическими сегментами |  | $c_{сп} = 0,0127-0,0155$ |
| Вентиляционный аппарат с сегментами «лапка кенгуру» |  | $c_{сп} = 0,0156-0,021$ |

Таблица 2

**Диапазоны перепада температур между рабочими и нерабочими поверхностями
тормозного диска**

| Режим охлаждения | Узел охлаждения | Перепад температур по толщине тормозного диска θ_T после 5 с охлаждения |
|------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Вынужденный | Штатный вентиляционный аппарат | от 0,01 до 0,55 |
| Принудительный | Устанавливаемая система охлаждения | 0,55 и более |

Выражения для расчета количества элементов тормозного диска в зависимости от структуры узла охлаждения и заданной толщины элемента охлаждения $\delta_{p(c)}$ сведены в таблицу (табл. 3).

Для расчета устанавливаемой системы охлаждения необходимо в качестве исходных данных ввести параметр входного давления $p_{вх}$ и угол атаки воздушного потока $\alpha_в$.

Параметрами эффективности узла охлаждения являются расход воздуха, протекающего через узел охлаждения, $G_{вар(вас)}$, коэффициент аэродинамического сопротивления ребер (сегментов) C_y , коэффициент смены направления потока омывающего воздуха C_x .

Таблица 3

**Зависимости для расчета количества элементов охлаждения тормозного диска
в зависимости от структуры узла охлаждения**

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| – с радиальными вентиляционными каналами | с криволинейными вентиляционными каналами |
| $n_p = \frac{A_{э0}}{B\delta_p}$ | $n_p = \frac{A_{э0}}{l\delta_p},$ где l – длина криволинейного ребра, м |
| с призматическими сегментами | с цилиндрическими сегментами |
| $n_c = \frac{A_{э0}}{4B_c\delta_c},$ где B_c – ширина грани призматического сегмента, м | $n_c = \frac{A_{э0}}{\pi r_c^2},$ где r_c – радиус цилиндрического сегмента, м |
| с сегментами «лапка кенгуру» | |
| $n_c = \frac{A_{э0}}{A_c},$ где A_c – боковая площадь сегмента, м | |

Расход воздуха, протекающего через вентиляционный аппарат, рассчитывается по формулам:
– для оребренного вентиляционного аппарата

$$G_{\text{вар}} = n_{\text{в}} \sqrt{\frac{0,0342 p_{\text{вх}} B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}{\zeta \frac{p_{\text{вх}}}{2RT_0 \left(\frac{\{\pi D - nB_p\} \delta_p}{n} \right)^2} + C_{\text{сп}} \frac{p_{\text{вых}}}{2RT_0 \left(\frac{\{\pi D - nB_p\} \delta_p}{n} \right)^2}}}; \quad (22)$$

– для сегментарного вентиляционного аппарата

$$G_{\text{вас}} = n_{\text{в}} \sqrt{\frac{0,0342 p_{\text{вх}} l_c \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}{\zeta \frac{p_{\text{вх}}}{2RT_0 \left(\frac{\{\pi D - nB_c\} \delta_c}{n} \right)^2} + C_{\text{сп}} \frac{p_{\text{вых}}}{2RT_0 \left(\frac{\{\pi D - nB_c\} \delta_c}{n} \right)^2}}}, \quad (23)$$

где $p_{\text{вых}}$ – давление воздуха на выходе из вентиляционного аппарата, МПа;
 $n_{\text{в}}$ – количество каналов воздухоподачи;
 R – газовая постоянная.

Для примера был проведен расчет эксплуатационных параметров дисково-колодочного типа грузового автомобиля серийного (с одним прижимающим элементом) и предлагаемых (с 2, 3, 4, 5 и 6 прижимающими элементами) силовых устройств (табл. 4). В качестве исходных данных задавались идентичные конструктивные и эксплуатационные параметры: $D = 0,43$ м; $d_{\text{ст}} = 0,17$ м; $B = 0,13$ м; $\delta = 0,012$ м; $\Theta = 90$ град.; $p_{\text{в}} = 0,92$ МПа; $f = 0,3$; $\sigma_{\text{тм}} = 0,96$; $v = 8$ м/с; $\tau_{\text{T1}} = 0,85$ с; $\tau_{\text{o1}} = 0,54$ с; $\tau_{\text{T2}} = 0,92$ с; $\tau_{\text{o2}} = 0,72$ с; $\tau_{\text{T3}} = 1,33$ с; $\tau_{\text{o3}} = 0,88$ с; $\tau_{\text{T4}} = 1,49$ с; $\tau_{\text{o4}} = 0,95$ с; $\tau_{\text{T5}} = 1,73$ с; $\tau_{\text{o5}} = 1,02$ с; $F_0 = 0,4$; $T_0 = 293$ К; $Bi = 2$; $A_{\text{рп}}/A_{\text{э0}} = 0,7$; $\alpha_1 = 46,4$ Вт/(м²К); $\delta_{\text{р(с)}} = 0,017$ м; $\alpha_{\text{в}} = 10$ град.; $\psi_i = [0-34]$ град. В качестве изменяемых параметров выступал диаметр прижимающего элемента: для серийного силового устройства $d_{\text{пэ1}} = 0,071$ м, и для предлагаемых силовых устройств $d_{\text{пэ2}} = d_{\text{пэ3}} = 0,071$ м; $d_{\text{пэ4}} = d_{\text{пэ5}} = d_{\text{пэ6}} = 0,027$ м.

Результаты расчетов параметров стабильности, эффективности и энергоемкости тормозных механизмов дисково-колодочного типа сведены в таблицу (табл. 4).

Таблица 4

Результаты расчетов параметров стабильности, эффективности и энергоемкости тормозных механизмов дисково-колодочного типа грузового автомобиля

| Результаты расчетов | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|---------------------------------------------------------------------|----------|----------|
| <i>расчет эксплуатационных параметров рабочих параметров</i> | | | | | | |
| Параметры | (серийный) | (предлагаемый) | | | | |
| | с одним* прижимающим элементом | с 2* | с 3* | с 4* | с 5* | с 6* |
| $d_{пз}$, м | 0,071** | 0,071 | 0,071 | 0,027 | 0,027 | 0,027 |
| $\max M_T$, Нм | 1520 | 1732,5 | | | | |
| $\min M_T$, Нм | 934,9 | 1103,2 | 988,8 | не выполняется условие размещения прижимающих элементов | 923,5 | 773,1 |
| $M_{ПЩД}$, Нм | 868,6 | 1126,9 | 1097,5 | | 1066,8 | 976,6 |
| r_y , м | 0,106 | 0,138 | 0,134 | | 0,131 | 0,119 |
| q_T , Вт | 36224,2 | 46992,8 | 45765 | | 44 484,8 | 40 725,9 |
| T , К | 869,1 | 1046,4 | 1026,1 | | 1005 | 943,2 |
| T_T , К | 749,9 | 891,6 | 875,5 | | 858,6 | 809,1 |
| E_T , Вт/К | 48,3 | 52,7 | 52,3 | | 51,8 | 50,3 |
| $L_A - L/2$, м | 0,0906 | 0,081 | 0,0904 | | 0,0909 | 0,0948 |
| $K_{ст}$ | 0,57 | 0,65 | 0,633 | | 0,615 | 0,563 |
| $K_{КТМ}$ | 0,615 | 0,637 | 0,57 | | 0,533 | 0,446 |
| $\beta_{эф}$ | 0,0052 | 0,006 | 0,0058 | | 0,0056 | 0,0052 |
| K_1 , Вт/(м ² К) | 5,122 | | | | | |
| <i>расчет параметров эффективности узлов охлаждения</i> | | | | | | |
| θ_T | 0,628 | | | | | |
| $T_{ва}$, К | 572,2 | 661,2 | 651,1 | – | 640,5 | 609,4 |
| $q_{ва}$, Вт | 22731,4 | 29488,9 | 28718,5 | – | 27 915,1 | 25 556,3 |
| α_2 , Вт/(м ² ·К) | 372,18 | | | | | |
| K_2 , Вт/(м ² ·К) | 44,6 | | | | | |
| $v_{сп}$, м/с | 11 | | | | | |
| $C_{сп}$ | 0,0138 | | | | | |
| n_p | 51 | | | | | |
| $p_{вх}$, МПа | 0,2 | | | | | |
| Структура вентиляционного аппарата | вентиляционный аппарат с цилиндрическими сегментами принудительное охлаждение | | | | | |
| $G_{вар}$, м ³ /с | 0,000082 | | | | | |
| C_x | от 1006 до 85695,1 | | | | | |
| C_y | от 100,6 до 1947,6 | | | | | |

* – количество прижимающих элементов указано с учетом только одной стороны рабочих поверхностей диска;

** – диаметр прижимающих элементов принят на основании параметров серийного транспортного средства.

Согласно проведенным расчетам пять вариантов расположения прижимающих элементов силовых устройств дисково-колодочного типа соответствовали условиям размещения. Лишь тормозное устройство с четырьмя прижимающими элементами не выполняло условия размещения. Для максимизации величин тормозного момента тормоза все прижимающие элементы предлагаемых силовых устройств были расположены как можно ближе к периферии тормозного диска, что подтверждает максимальное значение тормозного момента $M_{T\max} = 1732,5$ Нм.

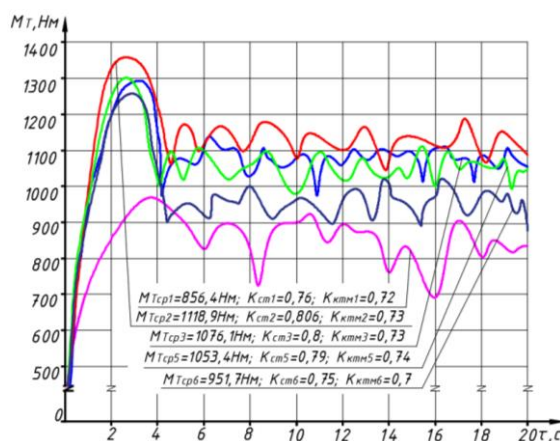
Анализ выполненных расчетов выявил, что наилучшие показатели стабильности, эффективности и энергоемкости достигаются тормозными механизмами дисково-колодочного типа с двумя прижимающими элементами. Увеличение тормозного момента в центре давления силового устройства с двумя прижимающими элементами относительно серийного тормозного механизма составило 29,7 %. Коэффициенты стабильности и колебаний тормозного момента силового устройства с двумя прижимающими элементами увеличились относительно моноприжимающего тормозного механизма соответственно на 14,1 и 3,6 %.

В качестве структуры узла охлаждения согласно структурно-параметрическому методу был выбран вентиляционный аппарат с цилиндрическими сегментами, работающий при принудительном режиме охлаждения.

Для верификации методики проектирования были проведены испытания тормозных механизмов дисково-колодочного типа с единой тормозной колодкой и различным количеством прижимающих элементов: с двумя, тремя, пятью и шестью полиприжимающими элементами (рис. 5, а, б).



а



б

Рис. 5. Общий вид испытательного стенда (а) и результаты испытаний (б) тормозных моментов серийных и предлагаемых прижимающих элементов тормозных механизмов дисково-колодочного типа в зависимости от количества прижимающих элементов (с одним, двумя, тремя, пятью и шестью прижимающими элементами)

Средние величины тормозных моментов в зоне стабилизации (после 4-й с) имеют следующие значения для соответствующего количества прижимающих элементов: $M_{Tcp1} = 856,4$ Нм; $M_{Tcp2} = 1118,9$ Нм; $M_{Tcp3} = 1076,1$ Нм; $M_{Tcp5} = 1053,4$ Нм; $M_{Tcp6} = 951,7$ Нм. Отклонения от расчетных значений тормозных моментов в положении центра давления тормозных механизмов силовых устройств дисково-колодочного типа, полученных на основании разработанной методики, в среднем составили 1,6 %. В то же время коэффициенты стабильности и колебания тормозного момента, полученные в результате экспериментального исследования, увеличены по сравнению с полученными по методике проектирования результатами. Отклонение по коэффициентам стабильности в среднем для пяти вариантов силовых устройств составило 22,5 %, а по коэффициентам колебаний – 22,7 %. Но при увеличенных значениях отклонений коэффициентов тормозного момента результаты эксперимента повторяют тенденцию расчетных данных, а именно: наибольшие значения критериев оценки стабильности при торможении достигались с помощью двух прижимающих элементов силовых устройств.

Максимальное значение коэффициента стабильности было отмечено у силового устройства с двумя прижимающими элементами: оно на 6 % больше, чем у серийного тормозного механизма; на 0,75 %, чем у силового устройства с тремя прижимающими элементами; на 2 %, чем у силового устройства с пятью элементами; на 7,5 %, чем у тормозного устройства с шестью элементами.

Заключение

Разработанная методика проектирования позволяет оценивать эксплуатационные параметры стабильности, эффективности и энергоемкости проектируемых и эксплуатируемых тормозных устройств дисково-колодочного типа с различными прижимающими механизмами. Отличительной особенностью разработанной методики в сравнении с известными методами расчета является учет ко-

личества, размеров и геометрии размещения прижимающих элементов тормозного устройства. Выполненные согласно предложенной методике расчеты эксплуатационных параметров тормозных устройств с полиприжимающими элементами приводят к выводу о большей эффективности и стабильности тормозного механизма с двумя прижимающими элементами, нежели серийного механизма и предложенных альтернатив с одинаковыми геометрическими параметрами тормозного диска и колодок. Другой особенностью методики является связь между эксплуатационными параметрами тормоза и теплоотдающей способностью узла охлаждения устройства. Расчет температурного поля и способности теплопередачи от нагретых поверхностей механизма внешней среде базируется на методах определения остаточной температуры, распределения температурных полей по толщине диска и разработанной многослойной тепловой модели «вентилируемый тормозной диск – внешняя среда».

Список литературы

- 1 Тормозные устройства : справочник / М. П. Александров, А. Г. Лысяков, В. Н. Федосеев, М. В. Новожилов ; под общей редакцией М. П. Александрова. – Москва : Машиностроение, 1985. – 312 с.
- 2 **РТМ 24.090.19-76** Машины подъемно-транспортные, тормоза механические. Методы расчета. – Москва : НИИинформтяжмаш, 1976. – 51 с.
- 3 **Чичинадзе, А. В.** Расчет и исследование внешнего трения при торможении / А. В. Чичинадзе // Гос. науч.-исслед. ин-т машиноведения. – Москва : Наука, 1967. – 231 с.
- 4 **Мошков, А. А.** Разработка рациональной конструкции блока дискового тормоза для скоростных грузовых и высокоскоростных пассажирских вагонов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Мошков Алексей Александрович. – Москва, 2014. – 217 с.
- 5 Повышение эффективности торможения автотранспортных средств с пневматическим тормозным приводом / А. Н. Туренко, В. А. Богомолов, В. И. Клименко, В. И. Кирчатый. – Харьков : Изд-во ХНАДТУ, 2000. – 472 с.
- 6 **Поляков, П. А.** Метод проектирования тормозного механизма дисково-колодочного типа с использованием структурно-параметрического синтеза тормозного механизма / П. А. Поляков // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 12. – С. 547–555. – DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-12-547-555.
- 7 **Поляков, П. А.** Методика проектирования тормозного механизма барабанно-колодочного типа / П. А. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 8. – С. 334–342. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-8-334-343.
- 8 **Поляков, П. А.** Распределение температурного поля по толщине тормозного диска / П. А. Поляков // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 11. – С. 506–512. – DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-11-506-512.

References

- 1 Braking devices : a handbook / M. P. Alexandrov, A. G. Lysyakov, V. N. Fedoseev, M. V. Novozhilov; under the general editorship of M. P. Alexandrov. – Moscow : Mashinostroenie, 1985. – 312 p.
- 2 **RTM 24.090.19-76** Lifting and transport machines, mechanical brakes. Calculation methods. – Moscow : NIInformtyazhmash, 1976. – 51 p.
- 3 **Chichinadze, A. V.** Calculation and study of external friction during braking / A. V. Chichinadze // State Scientific Research institute of machine science. – Moscow : Nauka, 1967. – 231 p.
- 4 **Moshkov, A. A.** Development of a rational design of the disc brake block for high-speed freight and high-speed passenger cars: dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 05.22.07 / Moshkov Alexey Alexandrovich. – Moscow, 2014. – 217 p.
- 5 Improving the braking efficiency of autotransport vehicles with pneumatic braking device / A. N. Turenko, V. A. Bogomolov, V. I. Klimenko, V. I. Kirchaty. – Kharkov : Publishing House of KHNADTU, 2000. – 472 p.
- 6 **Polyakov, P. A.** Method of designing a disc-pad brake mechanism using structural-parametric synthesis of a brake mechanism / P. A. Polyakov // Assembling in mechanical engineering, instrument-making. – 2021. – No. 12. – P. 547–555. – DOI 10.36652/02-3350-2021-22-12-547-555.
- 7 **Polyakov, P. A.** Method of designing a drum-and-pad type brake mechanism / P. A. Polyakov // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. – 2022. – No. 8. – P. 334–342. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-8-334-343.
- 8 **Polyakov, P. A.** The distribution of the temperature field along the thickness of the brake disc / P. A. Polyakov // Assembling in mechanical engineering, instrument-making. – 2021. – No. 11. – P. 506–512. – DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-11-506-512.

9 Поляков, П. А. Связь между режимом протекания воздушного потока и теплоотдачей от поверхностей вентиляционного аппарата тормозного диска / П. А. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 8. – С. 184–190. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-8-184-190.

9 Polyakov, P. A. The connection between the regime of air flow and heat transfer from the surfaces of the ventilation apparatus of the brake disc / P. A. Polyakov // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. – 2021. – No. 8. – P. 184–190. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-8-184-190.

P. A. Polyakov

METHOD OF DESIGNING DISK-BLOCK TYPE POWER DEVICES BASED ON STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS

Abstract. The developed design methodology makes it possible to evaluate the operational parameters of stability, efficiency and energy intensity of newly designed and operated disc-pad type braking devices with various clamping mechanisms. A distinctive feature of the developed methodology is the consideration of the number, size and geometry of the placement of the clamping elements of the braking device, in contrast to previously known calculation methods. The performed calculations of the operational parameters of braking devices with poly-clamping elements, according to the proposed methodology, made it possible to conclude that the brake mechanism with two clamping elements has greater efficiency and stability than the serial mechanism and the proposed alternatives with the same geometric parameters of the brake disc and pads. Another feature of the technique is the relationship between the operating parameters of the brake and the heat transfer capacity of the cooling unit of the device. The calculation of the temperature field and the ability of heat transfer from heated surfaces to the external environment is based on the method of determining the residual temperature, the distribution of temperature fields over the thickness of the disc and the developed multilayer thermal model "ventilated brake disc – external environment". As a result of calculations, the power device with two clamping elements has an increased braking torque in the center of pressure relative to the serial brake mechanism by 29.7%. The coefficients of stability and oscillations of the braking torque of a power device with two clamping elements increased relative to the mono-clamping brake mechanism by 14.1% and 3.6%, respectively.

Keywords: disc-pad brake, braking torque, stability, efficiency, energy intensity, clamping mechanism, clamping element, structural-parametric synthesis.

For citation: Polyakov, P. A. Method of designing disk-block type power devices based on structural-parametric synthesis / P. A. Polyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 32–43. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_32.

Сведения об авторе

Поляков Павел Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Научно-производственный центр
«Охрана труда»,
ведущий научный сотрудник;

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
кафедра «Транспортные процессы
и технологические комплексы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

Information about the author

Polyakov Pavel Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Research and Production Center
«Labor Protection»,
Leading Researcher;

Kuban State Technological University (KubSTU),
Chair «Transport Processes
and Technological Complexes»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Аннотация. Как правило, зубошлифование является окончательным методом обработки всех более-менее точных зубчатых колес. Оно позволяет обеспечить высокую точность профиля зуба и сравнительно малую шероховатость, заданную чертежом. Его начинают использовать для изготовления закаленных зубчатых колес, начиная с 7 до 2 степени точности. В статье рассматриваются вопросы формирования шероховатости при выполнении шлифования зубьев, проведены расчеты влияния скорости резания и зернистости круга на критическую глубину проникновения и шероховатость поверхности, причем результаты проведенных расчетов представлены графическим материалом. Полученные зависимости проверены при проведении экспериментальных исследований и могут быть рекомендованы для прогнозирования шероховатости обработанной поверхности при зубошлифовании.

Ключевые слова: шероховатость, зубошлифовальный станок, шлифование зубьев, зернистость, скорость резания.

Для цитирования: Солдатов, А. Г. Исследование шероховатости при шлифовании зубчатых колес / А. Г. Солдатов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 44–48. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_44.

Введение

На процесс формирования шероховатости при выполнении шлифования зубьев шестерен оказывает влияние большое количество факторов. В работах различных исследователей этим факторам придается разное значение и формируются разные совокупности их величин для проведения теоретических расчетов параметров шероховатости обработанной поверхности. Однако большинство исследователей сходятся в том, что наибольшее влияние оказывают зернистость абразивного инструмента, физико-механические свойства обрабатываемого материала и режимы обработки [1, 2].

Процесс формирования шероховатости при шлифовании зубчатых колес

Как показано в работах [2–4] большую роль в процессе формирования шероховатости обработанной поверхности оказывает пластическая деформация металла заготовки. Высота наплыва металла над поверхностью по краям царапины может увеличивать высоту микронеровностей на 20–80 % в зависимости от радиуса скругления вершин зерен, припуска на обработку и предела текучести материала заготовки.

Для определения максимальной высоты наплыва h_n в работе [2] выведена зависимость:

$$h_n = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot a_z \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_3 \cdot a_z}}, \quad (1)$$

где a_z – глубина стружечной канавки, ρ_3 – радиус округления вершин зерен.

Расчеты по вышеприведенной формуле показывают, что максимальная высота наплыва всегда больше глубины царапины. Однако экспериментальные исследования показывают, что в реальных процессах стружкообразования высота наплывов уменьшается, так как некоторая часть образующего их металла удаляется с поверхности заготовки.

В результате анализа полученных теоретических зависимостей и экспериментальных данных авторами работы [2] получена формула (2) для определения критической глубины внедрения зерен в обрабатываемую поверхность:

$$a_z = \frac{p^{0,7} \cdot t}{0,023 \cdot V_k^{0,53} (1 - \sin \gamma_k)}, \quad (2)$$

где t – глубина резания при шлифовании с продольной подачей; $\gamma_k = (-60^\circ) \dots (-80^\circ)$ для условий чистового и получистового шлифования; V_k – скорость круга, м/с.

Учитывая, что максимальная величина глубины следа единичного зерна будет складываться из глубины царапины и максимальной высоты навала можно записать:

$$A_{max} = a_z + h_n. \quad (3)$$

При проведении теоретических расчетов радиус вершины зерна определяется по зависимости:

$$\rho = 0,13 \frac{d_0}{2} \cdot tg \frac{\varepsilon_{cp}}{2}, \quad (4)$$

где d_0 – размер зерна, ε_{cp} – относительная критическая глубина внедрения зерна.

Как показано в [2], приведенные зависимости прошли комплексную экспериментальную проверку и ими можно пользоваться при определении максимальной глубины следа единичного зерна.

Колебания элементов технологической системы, вызванные комплексом, увеличивают возможную глубину единичного следа зерна на величину a_k (амплитуда колебаний шлифовального круга). Тогда общая глубина следа единичного зерна может быть приведена в виде

$$B = a_z + h_n + a_k. \quad (5)$$

Большинство специалистов, изучающих процесс шлифования, отмечают сложность описания функции распределения вершины абразивных зерен над поверхностью круга, особенно в процессе резания. На это распределение оказывают большое влияние зернистость, структура круга, условия скалывания зерен и режимы обработки. В работе [3] введено понятие разновысотности активных зерен H_0 . Величина H_0 соответствует глубине залегания половины зерен, выступающих при измерении от вершины наиболее выступающего зерна.

Распределение выступающих вершин зерен может быть описано зависимостью:

$$z_i = 0.5z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k, \quad 0 \leq h_i \leq H_0, \quad (6)$$

где z_i – количество зерен на уровне h_i от наиболее выступающих вершин зерен; z_0 – номинальное число зерен на единице поверхности шлифовального круга; k – показатель распределения вершин зерен, который в зависимости от уровня скалывания вершин зерен находится в определенных пределах $1 \leq k \leq 3$.

Для получения адекватных теоретических зависимостей, достоверно отражающих процесс формирования шлифованной поверхности, необходимо построить геометрическую схему образования шероховатости обработанной поверхности. В работе [3] предложена геометрическая схема, представленная на рис. 1.

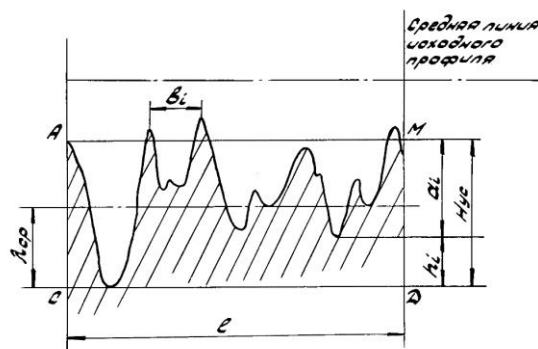


Рис. 1. Схема образования профиля шероховатости поверхности при шлифовании

Основным критерием описания процесса формирования шероховатости поверхности при выполнении шлифования был предложен параметр H_{yc} , получивший название «Условная высота шероховатости шлифуемой поверхности». Впадины профиля обработанной поверхности представляют собой нижнюю сторону наиболее заметных царапин зерна, а выпуклости образованы пересечением сторон отдельных царапин зерна. Пользуясь методикой, предложенной в работе [3], можно получить зависимость для определения величины условной высоты неровностей:

$$H_{yc} = H_0 \sqrt{\frac{L_{ед}}{0.32Bz_0}}, \quad (7)$$

где $L_{ед}$ – единичная длина.

В работах [3, 4] приводятся данные параметров R_a и H_{yc} , которые характеризуют вид эталонной кривой шероховатости поверхности, причем соотношение этих величин изменяется в пределах от 3,5 до 11. Возьмем среднее соотношение, равное 6, тогда среднеарифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности можно записать в виде:

$$Ra = \frac{H_0}{3.4} \sqrt{\frac{L_{ед}}{Bz_0}}. \quad (8)$$

Тогда после преобразований получаем:

$$Ra = 0.09 \sqrt{\frac{BL_{ед}}{z_0}}. \quad (9)$$

Пользуясь полученными зависимостями, можно рассчитать критическую глубину внедрения зерен в обрабатываемую поверхность и величину R_a обработанной поверхности при зубошлифовании без учета колебаний. Результаты проведенных расчетов графически представлены на рис. 2–5.

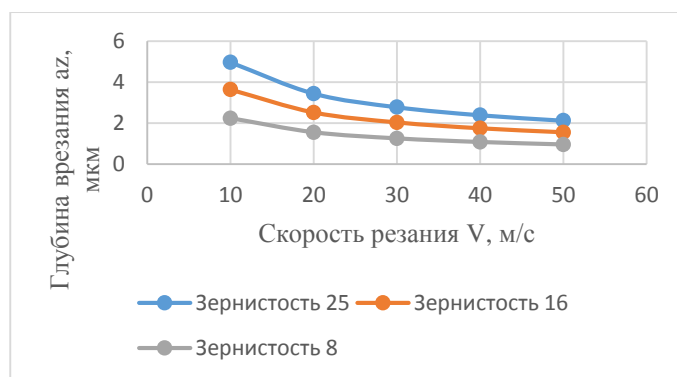


Рис. 2. Влияние скорости резания на критическую глубину проникновения

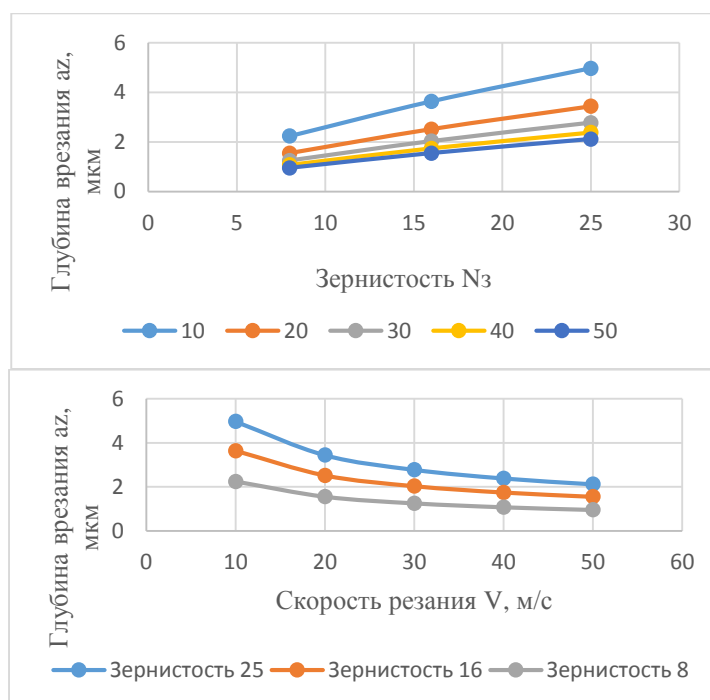


Рис. 3. Влияние размера зерна на критическую глубину проникновения

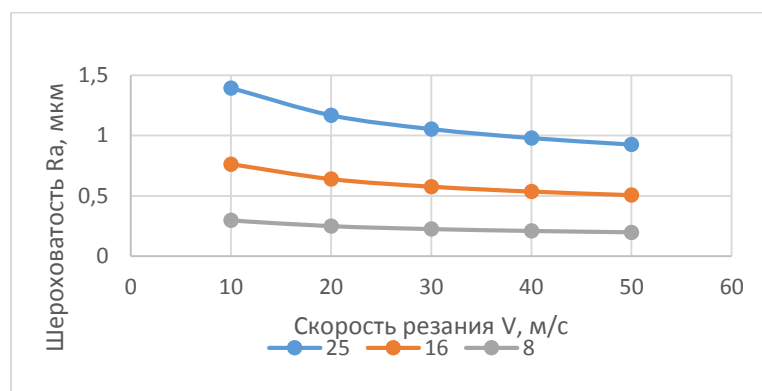


Рис. 4. Влияние скорости резания на шероховатость поверхности

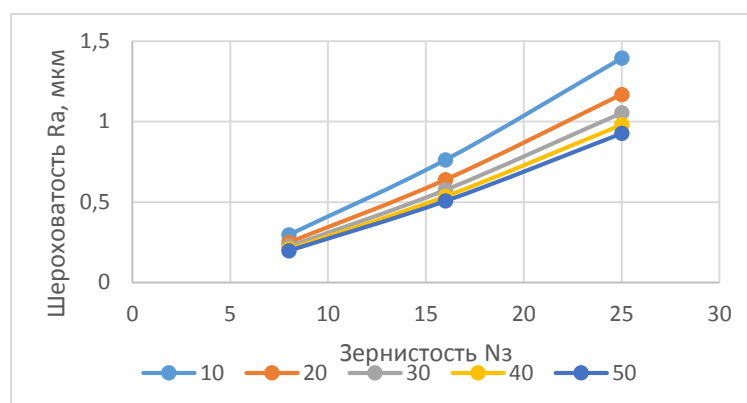


Рис. 5. Влияние зернистости круга на шероховатость поверхности

Заключение

Полученные зависимости будут проверены при проведении экспериментальных исследований и при доказательстве их адекватности могут быть рекомендованы для прогнозирования шероховатости обработанной поверхности при зубошлифовании.

Список литературы

- 1 Безопасность жизнедеятельности : учебное пособие / И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – 308 с. – ISSN 978-5-88814-843-3.
- 2 Методика расчета шероховатости поверхности при обработке абразивным инструментом из ШС материалов / Н. В. Носов, Р. Г. Гришин, Р. В. Ладыгин [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23. – № 3(101). – С. 73–76. – DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-3-73-76.
- 3 **Королев, А. В.** Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 1975. – 191 с.
- 4 **Королев, А. В.** Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 1989. – 320 с.

References

- 1 Life safety : textbook / I. G. Pereverzev, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov [et al.]. – 2-nd ed., rev. and add. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – 308 p. – ISSN 978-5-88814-843-3.
- 2 The method of calculating the surface roughness during processing with an abrasive tool made of SHS materials / N. V. Nosov, R. G. Grishin, R. V. Ladyagin [et al.] // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2021. – Vol. 23. – No. 3(101). – P. 73–76. – DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-3-73-76.
- 3 **Korolev, A. V.** Investigation of the processes of formation of surfaces of tools and parts during abrasive processing / A. V. Korolev. – Saratov : Publishing House of Saratov University, 1975. – 191 p.
- 4 **Korolev, A. V.** Theoretical and probabilistic foundations of abrasive processing / A. V. Korolev, Yu. K. Novoselov. – Saratov :

5 **Кремень, З. И.** Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабоскин. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 424 с.

6 **Филимонов, Л. Н.** Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Ленинград : Машиностроение, 1979. – 248 с.

7 **Ящерицын, П. И.** Чистовая обработка деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов. – Минск : Высшейш. шк., 1983. – 191 с.

8 **Солдатов, А. Г.** Идентификация факторов производственного процесса при работе на зубообрабатывающих станках / А. Г. Солдатов, О. Г. Харламов, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2 (55). – С. 118–120. – ISSN 1818-5509.

Publishing House of Saratov University, 1989. – 320 p.

5 **Kremen, Z. I.** Grinding technology in mechanical engineering / Z. I. Kremen, V. G. Yuriev, A. F. Baboshkin. – St. Petersburg : Polytechnic, 2007. – 424 p.

6 **Filimonov, L. N.** High speed grinding / L. N. Filimonov. – Leningrad : Machinebuilding, 1979. – 248 p.

7 **Yascheritsyn, P. I.** Finishing of parts in mechanical engineering / P. I. Yascheritsyn, A. N. Martynov. – Minsk : Highest school, 1983. – 191 p.

8 **Soldatov, A. G.** Identification of factors of the production process when working on gear-cutting machines / A. G. Soldatov, O. G. Kharlamov, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 2 (55). – P. 118–120. – ISSN 1818-5509.

A. G. Soldatov

STUDY OF ROUGHNESS IN GRINDING GEAR WHEEL PROCESS

Abstract. As a rule, gear grinding is the final method of processing all more or less precise gears. It allows to ensure high accuracy of the tooth profile and relatively low roughness specified by the drawing. It is beginning to be used for the manufacture of hardened gears, starting from 7 to 2 degrees of accuracy. The paper deals with the formation of roughness when grinding teeth, calculations are made of the effect of cutting speed and wheel grain size on the critical penetration depth and surface roughness, and the results of the calculations are presented in graphic material. The dependences obtained have been verified during experimental studies and can be recommended for predicting the roughness of the machined surface during gear grinding.

Key words: roughness, gear grinding machine, tooth grinding, grain size, cutting speed.

For citation: Soldatov, A. G. Study of roughness in grinding gear wheel process / A. G. Soldatov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 44–48. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_44.

Сведения об авторах

Солдатов Александр Григорьевич
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Безопасность жизнедеятельности»,
аспирант,
e-mail: smspal@mail.ru

Information about the authors

Soldatov Alexander Grigorievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Health and Safety»,
Postgraduate Student,
e-mail: smspal@mail.ru

О. Г. Харламов

КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ШУМОЗАЩИТЫ СТАНОЧНИКОВ ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ

Аннотация. При выполнении фрезерных работ на зубофрезерных станках на рабочих местах фрезеровщиков возникают повышенные уровни шума, которые достигают 10–18 дБ. В статье рассматриваются вопросы обоснования выбора систем защиты от шума при выполнении работ на зубофрезерных станках. Расчет основан на теоретических исследованиях процесса шумообразования и экспериментальных данных, а также на акустическом расчете, выполненном при проектировании систем снижения шума. Технологический процесс зубофрезерования и компоновка рабочего места фрезеровщика позволяют выполнить снижение шума в источнике его возникновения. Автором предложена конструкция систем шумозащиты станочников и представлены результаты экспериментальных испытаний эффективности этой системы.

Ключевые слова: шумообразование, зубофрезерный станок, уровни звукового давления, система шумозащиты, акустические характеристики станка.

Для цитирования: Харламов, О. Г. Конструкции системы шумозащиты станочников зубофрезерных станков / О. Г. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 49–54 – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_49.

Введение

Зубофрезерные станки являются достаточно распространенным и универсальным видом зуборезного оборудования, работающим с высокой производительностью и позволяющим обрабатывать червячные, конические и цилиндрические колеса с прямыми и винтовыми зубьями, звездочки цепных передач и шлицевые валы. Наиболее распространенными моделями зубофрезерных станков являются 5303 и 5304, которые производят нарезание зубчатых колес обкаткой и методом попутного или встречного фрезерования. Станки оснащены специальным режущим инструментом для обработки зубчатого колеса определенной конструкции и размера. Для нарезания зубьев по методу копирования системе «заготовка – режущий инструмент» сообщаются формообразующие движения: вращение фрезы (является главным из этих движений) и перемещение режущего инструмента по длине зуба. Поскольку на зубообрабатывающих станках нарезаются зубчатые колеса, имеющие очень значительную разницу в диаметрах и длинах зубьев, был проведен большой объем статистических исследований по разнице в уровнях звука (дБА) на рабочих местах станочников [1–3].

Исходными данными для проведения акустического расчета и выполнения проектирования эффективной системы снижения шума являются теоретические исследования процесса образования шума и данные экспериментальных исследований в производственных условиях при максимальных нагрузках, которые составили:

для станков модели 5303 – 12 дБ (теоретически рассчитанное), 10 дБ (экспериментально определенное);

для станков модели 5304 – 15 и 12 дБ (соответственно);

для станков модели 53A50 и 53A801 – 20 и 18 дБ (соответственно) [4–6].

Теоретически рассчитанные спектры шума зубофрезерных станков

Теоретически рассчитанные спектры шума для условий обработки зубчатых колес \varnothing 800 мм на станке модели 53A80, \varnothing 200 мм на станке модели 53A20 и \varnothing 50 мм на станке модели 5304 [1, 7] представлены на рис. 1.

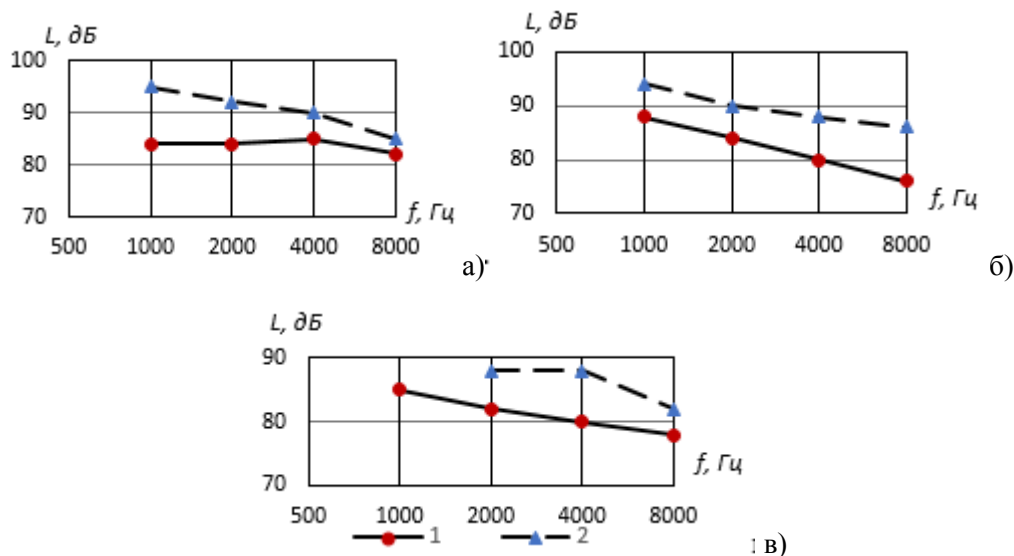


Рис. 1. Теоретически рассчитанные спектры шума для станка моделей:
 а) 53A80; б) 53A20; в) 5304: 1 – оправка; 2 – зубчатое колесо

Сравнение теоретических и экспериментально полученных данных выявило незначительную (2–3 дБ) разницу в данных, полученных расчетным путем и измеренных в производственных условиях. Необходимо отметить, что расчетные значения уровней звукового давления выше экспериментальных.

Система шумозащиты, предлагаемая для станков моделей 5303 и 5304

Для станков моделей 5303 и 5304 достаточно ограничиться системой снижения интенсивности звукового излучения колеса путем уменьшения площади поверхности звукового излучения и звукоизоляции оправки зубчатого колеса, представленной на рис. 2.

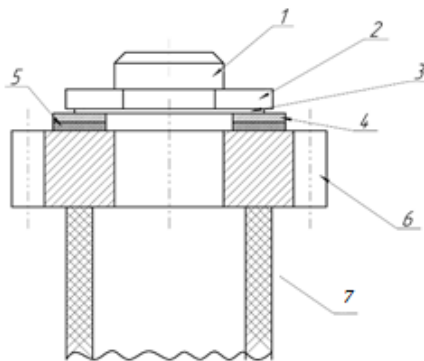


Рис. 2. Система шумозащиты зубофрезерных станков моделей 5303 и 5304:

1 – оправка, на которой устанавливается обрабатываемое зубчатое колесо; 2 – гайка; 3 – пружинная шайба; 4 – шайба из стали листовой толщиной 1–1,2 мм; 5 – виброизолирующий элемент, предназначенный для виброизоляции колеса от оправки (выполнен из полиуретана СПУ-7Л или СКУ ПВЛ толщиной 1,5 мм); 6 – зубчатое колесо; 7 – стеклопластиковая труба, толщиной 5–6 мм

Диаметр шайбы определяется как $d = d_b - (5m - 2 \div 3)$,

где d_b – диаметр окружности выпусков колеса, мм; m – модуль зубчатого колеса, мм.

Следует отметить, что между трубой 7 и оправкой 1 может быть воздушный промежуток.

Эффективность акустической системы снижения шума определяется разницей между фактическими измеренными октавными уровнями звукового давления и допустимыми значениями. Такая эффективность достигается за счет звукоизоляции оправки, а также уменьшения площади звукового излучения обрабатываемого зубчатого колеса. Расчетное значение снижения шума составило 12 дБ, а

экспериментальные данные выявили снижение уровней звукового давления на 5–15 дБ в частотном интервале от 250 до 8000 Гц (рис.3).

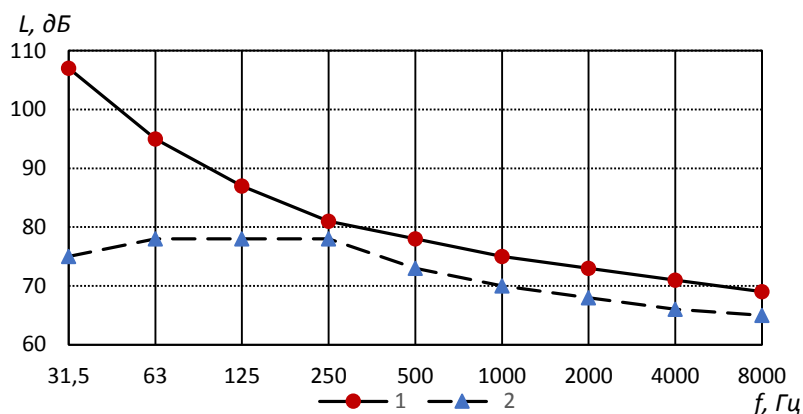


Рис. 3. Спектральный состав шума после установки систем шумозащиты:
1 – предельно допустимые уровни звукового давления; 2 – в зоне действия станков моделей 5303 и 5304 с предлагаемой системой шумозащиты

Система шумозащиты, предусмотренная для станков моделей 53A20 и 53A50

Для станков моделей 53A20 и 53A50 превышение уровней звукового давления составляет 18–20 дБ. Дополнительно к системе, представленной на рис. 1, предлагается ограждение, состоящее из верхней и нижней обечайек (рис. 4), выполненных из стали листовой толщиной 1–1,5 мм.

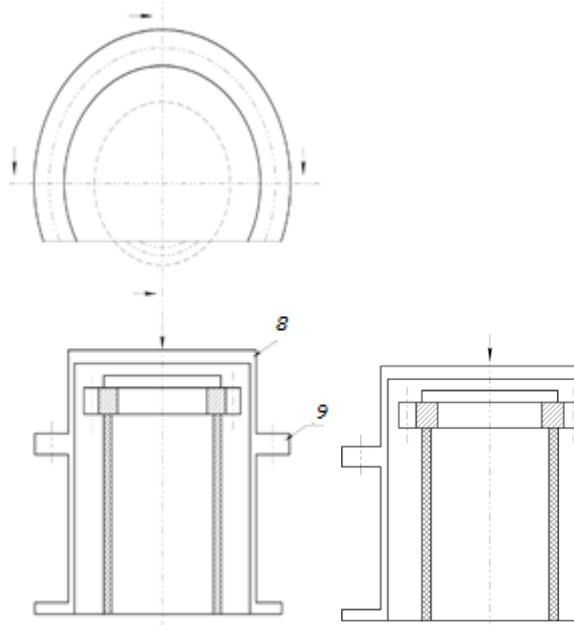


Рис. 4. Система снижения шума для станков моделей 53A20 и 53A80:
8 и 9 – верхняя и нижняя обечайки

Эффективность снижения шума достигается за счет звукоизоляции самой оправки, уменьшения площади звукового излучения зубчатого колеса, а также ограждения, состоящего из верхней и нижней обечайек. Расчетное значение снижения уровней шума составило 18 дБ, а экспериментальные данные показали снижение уровней звукового давления на 9–18 дБ в частотном интервале от 250 до 8000 Гц (рис. 5).

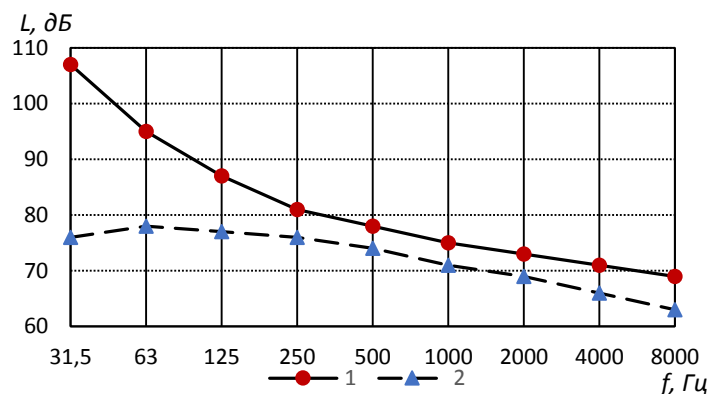


Рис. 5. Спектральный состав шума после установки систем шумозащиты:
 1 – допустимые уровни звукового давления; 2 – в зоне действия станков моделей 53A20 и 53A80 с предлагаемой системой шумозащиты

Система шумозащиты зубофрезерных станков, работающих по методу обката

Компоновка колебательной системы станков подобного типа, обрабатывающих заготовку методом обката, позволяет сделать предположение, что основным источником шума является узел обрабатываемой заготовки, включающий зубчатое колесо и оправку.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретического подхода к оценке формирования спектров шума зубофрезерных станков. Следует отметить, что при выполнении экспериментальных исследований определить количественный вклад каждого источника генерации шума в формировании акустических характеристик рабочего места практически невозможно. Поэтому ниже приведены теоретические расчеты уровней шума, создаваемых обрабатываемыми зубчатыми колесами и оправками зубофрезерных станков, так как именно расчетные данные позволяют подобрать и обосновывать выбор конструкции системы снижения шума.

Расчет шумовых характеристик в зоне действия станков проводился согласно схеме, приведенной на рис. 6.

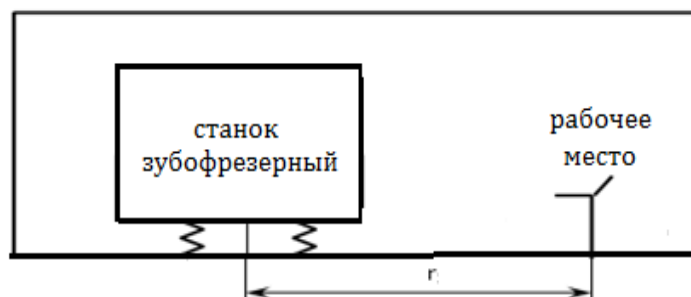


Рис. 6. Основная расчетная схема уровней звукового давления:
 r – расстояние от центра станка до рабочего места

Согласно особенностям компоновки генерирующих источников, для определения уровней звука в зоне действия станка получена следующая зависимость:

$$L = L_p + 10 \lg \left(\frac{1}{S_0} + 4 \frac{1-1,3\alpha_0}{\alpha_0 S_0} \right) + 10 \lg S_0 - 3И,$$

где L_p – звуковая мощность источника; α_0 и S_0 – коэффициент звукопоглощения и площадь ограждающей конструкции (м^2); $3И$ – звукоизоляция ограждения, дБ.

Так как ограждение не является герметичным, то звукоизоляция определяется по формуле:

$$3И = 3И0 - 10 \lg \frac{S_0 + S_n}{S_n},$$

где S_0 и S_n – площади основной конструкции и технологических проемов (м^2).

Результаты расчетов показали, что при наличии ограждения уровни звукового давления понижаются на 4–7 дБ в интервале частот 250–8000 Гц, а с учетом снижения шума системы «оправка –

зубчатое колесо» достигают 22 дБ. Экспериментальные исследования показали, что максимальное снижение уровней звукового давления составляет 3–19 дБ, что все равно приводит к выполнению гигиенических нормативов во всем нормируемом частотном диапазоне (рис. 7).

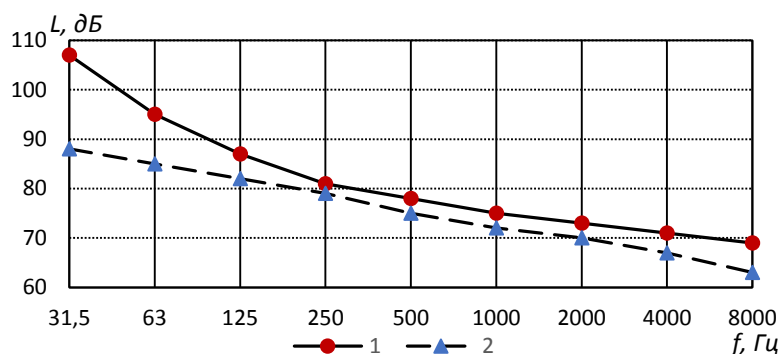


Рис. 7. Спектр шума станков моделей 53A20 и 53A80 при использовании системы шумозащиты:

1 – допустимые уровни звукового давления; 2 – спектр шума станков

Заключение

Сравнительные испытания, выполненные на зубофрезерных станках до и после выполнения шумозащитных мероприятий, показали высокую акустическую эффективность предлагаемых мероприятий и защитных конструкций.

Список литературы

- 1 **Чукарин, А. Н.** Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки / А. Н. Чукарин. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2004. – 152 с. – ISBN 5-7890-0326-5.
- 2 Безопасность жизнедеятельности : учебное пособие / И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – 308 с. – ISSN 978-5-88814-843-3.
- 3 **Чукарин, А. Н.** Влияние процессов резания на шум фрезерных станков / И. А. Бальков, А. Н. Чукарин, Д. З. Евсеев // Новое в безопасности и жизнедеятельности и экологии : сборник статей докладов конференции 14–16 окт. – Санкт-Петербург, 1996. – С. 222–223.
- 4 **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. 5–8. – ISSN 1818-5509.
- 5 **Харламов, О. Г.** Идентификация факторов производственного процесса при работе на зубообрабатывающих станках / А. Г. Солдатов, О. Г. Харламов, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2 (55). – С. 118–120. – ISSN 1818-5509.

References

- 1 **Chukarin, A. N.** Theory and method of acoustic calculations and design of technological machines for mechanical processing / A. N. Chukarin. – Rostov-on-Don : Publishing Center DSTU, 2004. – 152 p. – ISBN 5-7890-0326-5.
- 2 Life safety : textbook / I. G. Pereverzev, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov [et al.]. – 2nd ed., rev. and add. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – 308 p. – ISSN 978-5-88814-843-3.
- 3 **Chukarin, A. N.** Influence of cutting processes on the noise of milling machines / I. A. Balykov, A. N. Chukarin, D. Z. Evseev // New in safety and life and ecology : Sat. Art. report conf. Oct 14–16 – St. Petersburg, 1996. – P. 222–223.
- 4 **Balanova, M. V.** Methodology and technical support for experimental studies of determining noise at workplaces / M. V. Balanova, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 1 (46). – P. 5–7. – ISSN 1818-5509.
- 5 **Kharlamov, O. G.** Identification of factors of the production process when working on gear-cutting machines / A. G. Soldatov, O. G. Kharlamov, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 2 (55). – P. 118–120. – ISSN 1818-5509.

6 Харламов, О. Г. Экспериментальные исследования спектров шума зубофрезерных станков / О. Г. Харламов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – Вып. 5. – С. 391–396. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-391-397.

7 Борисов, Л. П. Звукоизоляция в машиностроении / Л. П. Борисов, Д. Р. Гужас. – Москва : Машиностроение, 1990. – 256 с. – ISBN 5-217-00885-7.

8 Болотов, Б. Е. Методы снижения шума металлорежущих станков / Б. Е. Болотов, С. Н. Панов // Станки и инструмент. – 1978. – С. 19–20.

6 Kharlamov, O. G. Experimental studies of the noise spectra of gear-cutting machines / O. G. Kharlamov // News of Tul-GU. Technical science. – 2022. – Issue 5. – P. 391–396. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-391-397.

7 Borisov, L. P. Soundproofing in mechanical engineering / L. P. Borisov, D. R. Guzhas. – Moscow : Mashinostroenie, 1990. – 256 p. – ISBN 5-217-00885-7.

8 Bolotov, B. E. Methods for reducing the noise of metal-cutting machines / B. E. Bolotov, S. N. Panov // Machine tools and tools. – 1978. – P. 19–20.

O. G. Kharlamov

THE SYSTEM DESIGN OF NOISE PROTECTION FOR MACHINE OPERATOR OF GEAR HOBBING MACHINES

Abstract. The paper analyses the increased noise levels that occurs and reaches 10–18 dB when performing milling work on gear hobbing machines at the machine operator workplace. It deals with the issues of substantiating the choice of noise protection systems in work processing on gear hobbing machines. The calculation is based on theoretical studies of the noise generation process and experimental data, as well as an acoustic calculation performed when designing noise reduction systems. The technological process of gear hobbing and the layout of the hobbing machine's workplace make it possible to reduce noise at the source of its occurrence. The author proposes the design of noise protection systems for machine operators and presents the results of experimental tests of the system effectiveness.

Key words: noise generation, gear hobbing machine, sound pressure levels, noise protection system, machine acoustic characteristics.

For citation: Kharlamov, O. G. The system design of noise protection for machine operator of gear hobbing machines / O. G. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 49–54. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_49.

Сведения об авторах

Харламов Олег Геннадьевич

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

Information about the authors

Kharlamov Oleg Gennadievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Health and Safety»,
Postgraduate Student,
e-mail: smspal@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.224.003 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_55

*И. Н. Егорова***ПОВЫШЕНИЕ МОБИЛЬНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ (НА ПРИМЕРЕ ЮГА РОССИИ)**

Аннотация. Рассмотрено современное состояние транспортной системы с учетом особенностей Южного региона. Определены основные задачи развития логистических систем пассажирского комплекса. Для повышения качества управления пассажирскими перевозками предлагается использовать современные методы прогнозирования пассажиропотоков. Предложен механизм повышения мобильности населения на основе развития инфраструктуры пассажирского комплекса с учетом региональных аспектов. Разработан алгоритм выбора и оценки влияния социально-экономических объемных и качественных показателей на параметры региональной логистической транспортной системы.

Ключевые слова: мобильность населения, транспортно-логистические системы, прогнозирование, социально-экономические показатели, инфраструктура пассажирского комплекса.

Для цитирования: Егорова, И. Н. Повышение мобильности населения в региональной логистической транспортной системе (на примере юга России) / И. Н. Егорова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 55–62. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_55.

Введение

В пассажирской транспортной системе тесно взаимосвязаны различные социальные, экономические, технологические, производственные и экологические процессы. В настоящее время актуальна задача повышения эффективности и качества пассажирских перевозок, что требует учета всех вышеперечисленных факторов. При этом необходимо установление соответствия транспортной системы России и Южного региона.

Важной задачей, стоящей перед транспортной системой юга России, является реализация принципов логистического управления, которое включает рациональное использование транспортной инфраструктуры и обеспечение комплексного транспортного обслуживания пассажиров [1]. При этом одна из приоритетных целей развития транспортной системы – повышение мобильности населения [2].

Принятие решений относительно путей повышения эффективности пассажирских перевозок на основе планирования и прогнозирования пассажиропотоков является ключевой задачей развития пассажирских логистических систем. При этом требуется изменить идеологию системы организации пассажирских перевозок: перейти от принципов конкуренции между видами транспорта к их кооперации. Для решения данной проблемы необходимо обеспечить рациональное взаимодействие различных видов транспорта на основе совершенствования функционирования инфраструктуры пассажирского комплекса.

1 Постановка задачи исследования

Повышение мобильности населения и обеспеченности транспортными услугами является приоритетом инвестиционного развития регионов. В свою очередь, транспортная отрасль должна обеспечить в полном объеме растущие потребности населения в перевозках. В последние годы улучшились основные показатели пассажирских перевозок. Рост числа перевезенных пассажиров всеми видами транспорта в 2021 г. составил 13 % по сравнению с 2020 годом, показатель «пассажиरोоборот» также увеличился в 2021 г. по сравнению с 2020 г. на 37,5 %. При этом рост пассажиरोоборота обеспечивается в основном за счет авиационного (+ 58,5 %) и железнодорожного транспорта (+ 32,6 %) [3].

Показатель транспортной подвижности населения за последние несколько лет имеет тенденцию к возрастанию [4, 5]. Увеличение количества поездок в деловых, личных и туристических целях приводит к развитию различных секторов экономики и к увеличению доходов населения.

Динамика мобильности населения, определяющаяся объемом пассажирооборота, приходящегося на одного пассажира, приведена на рис. 1.

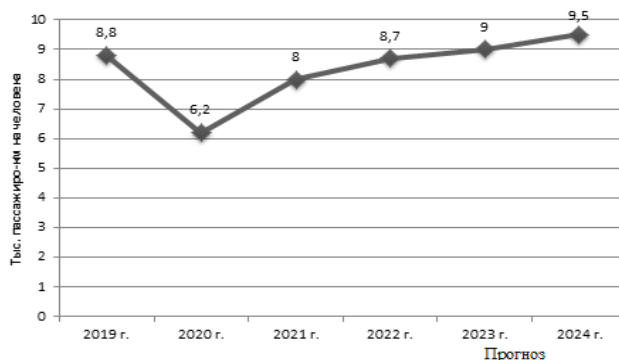


Рис. 1. Динамика мобильности населения с учетом прогнозных значений

Рост транспортной подвижности населения обуславливается увеличением реальных доходов и деловой активности населения, а также политикой государства, направленной на обеспечение доступности услуг транспорта населению на воздушном, железнодорожном, автомобильном пассажирском транспорте. Следует отметить, что наряду с ростом отмечается изменение характера подвижности населения. В настоящее время возрастает индивидуальная мобильность населения, связанная с увеличением количества личных автомобилей (рис. 2, в) [6, 7]. Данная тенденция способствует обострению транспортных и экологических проблем, что особенно актуально для Южного региона страны [8, 9].

Обеспечение высокой конкурентоспособности транспортной отрасли требует постоянного улучшения качества обслуживания и скорости перемещения пассажиров. Дальнейшему повышению мобильности населения будет способствовать разработка комплекса мероприятий, включающего развитие инфраструктуры (хабовая модель организации пассажирских перевозок, развитие высокоскоростного движения) и развитие логистических систем управления пассажирскими перевозками (обеспечение обслуживания пассажиров от «двери» до «двери», мультимодальные перевозки).

Уровень конкуренции возрастает не только между разными видами транспорта, но и между регионами страны. Это обусловлено высоким уровнем влияния работы транспортной системы на развитие всех сфер экономики. Исходя из этого необходимо совершенствование существующих подходов к организации пассажирских перевозок с учетом особенностей развития конкретного региона, позволяющих повысить качество транспортного обслуживания [10]. Поэтому возникает необходимость оценить влияние социально-экономических показателей на логистическую транспортную систему как на общероссийском, так и на региональном уровне.

В сложившихся условиях актуальной задачей становится прогнозирование пассажиропотоков железнодорожного транспорта на краткосрочную, среднесрочную или долгосрочную перспективу на основе анализа факторов, оказывающих влияние на параметры логистической транспортной системы (величину вагонного парка, необходимое количество и пропускную способность транспортно-пересадочных узлов и т.д.). При этом приоритетное развитие железнодорожного транспорта (как самого безопасного, экологически чистого), функционирующего в рамках мультимодальных пассажирских транспортных систем, позволит обеспечить рациональное развитие транспортной инфраструктуры с учетом требований пассажиров [11].

2 Влияние социально-экономических показателей на параметры региональной логистической транспортной системы

Параметры логистической транспортной системы базируются на прогнозе пассажиропотоков, основой которого являются регрессионные модели, описывающие статистически значимые взаимосвязи между прогнозируемыми показателями и влияющими факторами [12, 13]. Все факторы, оказывающие влияние на объемы пассажирских перевозок, можно разделить на внешние и внутренние. В качестве внутренних факторов выступают уровни тарифов в различных типах вагонов, наличие резервов пропускной способности участков железных дорог, обеспечивающих повышение скорости движения пассажирских поездов, а также сезонная неравномерность перевозок пассажиров [12].

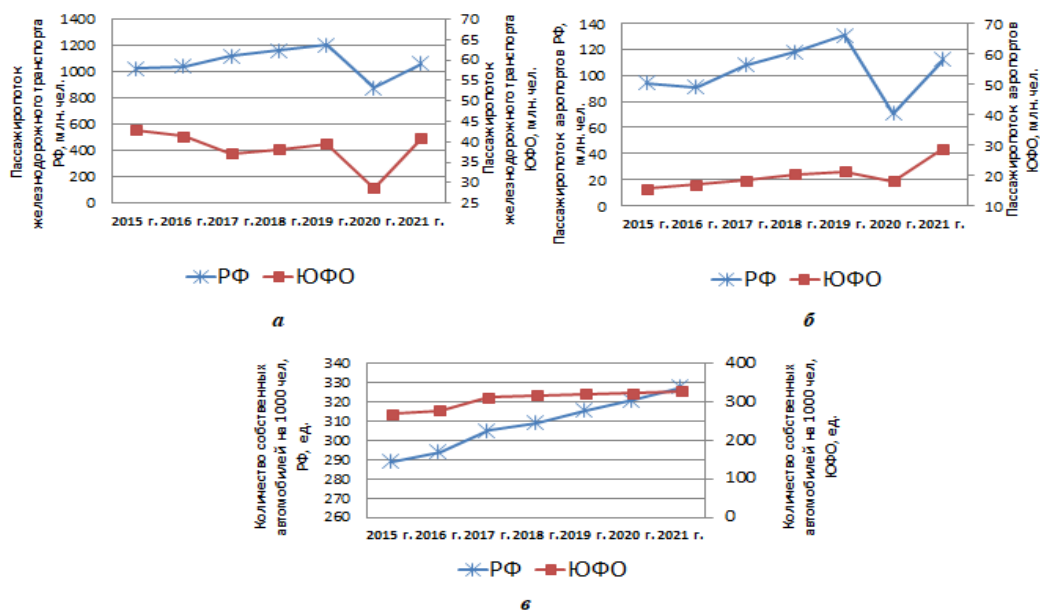


Рис. 2. Факторы, характеризующие развитие различных видов транспорта:
 а – пассажиропоток железнодорожного транспорта в целом для РФ и ЮФО;
 б – пассажиропоток аэропортов РФ и ЮФО; в – количество собственных автомобилей в РФ и ЮФО

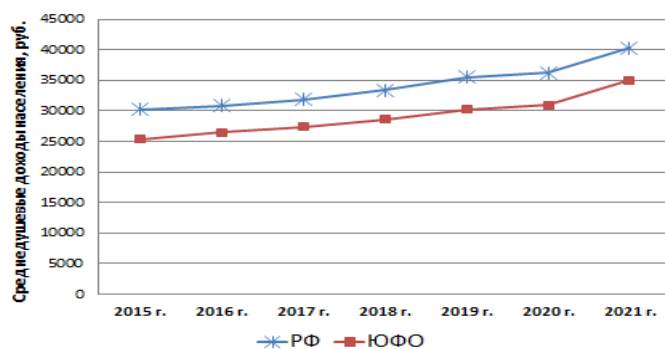


Рис. 3. Динамика среднедушевых денежных доходов населения

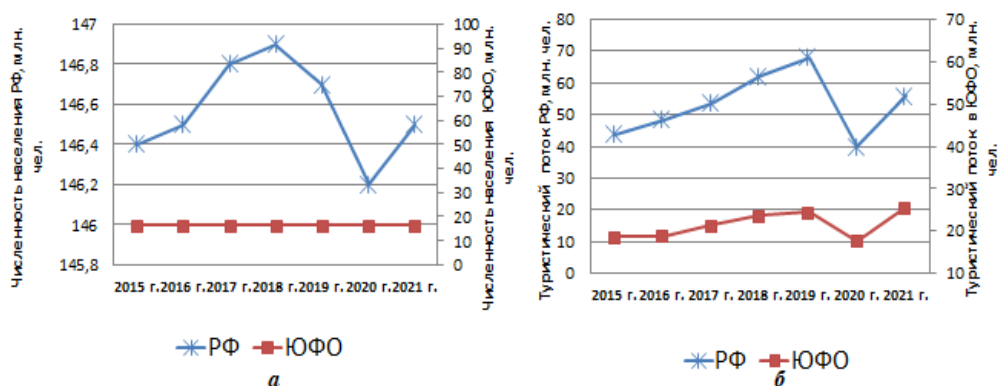


Рис. 4. Численность население и туристический поток:
 а – численность населения в целом для РФ и ЮФО; б – туристический поток для РФ и ЮФО

Среди внешних факторов основное место занимают конкурентные виды транспорта (рис. 2). Наличие в определенном сегменте рынка альтернативных видов пассажирских перевозок приводит к перераспределению пассажиров с одного вида транспорта на другой. В качестве внешних факторов также выступают показатели, характеризующие уровень экономического развития страны (рис. 3), численность населения и объем туристического потока (рис. 4).

В качестве примера рассмотрим влияние различных внешних факторов на пассажиропоток железнодорожного транспорта на общероссийском и региональном (для Южного федерального округа) уровне.

В качестве базы для выявления степени взаимосвязи между показателями работы пассажирского комплекса предлагается использовать метод корреляционно-регрессионного анализа. Данный метод дает возможность выявить показатели, оказывающие наибольшее влияние на пассажиропоток, и, на основании этого, разработать мероприятия по привлечению пассажиров на железнодорожный транспорт и увеличению мобильности населения. Наличие информации о прогнозных значениях пассажиропотоков дает возможность повышения эффективности функционирования логистических транспортных систем, в том числе: оптимизации скорости движения пассажирских поездов, величины вагонного парка, количества персонала, обслуживающего пассажирские перевозки и, тем самым, способствует сокращению транспортных расходов.

В качестве исходного множества для анализа взаимосвязи между прогнозируемым показателем (количеством перевезенных пассажиров железнодорожным транспортом) и влияющими факторами, рассмотрим показатели, характеризующие региональные социально-экономическое развитие РФ и ЮФО.

В таблице приведены результаты расчета коэффициентов линейной корреляции, на рис. 5 рассмотрены диаграммы рассеяния и графики уравнений регрессии для рассматриваемых показателей.

Результаты расчета коэффициентов линейной корреляции

| Зависимая величина | Независимая величина | Величина коэффициента корреляции r_{xy} | | F -критерии Фишера | | Средняя ошибка аппроксимации, \bar{A} % | |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------|
| | | РФ | ЮФО | РФ | ЮФО | РФ | ЮФО |
| Количество перевезенных пассажиров железнодорожным транспортом | Количество перевезенных пассажиров авиационным транспортом, млн чел. | 0,95 5 | 0,113 | $F_{fakt} = 52,3$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} > F_{tabl}$ | $F_{fakt} = 0,07$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} < F_{tabl}$ | 2,4 | 9 |
| | Среднедушевые денежные доходы населения, руб. | – 0,09 | –0,264 | $F_{fakt} = 0,04$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} < F_{tabl}$ | $F_{fakt} = 0,38$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} < F_{tabl}$ | 7,8 | 9,3 |
| | Число собственных автомобилей на 1000 чел., ед. | – 0,06 | –0,531 | $F_{fakt} = 0,02$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} < F_{tabl}$ | $F_{fakt} = 1,96$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} < F_{tabl}$ | 7,7 | 7,4 |
| | Численность населения, млн чел. | 0,52 6 | –0,221 | $F_{fakt} = 1,9$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} > F_{tabl}$ | $F_{fakt} = 3,1$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} < F_{tabl}$ | 6,7 | 8,2 |
| | Туристический поток, млн чел. | 0,91 8 | 0,311 | $F_{fakt} = 26,3$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} > F_{tabl}$ | $F_{fakt} = 2,8$ $F_{tabl} = 6,61$ $F_{fakt} < F_{tabl}$ | 3,2 7 | 9,01 |

Проверку значимости модели регрессии проведем с использованием F -критерия Фишера:

– фактический $F_{fakt} = \frac{r_{xy}^2}{1-r_{xy}^2} (n - 2)$;

– табличный F_{tabl} , определяемый по таблицам распределения Фишера [14].

Если $F_{fakt} > F_{tabl}$, то найденная оценка уравнения регрессии статистически надежна.

Относительное отклонение расчетных значений от фактических определяется при помощи расчета средней ошибки аппроксимации:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| 100\%.$$

Значение средней ошибки аппроксимации не должно превышать 10–12 %.

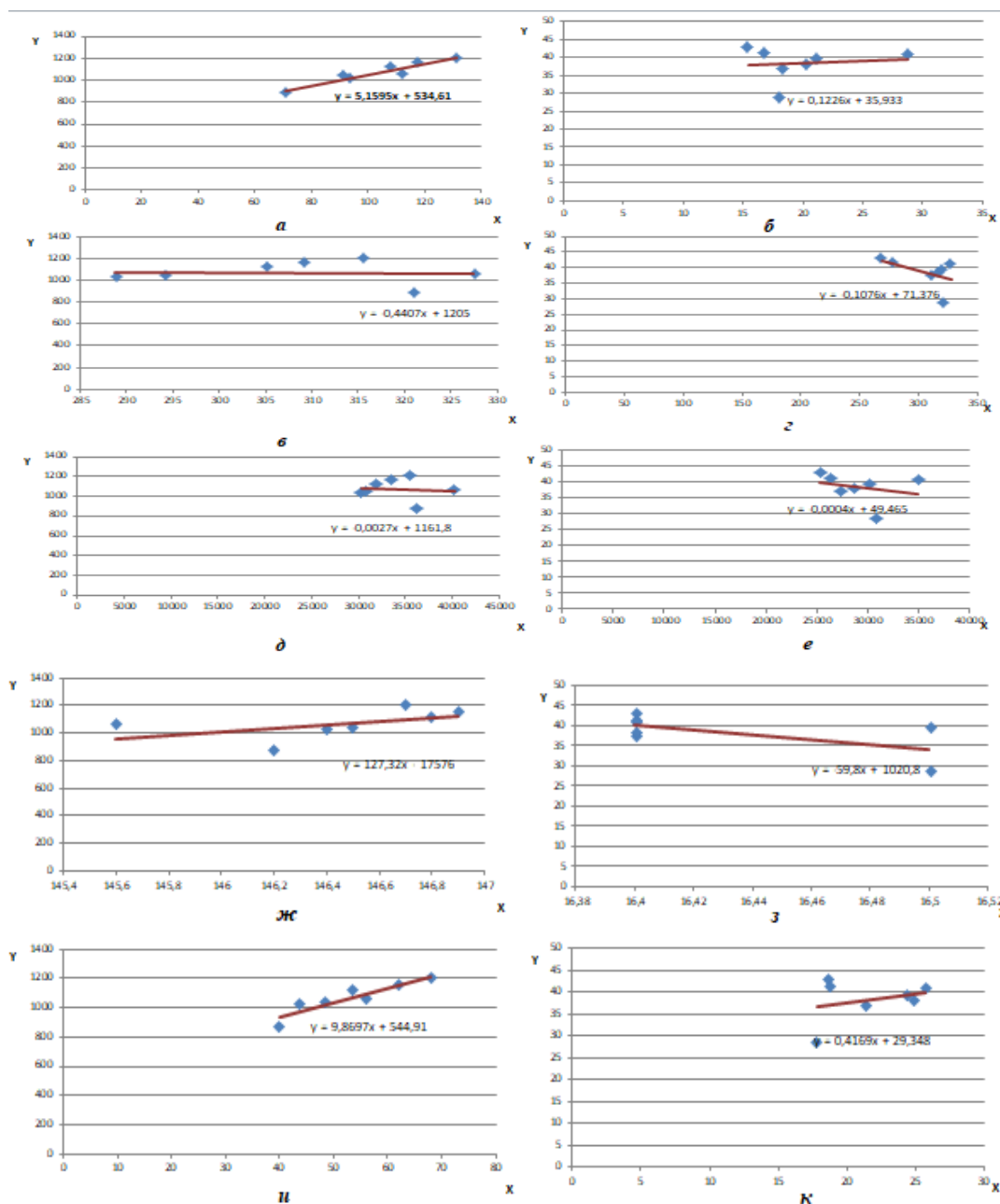


Рис. 5. Диаграммы рассеяния и графики уравнений регрессии:

a – для фактора «количество перевезенных пассажиров авиационным транспортом» для РФ;
б – для фактора «количество перевезенных пассажиров авиационным транспортом» для ЮФО;
в – для фактора «число собственных автомобилей на 1000 чел.» для РФ; *г* – для фактора «число собственных автомобилей на 1000 чел.» ЮФО; *д* – для фактора «среднедушевые денежные доходы населения» для РФ; *е* – для фактора «среднедушевые денежные доходы населения» для ЮФО;
ж – для фактора «численность населения» для РФ; *з* – для фактора «численность населения» для ЮФО;
и – для фактора «туристический поток» для РФ; *к* – для фактора «туристический поток» для ЮФО

Исходя из таблицы можно сделать вывод о значительных расхождениях во влиянии одних и тех же показателей на общероссийском и региональном уровне. Так, на общероссийском уровне

наблюдается наиболее тесное влияние на пассажиропоток железнодорожного транспорта таких показателей, как пассажиропоток авиационного транспорта и объем туристического потока. На региональном уровне сложнее выявить наиболее важные параметры. Однако наиболее тесная взаимосвязь отмечена между сокращением пассажиропотока железнодорожного транспорта и ростом числа личных автомобилей. На рост же объемов железнодорожных пассажирских перевозок влияет в большей степени туристический поток в регион.

Железнодорожный транспорт играет ведущую роль в обеспечении межрегиональных и внутриобластных связей и создании условий комплексного развития системы пассажирских перевозок в Южном регионе. Одним из наиболее перспективных направлений повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта является развитие высокоскоростного движения, позволяющего усилить мотивационные и экономические факторы, влияющие на выбор пассажирами железнодорожного транспорта из множества видов транспорта в региональной пассажирской транспортной системе.

Выводы

Географическое положение – это основной фактор, обуславливающий конкурентоспособность транспортной системы юга России. Регион является уникальным с точки зрения развития туристско-рекреационного потенциала, в связи с чем транспортный комплекс приобретает особое значение в обеспечении растущего объема пассажирских перевозок. Среди основных задач, стоящих перед транспортной системой юга России, – дальнейшее повышение мобильности населения на основе эффективного использования транспортной инфраструктуры и обеспечение рационального взаимодействия различных видов транспорта для осуществления комплексного логистического обслуживания пассажиров.

Значительные расхождения в результатах исследования в целом для РФ и отдельно для ЮФО свидетельствуют о необходимости особенного подхода при разработке мероприятий, направленных на повышение мобильности населения в регионе. Так, рост числа личных автомобилей способствует обострению транспортных и экологических проблем в Южном регионе.

Для решения данных проблем необходимо повысить конкурентоспособность логистической транспортной системы, обеспечив технологическую совместимость различных видов транспорта и повысив уровень их взаимодействия. В частности, необходимо повышение транспортной доступности в регионе на основе реконструкции инфраструктуры республики Крым и Краснодарского края, что обеспечит принципиально новый уровень интенсивности и эффективности функционирования различных видов транспорта и будет способствовать росту объемов пассажирских перевозок.

При этом важной задачей является сохранение традиционно ведущей роли железнодорожного транспорта, обеспечивающего надежные, безопасные и комфортабельные пассажирские перевозки, а предоставляемые им услуги имеют широкий спектр ценовой доступности, обладают максимальной степенью независимости от времен года и погодных условий.

Для достижения вышеуказанных результатов предлагаются следующие мероприятия:

- формирование единого транспортного пространства на территории Южного региона для обеспечения развития и модернизации транспортной системы;
- стимулирование оптимизации маршрутной сети и повышение транспортной доступности;
- повышение инвестиционной привлекательности межрегиональных пассажирских перевозок и финансовой устойчивости перевозчиков;
- расширение ассортимента предлагаемых пассажиру сервисных услуг по всему маршруту следования;
- обеспечение «бесшовности» мультимодальных перевозок.

Список литературы

1 **Чеботарева, Е. А.** Логистика организации пассажирского и грузового движения на направлениях Северо-Кавказской железной дороги / Е. А. Чеботарева, В. Д. Верескун, И. Д. Долгий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1(85). – С. 108–116. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_108.

References

1 **Chebotareva, E. A.** Logistics of the organization of passenger and freight traffic on the directions of the North Caucasian Railway / E. A. Chebotareva, V. D. Vereskun, I. D. Dolgij // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1 (85). – P. 108–116. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_108.

2 **Вакуленко, С. П.** Логистика пассажирских перевозок: особенности и основные понятия / С. П. Вакуленко, Е. В. Копылова // Мир транспорта. – 2015. – № 3 (58). – С. 32–36. – ISSN 1992-3252.

3 Транспорт в России. 2020 : статистический сборник / Росстат. – Москва, 2020. – 108 с. – URL: <https://mintrans.gov.ru/file/448794> (дата обращения: 20.01.2023).

4 Государственная программа «Развитие транспортной системы» : утв. Постановлением Правительства РФ от 20.12.2017 № 1596. – Москва, 2017. – URL: <http://static.government.ru/media/files/KY4QkQAgxHEujVNUq7XoyYVvBghc9YbO.pdf> (дата обращения: 20.01.2023).

5 Российский статистический ежегодник. 2021 : стат. сб. / Росстат. – Москва, 2021. – 692 с.

6 Уровень автомобилизации в России. – URL: https://www.napinfo.ru/infographics/segmenty-rynka/uoven-avtomobilizatsii-v-rossii?utm_source=Sendsay&utm_medium=email (дата обращения: 20.01.2023).

7 **Мамаев, Э. А.** К оценке потенциала развития международного транспортного коридора: теоретические аспекты / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин, И. Д. Долгий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4(80). – С. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

8 **Ковалева, Н. А.** Методы оперативного реагирования при управлении движением в городских транспортных системах / Н. А. Ковалева, Т. Э. Мамаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 148–157. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_148.

9 **Beifert, A.** Business development models for regional airports – case studies from the Baltic Sea region / A. Beifert // Journal of security and sustainability issues. – 2015. – Vol. 5, Iss. 2. – DOI 10.9770/jssi.2015.5.2(6).

10 **Евреенова, Н. Ю.** Управление пассажиропотоком крупнейших ТПУ / Н. Ю. Евреенова, К. А. Калинин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(83). – С. 105–113. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_105.

11 **Лapidus, B. M.** Гладкая бесшовная транспортная система – инновационная модель будущего : природа, сущность, детерминанты качества / Б. М. Лapidus, Л. В. Лapidus // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. – 2017. – № 2. – С. 45–64. – ISSN 0130-0105.

12 **Егорова, И. Н.** Влияние социально-экономических показателей на прогнозный объем железно-

2 **Vakulenko, S. P.** Logistics of passenger traffic: features and basic concepts / S. P. Vakulenko, E. V. Kopylova // World of transport. – 2015. – No. 3 (58). – P. 32–36. – ISSN 1992-3252.

3 Transport in Russia. 2020 : Stat.sb. / Rosstat. – Moscow, 2020. – 108 p. – URL: <https://mintrans.gov.ru/file/448794> (date of access: 01/20/2023).

4 State program "Development of the transport system" : approved. Decree of the Government of the Russian Federation of December 20, 2017 No. 1596. – Moscow, 2017. – URL: <http://static.government.ru/media/files/KY4QkQAgxHEujVNUq7XoyYVvBghc9YbO.pdf> (date of access: 01/20/2023).

5 Russian statistical yearbook. 2021 : Stat. /Rosstat – Moscow, 2021 – 692 p.

6 The level of motorization in Russia. – URL: https://www.napinfo.ru/infographics/segmenty-rynka/uoven-avtomobilizatsii-v-rossii?utm_source=Sendsay&utm_medium=email (date of access: 01/20/2023).

7 **Mamaev, E. A.** To assess the development potential of the international transport corridor: theoretical aspects / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin, I. D. Dolgiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (80). – P. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

8 **Kovaleva, N. A.** Methods of rapid response in traffic control in urban transport systems / N. A. Kovaleva, T. E. Mamaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 2 (82). – P. 148–157. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_148.

9 **Beifert, A.** Business development models for regional airports – case studies from the Baltic Sea region / A. Beifert // Journal of security and sustainability issues. – 2015. – Vol. 5, Iss. 2. – DOI 10.9770/jssi.2015.5.2(6).

10 **Evreenova, N. Yu.** Passenger traffic management of the largest TPU / N. Yu. Evreenova, K. A. Kalinin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 3 (83). – P. 105–113. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_105.

11 **Lapidus, B. M.** Smooth seamless transport system – an innovative model of the future: nature, essence, quality determinants / B. M. Lapidus, L. V. Lapidus // Bulletin of Moscow University, Vol. 6. Economy. – 2017. – No. 2. – P. 45–64. – ISSN 0130-0105.

12 **Egorova, I. N.** Influence of socio-economic indicators on the forecast volume of railway passenger traffic / I. N. Egorova, V. N. Zubkov

дорожных пассажирских перевозок / И. Н. Егорова, В. Н. Зубков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2(74). – С. 90–97. – ISSN 0201-727X.

13 **Левда, Н. М.** Модели прогнозирования транспортной подвижности населения Пермского края / Н. М. Левда, В. П. Постников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 3. – С. 118–124. – ISSN 0201-727X.

14 **Welch, P. D.** The Statistical Analysis of Simulation Results / P. D. Welch. – Academic Press. – New York, 1983. – P. 268–328.

// Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 2 (74). – P. 90–97. – ISSN 0201-727X.

13 **Levda, N. M.** Models for predicting the transport mobility of the population of the Perm Territory / N. M. Levda, V. P. Postnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2013. – No. 3. – P. 118–124. – ISSN 0201-727X.

14 **Welch, P. D.** The Statistical Analysis of Simulation Results. – Academic Press. – New York, 1983. – P. 268–328.

I. N. Egorova

INCREASING THE MOBILITY OF THE POPULATION IN THE REGIONAL LOGISTICS TRANSPORT SYSTEM (ON THE EXAMPLE OF THE SOUTH OF RUSSIA)

Abstract. It is considered the urgent issues connected with transport system of the Southern region. The main targets of the logistics systems` development of the passenger complex are defined. To improve the quality of passenger traffic management, it is proposed to use modern methods of passenger traffic forecasting. A mechanism for increasing the mobility of the population based on the development of the infrastructure of the passenger complex, taking into account regional aspects, is proposed. An algorithm for selecting and evaluating the impact of socio-economic volume and quality indicators on the parameters of the regional logistics transport system has been developed.

Keywords: population mobility, transport and logistics systems, forecasting, socio-economic indicators, passenger complex infrastructure.

For citation: Egorova, I. N. Increasing the mobility of the population in the regional logistics transport system (on the example of the South of Russia) / I. N. Egorova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 55–62. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_55.

Сведения об авторах

Егорова Ирина Николаевна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
старший преподаватель,
e-mail: rina1001@list.ru

Information about the authors

Egorova Irina Nikolayevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of Operational Work»,
Senior Lecturer,
e-mail: rina1001@list.ru

В. Н. Зубков, Е. В. Рязанова, С. М. Наурузбаев, Е. А. Чеботарева, И. В. Меркулов

МЕРЫ ПО СОГЛАСОВАННОМУ РАЗВИТИЮ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ПОДХОДАХ К ПОРТУ ОЛЯ В УСЛОВИЯХ ПРОГНОЗИРУЕМОГО РОСТА ГРУЗОПОТОКОВ ПО ТРАНСПОРТНОМУ КОРИДОРУ «СЕВЕР – ЮГ»

Аннотация. Рассматриваются меры по согласованному развитию инфраструктуры взаимодействующих железнодорожного и морского видов транспорта на подходах к порту Оля в условиях прогнозируемого роста грузопотоков по транспортному коридору «Север – Юг». Определены перспективные объемы экспортных перевозок по данному коридору. Оцениваются пропускные способности железнодорожных подходов к порту Оля и рассматриваются предложения по развитию железнодорожной инфраструктуры в соответствии с планируемыми мощностями порта для освоения всего объема грузопотока. В случае отсутствия ожидаемого эффекта от каждого мероприятия по увеличению пропускной способности в отдельности предлагается рассмотреть комплекс мероприятий, позволяющих достичь необходимых размеров пропускной способности инфраструктуры взаимодействующих видов транспорта. Проведен анализ зарубежного и отечественного опыта для обеспечения эффективного взаимодействия различных видов транспорта. Применен опыт организации значительного экспортного грузопотока в адрес портов юга России на новом направлении с учетом особенностей работы исследуемого объекта. Для решения поставленных задач использована методика расчета пропускной способности, в результате чего предложены варианты её повышения на грузонапряженном участке и выбран наилучший вариант, обеспечивающий высокую надежность перевозок, своевременную доставку и выгрузку грузов.

Ключевые слова: транспортный коридор, рост объемов перевозок, наличная пропускная способность, потребная пропускная способность, развитие инфраструктуры, мероприятия, затраты, оценка достаточности пропускной способности.

Для цитирования: Меры по согласованному развитию инфраструктуры на подходах к порту Оля в условиях прогнозируемого роста грузопотоков по транспортному коридору «Север – Юг» / В. Н. Зубков, Е. В. Рязанова, С. М. Наурузбаев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 – С. 63–75. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_63.

Введение

В сложившихся политических условиях происходит переориентация основного экспортного грузопотока со стран Европы с кратчайшим путем через порты юга России, обслуживаемые Северо-Кавказской железной дорогой, на страны Юго-Восточной Азии с кратчайшим путем через порт Оля по транспортному коридору «Север – Юг». Транспортный коридор «Север – Юг» охватывает территории России от Санкт-Петербурга до порта Оля. На всем протяжении следования по территории России осуществляется железнодорожная перевозка в пределах транспортного коридора, а в порту Оля происходит взаимодействие железнодорожного транспорта с морским и требуется согласованное развитие инфраструктуры этих двух взаимодействующих видов транспорта для беспрепятственного пропуска поездов. Развитие транспортного коридора «Север – Юг» при рациональном использовании имеющихся возможностей инфраструктуры позволит увеличить перерабатывающую способность стратегических узлов, что подтверждается рядом исследований [1, 2]. С целью установления мер по увеличению пропускной способности подходов к порту необходимо оценить пропускные способности инфраструктуры, выявить узкие места и найти решения по их устранению.

Целью данной работы является анализ пропускной способности инфраструктуры и разработка мер по ее усилению на подходах к порту Оля для согласованного взаимодействия с морским видом транспорта. Для этого должны быть установлены технические и технологические мероприятия и выполнен расчет пропускной способности в случае их внедрения. Если каждое мероприятие в отдельности не дает ожидаемого эффекта по увеличению пропускной способности, то необходимо рассмотреть

комплекс мероприятий, позволяющих достичь необходимых размеров пропускной способности инфраструктуры взаимодействующих видов транспорта. Новизна работы заключается в пошаговом анализе мероприятий для освоения объемов перевозок с учетом особенностей работы исследуемого объекта.

Основная часть

За рубежом вопрос форсирования пропускных способностей решается давно, и для эффективного освоения экспортных грузов, перевозимых несколькими видами транспорта, реализуется ряд мероприятий: организация тяжеловесного движения [3], укладка многопутных железнодорожных линий, обеспечение значительного резерва пропускной способности и емкости парков подвижного состава, выделение регулярных грузовых поездов для перевозки устойчивого грузопотока по постоянным маршрутам следования и расписанию, рост доли интермодальных перевозок, развитие системы организации вагонопотоков в групповые поезда [4], развитие технологии движения поездов по твердому расписанию [5].

Отечественный опыт заключается в формировании согласованных планов подвода экспортных грузов в порты юга России, Октябрьской железной дороги и дальневосточные порты в условиях дефицита пропускной способности с учетом расчетных норм выгрузки. За счет технологических мер достигнуты положительные результаты, но из-за того, что железнодорожный транспорт по-прежнему является ограничивающим элементом и не может пропустить весь грузопоток, который грузится в порты, без технических мер, возникающие проблемы по задержке поездов и нарушению сроков доставки не будут устранены. Чтобы не допустить таких же проблем на направлении транспортного коридора «Север – Юг», который сегодня развивается в связи с ожидаемым ростом грузопотоков, необходимо обеспечить согласованное развитие инфраструктуры взаимодействующих видов транспорта.

В рамках работы оцениваются пропускные способности железнодорожных подходов к порту Оля (рис. 1) и рассматриваются предложения по развитию железнодорожной инфраструктуры в соответствии с планируемыми мощностями порта для освоения всего объема грузопотока.



Рис. 1. Порт Оля в системе транспортного коридора «Север – Юг»

В соответствии с [6] в направлении порта Оля прогнозируются объемы перевозок в размере 27,9 млн тонн в год. Для их освоения в порту ведутся работы по увеличению его перерабатывающей способности.

На сегодня реализованы следующие мероприятия [7]: построено несколько зерновых терминалов; закончилось проектирование 8-го и 9-го причалов; началась подготовка к дноуглубительным работам. На перспективу запланированы такие мероприятия, как строительство контейнерного терминала, создание единого оператора, реконструкция Волго-Каспийского морского судоходного канала,

строительство агротерминала для перевалки зерновых и масел. Все это позволит обеспечить перевалку всего объема грузов, который следует по транспортному коридору «Север – Юг».

Так как перевозки в пределах транспортного коридора осуществляются в больших объемах и на большие расстояния, то существенная доля таких перевозок приходится на железнодорожный транспорт [8]. В рамках данной статьи оцениваются мероприятия по развитию пропускной способности инфраструктуры железнодорожного транспорта на направлении от станции Верхний Баскунчак до порта Оля, включающей в себя однопутные и двухпутные участки. Сегодня на этом направлении перевозятся нефть, полезные ископаемые, поступающие со стороны мест их залегания, то есть из Саратовской области, и слияние маршрутов происходит по Верхнему Баскунчаку. В связи с этим участок от Верхнего Баскунчака до Астрахани-II является очень загруженным, поскольку здесь происходит объединение грузопотоков, и далее данный поток следует по участку Верхний Баскунчак – Астрахань-II – порт Оля.

Количество путей и прогнозируемые объемы перевозок по каждому участку представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Прогнозируемые объемы грузопотоков и потребное количество поездов на участке
Верхний Баскунчак – Аксарайская – Астрахань-II – Оля**

| Участок следования грузопотока | Количество путей | Объемы грузопотоков и потребное количество поездов | | | | | |
|------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|-------------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| | | 2020 г. | | 2025 г. | | 2030 г. | |
| | | тонны | по- езда | тонны | поезда | тонны | поезда |
| Верхний Баскунчак – Аксарайская | Двухпутный | 15,7 · 10 ⁶ | 12 | 69 · 10 ⁶ | 52 | 79,6 · 10 ⁶ | 79 |
| Аксарайская – Астрахань-II | Двухпутный | 13,1 · 10 ⁶ | 8 | 47,8 · 10 ⁶ | 36 | 54,4 · 10 ⁶ | 54 |
| Астрахань-II – порт Оля | Однопутный | 2,6 · 10 ⁶ | 2 | 25,2 · 10 ⁶ | 19 | 27,9 · 10 ⁶ | 28 |

Необходимо с учетом данных табл. 1 сопоставить расчетные данные по наличной и потребной пропускной способности каждого участка.

Расчет наличной пропускной способности для двухпутного и однопутного участков выполняется по формулам (1) и (2) соответственно.

$$N_n^{\text{чет}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_n}{I}, \text{ поездов/сут}, \quad (1)$$

где $t_{\text{тех}}$ – продолжительность технологического окна на участке, $t_{\text{тех}} = 75$ мин;

α_n – коэффициент, учитывающий влияние отказов в работе технических средств (пути, устройств СЦБ и связи, контактной сети), $\alpha_n = 0,9-0,96$;

I – расчетный межпоездной интервал на участке, $I = 8$ мин.

$$N_n^{\text{чет}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_n}{T_{\text{пер}}}, \text{ поездов/сут}, \quad (2)$$

где $T_{\text{пер}}$ – период графика, иначе, время занятия перегона группой поездов, характерной для данного типа графика.

Для однопутного участка Астрахань-II – порт Оля ограничивающим перегоном является Яндыки – порт Оля (рис. 2). Период графика определяется по формуле:

$$T_{\text{пер}} = t'_x + t''_x + \sum \tau_{\text{ст}} + \sum \tau_{\text{р.з.}}, \text{ мин}, \quad (3)$$

t'_x, t''_x – время хода пары поездов в нечетном и четном направлениях по ограничивающему перегону, мин;

$\tau_{ст}$ – станционные интервалы, мин;

$\tau_{р.з.}$ – время на разгон и замедление грузового поезда, мин.

$$T_{пер} = 60 + 60 + 2 + 4 = 126 \text{ мин.}$$

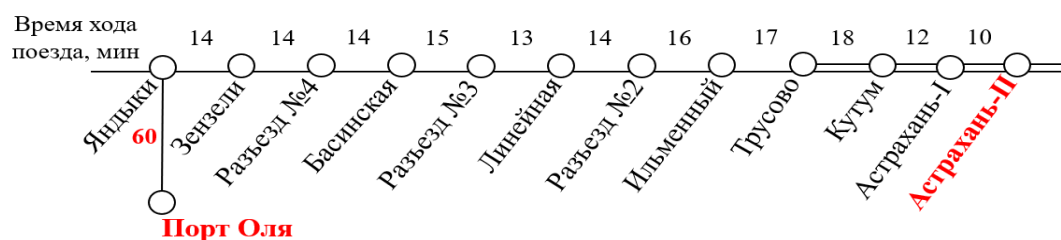


Рис. 2. Схема однопутного участка Астрахань-II – порт Оля

Расчет потребной пропускной способности участков с учетом пропуска пассажирских поездов в размере 21 пары поездов и 8 пригородных поездов выполняется по формуле:

$$N_{потр} = [N_{гр} + N_{пс} + N_{сб}(\epsilon_{сб} - 1)] \cdot \beta_{рез}, \text{ поездов/сут,} \quad (4)$$

где $N_{сб}$ – число сборных поездов, $N_{сб} = 1$;

$\beta_{рез}$ – резерв пропускной способности участка для двухпутного участка, $\beta_{рез} = 1,1 - 1,15$.

Средний коэффициент съема грузовых поездов пассажирскими согласно [9] рассчитывается по формуле:

$$\epsilon_{пс} = \frac{t_{гр}(1 - \Delta) \cdot (0,8 - 0,005 \cdot n_{пасс})}{I} + 1,3, \quad (5)$$

где $t_{гр}$ – время хода грузового поезда по ограничивающему перегону, $t_{гр} = 70$ мин;

Δ – соотношение чистого времени хода пассажирского (ускоренного) поезда данной категории, имеющего большую скорость, чем грузовой и времени хода грузового поезда на расчетном участке ($\Delta = 0,62$);

$n_{пасс}$ – общее число пассажирских поездов на участке, $n_{пасс} = 21$;

I – расчетный межпоездной интервал на участке, $I = 8$ мин.

Результаты расчетов наличной и потребной пропускной способности по участкам при существующем техническом оснащении сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов наличной и потребной пропускной способности по участкам

| Участки | Верхний Баскунчак – Аксарайская | Аксарайская – Астрахань-II | Астрахань-II – порт Оля |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Время занятия перегона группой поездов | – | – | 126 |
| Наличная пропускная способность | 154 | 154 | 11 |
| Средний коэффициент съема грузовых поездов пассажирскими | 3,61 | 3,08 | - |
| Потребная пропускная способность | 174 | 134 | 28 |

Согласно полученным результатам (см. табл. 2) пропускной способности будет недостаточно для освоения прогнозируемого объема перевозок, в связи с чем требуются мероприятия по ее повышению.

В качестве первого мероприятия по повышению пропускной способности исследуемого участка предлагается рассмотреть применение интервального регулирования движения поездов за счет оборудования поездов системой автоматической локомотивной сигнализации (АЛСО) с подвижными блок-участками. В соответствии с [10] благодаря системе АЛСО с подвижными блок-участками можно снизить величину межпоездного интервала на 15–20%. В итоге интервал следования между поездами

составит 6 минут. При оценке увеличения пропускной способности за счет использования системы АЛСО с подвижными блок-участками необходимо учесть, что оборудовать все поезда такими системами невозможно. В процентном соотношении их количество принимается не более 20 %.

Ввиду различия межпоездного интервала между поездами, оборудованными и не оборудованными системами АЛСО с подвижными блок-участками, при расчете наличной пропускной способности предлагается учитывать доли количества этих поездов, которые планируется пропускать на исследуемом участке. В этом случае приближенное значение наличной пропускной способности можно будет рассчитать по формуле:

$$N_n = \alpha_{\text{АЛСО.подв.уч.}} \cdot \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_n}{I_{\text{АЛСО.подв.уч.}}} + \beta_{\text{гр}} \cdot \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_n}{I_{\text{гр}}}, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{АЛСО.подв.уч.}}$, $\beta_{\text{гр}}$ – доля соответственно количества поездов, оборудованных и не оборудованных системой АЛСО с подвижными блок-участками;

$I_{\text{АЛСО.подв.уч.}}$, $I_{\text{гр}}$ – межпоездной интервал соответственно между поездами, оборудованными и не оборудованными системой АЛСО с подвижными блок-участками.

Примем $\alpha_{\text{АЛСО.подв.уч.}} = 0,2$ и $\beta_{\text{гр}} = 0,8$, $I_{\text{АЛСО.подв.уч.}} = 6$ мин, $I_{\text{гр}} = 8$ мин.

Тогда наличная пропускная способность двухпутных участков Верхний Баскунчак – Аксарайская и Аксарайская – Астрахань-II составит:

$$N_n = 0,2 \cdot \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_n}{6} + 0,8 \cdot \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_n}{8} = 43,7 + 131,0 = 174,7 \approx 175 \text{ пар поездов.}$$

На однопутном участке Астрахань-II – порт Оля эффект от пропуска поездов, оборудованных АЛСО с подвижными блок-участками, возможен лишь при частично-пакетном графике, при котором наличная пропускная способность определяется по формуле:

$$N_n^{\text{ч.п.}} = \frac{2 \cdot (1440 - t_{\text{техн}}) \cdot \alpha_n}{(2 - \alpha_n) \cdot T_{\text{пер}} + (I' + I'') \cdot \alpha_n}, \text{ пар поездов,} \quad (7)$$

где α_n – коэффициент пакетности, равный отношению числа поездов (за сутки), следующих пакетами, к общему числу поездов, может быть принят при наличии на станциях расчетного участка двух-трех путей $\alpha_n = 0,5$;

$T_{\text{пер}}$ – период парного непакетного графика, $T_{\text{пер}} = 70$ мин;

I' , I'' – межпоездной интервал, определяемый установленным выше порядком, в четном и нечетном направлениях.

Результаты расчета пропускной способности участков после оборудования части поездов системами АЛСО с подвижными блок-участками и внедрения частично-пакетного графика приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов наличной пропускной способности участков после внедрения подвижных блок-участков и частично-пакетного графика

| Участок | Наличная пропускная способность | |
|---------------------------------|---------------------------------|-------|
| | было | стало |
| Верхний Баскунчак – Аксарайская | 154 | 175 |
| Аксарайская – Астрахань-II | 154 | 175 |
| Астрахань-II – порт Оля | 11 | 14 |

Анализ данных табл. 3 показывает, что в результате внедрения данного мероприятия на участке Верхний Баскунчак – Аксарайская отсутствует резерв пропускной способности, на однопутном участке наличная пропускная способность не соответствует потребным размерам движения. В связи с этим необходимо рассмотреть другие мероприятия по повышению пропускной способности, одним из

которых является организация тяжеловесного движения поездов, с помощью которого достигается повышение провозных способностей участков и направлений, создание резерва пропускной способности [11, 12]. Оценку организации движения тяжеловесных поездов предлагается выполнять с учетом использования инновационных вагонов с осевой нагрузкой 27 т/ось и новых поездных локомотивов, которые могут обеспечить вождение поездов с массой от 7100 до 7900 тонн.

При организации движения тяжеловесных поездов следует определить возможное количество грузовых поездов нормативного веса и количество формируемых тяжеловесных поездов для обеспечения недостающего резерва пропускной способности. Суммарное возможное количество грузовых поездов, пропускаемых по участкам при существующей пропускной способности, устанавливается по формуле:

$$N_{гр}^{возм} = \frac{N_{нал}}{\beta_{рез}} - (N_{пс} \cdot \varepsilon_{пс}^{неч/чет} + N_{сб}(\varepsilon_{сб} - 1)). \quad (8)$$

Для установления необходимого количества тяжеловесных поездов предлагается использовать приведенную ниже систему уравнений:

$$\begin{cases} n_n + n_t = N_{гр}^{возм}, \\ \varphi \cdot (B_n \cdot n_n + B_t \cdot n_t) = \Gamma_{сут}, \\ \Gamma_{сут} / (\frac{2}{3} \varphi \cdot B_t) < N_{гр}^{возм}, \end{cases} \quad (9)$$

где n_n, n_t – количество поездов нормативного веса и тяжеловесных поездов соответственно;
 B_n, B_t – нормативный вес поезда и принятый вес тяжеловесного поезда соответственно, млн т;
 $N_{гр}^{возм}$ – количество грузовых поездов, которое можно пропустить по участку при существующем техническом оснащении, пар поездов;
 $\Gamma_{сут}$ – суточный грузопоток, который необходимо освоить.

Результаты решения системы уравнений зависят от принятых нормативного веса поезда и веса тяжеловесного поезда. Для двухпутных участков рассмотрены варианты весовых норм поездов 7100 тонн и 7900 тонн, а для однопутного участка – 6000 тонн в связи с конструкционными ограничениями моста, расположенного на пути следования. Результаты расчетов количества поездов с нормативным и повышенным весом представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты расчета количества тяжеловесных поездов в сутки
в зависимости от принятых весовых норм**

| Участок | Количество грузовых поездов, которое можно пропустить по участку, $N_{гр}^{возм}$ | Весовая норма поезда B_n , млн т | Вес тяжеловесного поезда B_t , млн т | Количество поездов нормативного веса, n_n | Количество тяжеловесных поездов, n_t | Количество вагонов в составе тяжеловесного поезда, m_c |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Верхний Баскунчак – Аксарайская | 61 | 0,0042 | 0,0071 | 15 | 46 | 75 |
| | | | 0,0079 | 20 | 41 | 80 |
| Аксарайская – Астрахань-II | 72 | | 0,0071 | 40 | 32 | 75 |
| | | | 0,0079 | 43 | 29 | 80 |
| Астрахань-II – Порт Оля | 10 | | 0,0060 | - | 20 | 75 |

На основании полученных результатов необходимо сделать выбор лучшего варианта весовой нормы поездов. Для технико-экономического обоснования оптимальной весовой нормы тяжеловесного поезда для каждого варианта предлагается определить приведенные затраты по формуле (10), представленной в [7]:

$$\Pi = Z_t + Z_{\text{проп.п}} + Z_{\text{накопл}}, \quad (10)$$

где Π – сопоставимые приведенные затраты на измеритель, руб.;

Z_t – затраты на тягу поездов, руб.;

$Z_{\text{проп.п}}$ – затраты на пропуск поездов по участку в зависимости от размеров движения, руб.;

$Z_{\text{накопл}}$ – затраты, связанные с накоплением составов поездов в пункте их формирования, руб.

Согласно [5] затраты, связанные с тягой, определяются по формуле:

$$Z_t = n \cdot l \cdot e_{nl} + M \cdot t \cdot e_{MH} + H \cdot t \cdot e_{Mh}, \quad (11)$$

где n – среднесуточное число тяжеловесных поездов (принимается по результатам расчетов из табл. 4);

l – расстояние между станциями оборотных локомотивных депо, обслуживающих рассматриваемый участок (для данного участка станциями оборотного депо являются Верхний Баскунчак и Аксарайская), $l_{\text{уч}} = 197$ км;

M, H – потребное число поездных локомотивов и локомотивных бригад;

t – время работы локомотивов и локомотивных бригад;

e_{nl} – расходные ставки поездо-км;

e_{MH} – расходные ставки локомотиво-часов;

e_{Mh} – расходные ставки бригадо-часов.

Затраты на пропуск поездов по участку рассчитываются по формуле (12), а затраты на накопление составов поездов в пункте их формирования по формуле (13):

$$Z_{\text{проп.п}} = \frac{l_{\text{уч}} \cdot n}{V_{\text{уч}}} (e_{MH} + 4,5 \cdot e_{Mh}), \quad (12)$$

где $l_{\text{уч}}$ – длина участка;

n_t – размер движения тяжеловесных поездов за сутки.

$$Z_n = N_t \cdot t_n \cdot e_{nh}, \quad (13)$$

где N_t – среднесуточный вагонопоток, охваченный формированием тяжеловесных составов;

t_n – время накопления составов в зависимости от их длины;

e_{nh} – расходная ставка часа занятия станционных путей одним вагоном.

Результаты расчетов затрат на организацию тяжеловесного движения по приведенным элементам и суммарных затрат представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчета затрат на организацию тяжеловесного движения

| Участок | Весовая норма поезда, т | Количество тяжеловесных поездов в сутки, n_t | Затраты на тягу, P_{ar} | Затраты на пропуск поездов по участку в зависимости от размеров, движения, P_p | Среднесуточное количество вагонов, накапливаемых в тяжеловесные поезда, N_t | Затраты на накопление вагонов, P_n | Суммарные затраты на организацию тяжеловесных поездов, ΣP |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Верхний Баскунчак – Аксарайская | 7100 | 46 | 1274977,28 | 1244057,25 | 3450 | 3485,88 | 2522520,41 |
| | 7900 | 41 | 1261640,38 | 1108833,64 | 3280 | 3723,46 | 2374197,48 |
| Аксарайская – Астрахань-II | 7100 | 32 | 1379129,92 | 193294,26 | 2400 | 3490,56 | 1575914,74 |
| | 7900 | 29 | 1377342,64 | 175172,93 | 2320 | 3719,42 | 1556234,99 |
| Астрахань-II – порт Оля | 6000 | 20 | 429970,6 | 480490 | 1500 | 3488,4 | 913949 |

Согласно полученным данным можно утверждать, что вес поезда не ограничивается эксплуатационными затратами и чем больше вес поезда, тем ниже затраты. В этих условиях ограничением в увеличении веса тяжеловесных поездов является путевое развитие станций, по которым осуществляется обработка тяжеловесных поездов.

На станции должно быть такое количество путей для обработки тяжеловесных и длинносоставных поездов, чтобы интервал времени, по истечении которого возникает необходимость в освобождении хотя бы одного пути для приема очередного длинносоставного поезда, был больше, чем продолжительность его обработки на станции, то есть

$$t_{op}^{dl} < t_{free},$$

где t_{op}^{dl} – продолжительность обработки длинносоставных поездов на станции (принимается на основании технологического процесса станции);

t_{free} – интервал времени, по истечении которого возникает необходимость в освобождении хотя бы одного пути.

Интервал времени, по истечении которого возникает необходимость в освобождении хотя бы одного пути для приема длинносоставного поезда, определяется по формуле:

$$t_{free} = k_r^{dl} \cdot t_{ar}^{dl}, \quad (14)$$

где k_r^{dl} – количество путей, на которые можно принимать поезда необходимой длины;

t_{ar}^{dl} – расчетный интервал между поступлением длинносоставных поездов на станцию, который рассчитывается по формуле:

$$t_{ar}^{dl} = \frac{(1440 - t_w) \cdot \alpha_n}{2 \cdot n_t}, \quad (15)$$

где t_w – продолжительность технологического окна на прилегающем участке (для двухпутного движения $t_w = 75$ мин);

n_t – количество тяжеловесных поездов длиной, превышающей нормативную;

α_n – коэффициент надежности технических средств, $\alpha_n = 0,90-0,96$.

Для исследуемого направления станциями обработки тяжеловесных поездов повышенной длины в пути следования являются станции Аксарайская, Астрахань-II и станция при порте Оля. По станциям Аксарайская и Астрахань-II в соответствии с техническими характеристиками имеется по шесть путей, позволяющих принимать длинносоставные поезда.

На припортовой станции, обслуживающей порт Оля, в настоящий момент отсутствует необходимое путевое развитие для обработки длинносоставных поездов. Для наших расчетов продолжительность обработки длинносоставных поездов на этой станции примем такую же, как и по станции Астрахань-II. Опираясь на их результаты, для припортовой станции Оля в рамках данной работы можно составить рекомендации о количестве путей необходимой длины. Результаты оценки возможностей указанных станций по приему всех поездов повышенной длины приведены в табл. 6.

Таблица 6

Оценка возможностей станций по приему всех поездов повышенной длины

| Участок | Верхний Баскунчак – Аксарайская | | Аксарайская – Астрахань-II | | Астрахань-II – порт Оля |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------|----------------------------|------|-------------------------|
| Станция | Аксарайская | | Астрахань-II | | Припортовая станция Оля |
| Весовая норма поезда, т | 7100 | 7900 | 7100 | 7900 | 6000 |
| Количество тяжеловесных поездов длиной выше нормативной, n_t | 46 | 41 | 32 | 29 | 20 |
| Интервал прибытия длинносоставных поездов на станцию, мин, t_{ar}^{dl} | 15 | 16 | 21 | 23 | 33 |
| Количество путей, способных вместить поезд необходимой длины, k_r^{dl} | 6 | | 6 | | 3 |
| Интервал времени, по истечению которого возникает необходимость в освобождении хотя бы одного пути, мин, t_{free} | 90 | 96 | 126 | 138 | 198 |
| Время обработки длинносоставных поездов на станции, мин, t_{op}^{dl} | 68 | | 68 | | 68 |

Согласно полученным данным все рассмотренные станции могут обеспечить прием всех длинносоставных поездов с максимальной установленной весовой нормой. В связи с чем можно будет организовать движение тяжеловесных поездов весом 7900 и 6000 тонн, пропуск которых позволит снизить эксплуатационные расходы. В итоге применение новых локомотивов при условии использования инновационных вагонов, способных двигаться с большими скоростями, позволит повысить максимальную скорость грузовых поездов до $V_{поезд} = 120$ км/ч, что, в свою очередь, увеличит участковую скорость, которая рассчитывается по формуле:

$$V_{уч} = \frac{l_{уч}}{\frac{l_{уч}}{V_{поезд}} + t_{доп}} = \frac{197}{\frac{197}{120} + 2,1} = \frac{197}{3,7} = 53,24 \approx 53 \text{ км/ч}, \quad (16)$$

где $t_{доп}$ – время на стоянки на промежуточных станциях, разгон и замедления и задержки поезда на перегонах.

Если при максимальной скорости $V_{поезд} = 90$ км/ч участковая скорость составляет $V_{уч} = 45,5$ км/ч, то $t_{доп}$ рассчитаем по формуле:

$$t_{доп} = \frac{l_{уч}}{V_{уч}} - \frac{l_{уч}}{V_{поезд}} = \frac{197}{45,5} - \frac{197}{90} = 4,3 - 2,2 = 2,1 \text{ ч}. \quad (17)$$

Результаты оценки достаточности пропускной способности представлены в табл. 7.

Таблица 7

**Результаты оценки достаточности пропускной способности участков
при организации тяжеловесного движения**

| Участок | Наличная пропускная способность | Потребная пропускная способность | |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------|
| | | было | стало |
| Верхний Баскунчак – Аксарайская | 154 | 174 | 94 |
| Аксарайская – Астрахань-II | 154 | 134 | 106 |
| Астрахань-II – порт Оля | 11 | 28 | 22 |

Согласно полученным результатам (см. табл. 7) для двухпутных участков мера по повышению веса поезда является достаточной для освоения всего ожидаемого грузопотока на перспективу. Однако на однопутном участке данная мера не позволяет освоить весь грузопоток. Выходом является строительство второго пути.

С учетом поставленной цели по оценке мер повышения пропускной способности исследуемого участка в работе впервые были рассмотрены все возможные варианты, для которых был проведен расчет с применением существующих методик, скорректированных автором для учета дополнительных условий. Полученный алгоритм действий является универсальным, и его можно использовать для оценки мероприятий и выбора оптимального для всех участков, вошедших в грузонапряженное направление.

Выводы

В рамках настоящего исследования был рассмотрен ряд технико-технологических мероприятий по повышению пропускной способности: внедрение подвижных блок-участков и частично-пакетного графика, организация тяжеловесного движения, строительство второго пути. В результате расчетов было установлено, что в качестве меры по повышению пропускной способности на двухпутных участках требуется организовать движение тяжеловесных поездов весом 7900 тонн, а однопутный участок необходимо реконструировать путем укладки второго пути. Указанный порядок расчетов по усилению пропускной способности позволяет поэтапно оценить изменения резерва пропускной способности и, варьируя различные мероприятия, оценить их совокупный эффект.

Появление резервов в пропускной способности позволит также повысить качество планирования подвода востребованного груза в порты и обеспечить беспрепятственный пропуск грузов по транспортному коридору «Север – Юг». В условиях сокращения задержек поездов в пути следования повысится качество регулирования движения вагонопотоков по всему маршруту следования от мест их зарождения до погашения. Это станет стимулом для улучшения взаимодействия между железными дорогами и морскими портами, что приведет к положительной динамике и эффективности перевозок экспортных грузов на направлении транспортного коридора «Север – Юг».

Список литературы

1 Перспективы исследований транспортно-технологических параметров узловых пунктов концентрации и распределения припортовых вагонопотоков / В. М. Задорожный, О. Н. Числов, М. В. Колесников, М. В. Бакалов, А. О. Полунина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1. – С. 72–81. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_72.

References

1 Prospects of research of transport and technological parameters of nodal points of concentration and distribution of port car traffic / V. M. Zadorozhny, O. N. Chislov, M. V. Kolesnikov, M. V. Bakalov, A. O. Polunina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1. – P. 72–81. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_72.

2 **Мамаев, Э. А.** К оценке потенциала развития международного транспортного коридора : теоретические аспекты / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин, И. Д. Долгий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4. – С. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

3 **Захаров, С. М.** Развитие тяжеловесного движения в мире / С. М. Захаров, Ш. К. Петрович // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 4. – С. 9–18. – ISSN 2223-9731.

4 **Сотников, Е. А.** Эксплуатационная работа на железных дорогах мира / Е. А. Сотников, И. Н. Шапкин // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 1. – С. 72–77. – ISSN 0044-4448.

5 **Колупаев, В.** Ставка на точность «Твердые нитки» графика ускорят грузовые поезда / В. Колупаев // Гудок. – 2010. – 26 июля. – URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=700745> (дата обращения: 25.01.2023).

6 **Винокуров, Е.** Международный транспортный коридор «Север – Юг»: создание транспортного каркаса Евразии. Доклад 21/5 / Е. Винокуров, А. Ахунбаев, М. Шашкенов, А. Забоев. – Алматы – Москва : Евразийский банк развития, 2021.

7 **Наурузбаев, С. М.** Экономический потенциал развития международного транспортного коридора «Север – Юг» / С. М. Наурузбаев, Е. В. Рязанова, Н. А. Горьковенко // Экономика XXI века : инновации, инвестиции, образование. – 2022. – № 6. – С. 93–96. – ISSN 2308-4936.

8 **Числов, О. Н.** Вариант оценки этапности развития припортовых станций на направлениях южнороссийских транспортных коридоров / О. Н. Числов, Д. С. Безусов, С. Г. Заяц // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2. – С. 153–163. – ISSN 1818-5509.

9 **Левин, Д. Ю.** Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом : учебное пособие / Д. Ю. Левин. – Москва : Маршрут, 2005. – 759 с. – ISBN 5-89035-274-1.

10 **Воронин, В. А.** АЛСО с подвижными блоками / В. А. Воронин, В. В. Воробьев, С. Н. Есырев // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 6. – С. 44–45. – ISSN 0005-2329.

11 **Мугинштейн, Л. А.** Опыт внедрения тяжеловесного движения на железных дорогах / Л. А. Мугинштейн, К. П. Шенфельд // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 3. – С. 35–41. – ISSN 0044-4448.

2 **Mamaev, E. A.** To assess the development potential of the international transport corridor: theoretical aspects / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin, I. D. Dolgiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4. – P. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

3 **Zakharov, S. M.** The development of heavy traffic in the world / S. M. Zakharov, Sh. K. Petrovich // Russian Railway Science Journal. – 2013. – No. 4. – P. 9–18. – ISSN 2223-9731.

4 **Sotnikov, E. A.** Operational work on the railways of the world / E. A. Sotnikov, I. N. Shapkin // Zheleznodorozhny Transport = Railway transport. – 2009. – No. 1. – P. 72–77. – ISSN 0044-4448.

5 **Kolupaev, V.** The bet on the accuracy of the "Solid threads" of the schedule will accelerate freight trains / V. Kolupaev // Gudok. – 2010. – July 26. – URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=700745> (date of access: 25.01.2023).

6 **Vinokurov, E.** The International transport corridor "North – South": the creation of the transport framework of Eurasia. Report 21/5 / E. Vinokurov, A. Akhunbayev, M. Shashkenov, A. Zaboiev. – Almaty – Moscow : Eurasian Development Bank, 2021.

7 **Nauruzbayev, S. M.** The economic potential of the development of the international transport corridor "North – South" / S. M. Nauruzbayev, E. V. Ryzanova, N. A. Gorkovenko // The Economy of the XXI Century : Innovation, Investment, Education. – 2022. – No. 6. – P. 93–96. – ISSN 2308-4936.

8 **Chislov, O. N.** A variant of the assessment of the stages of development of port stations in the directions of South Russian transport corridors / O. N. Chislov, D. S. Bezusov, S. G. Zayats // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2014. – No. 2. – P. 153–163. – ISSN 1818-5509.

9 **Levin, D. Yu.** Dispatch centers and technology of transportation process management: textbook / D. Yu. Levin. – Moscow : Marshrut, 2005. – 759 p. – ISBN 5-89035-274-1.

10 **Voronin, V. A.** ALSO with movable block sections / V. A. Voronin, V. V. Vorobyev, S. N. Yesyrev // Automation, communications, informatics. – 2011. – No. 6. – P. 44–45. – ISSN 0005-2329.

11 **Muginstein, L. A.** The experience of introducing heavy traffic on railways / L. A. Muginstein, K. P. Schoenfeld // Railway Transport. – 2016. – No. 3. – P. 35–41. – ISSN 0044-4448.

12 **Дмитренко, А. В.** Эффективность повышения веса грузовых поездов на их скорость движения / А. В. Дмитренко, Е. А. Ларченко, А. А. Еременко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4. – С. 69–74. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_59_6.

12 **Dmitrenko, A. V.** Efficiency of increasing the weight of freight trains on their speed / A. V. Dmitrenko, E. A. Larchenko, A. A. Eremenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 4. – P. 69–74. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_59_6.

V. N. Zubkov, E. V. Ryazanova, S. M. Nauruzbayev, E. A. Chebotareva, I. V. Merkulov,

MEASURES FOR THE COORDINATED INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT ON APPROACHES TO “OLYA” PORT IN THE CONDITIONS OF THE PREDICTED GROWTH OF CARGO FLOWS ALONG THE NORTH-SOUTH TRANSPORT CORRIDOR

Abstract. The paper discusses measures for the coordinated development of the interacting rail infrastructure and sea modes of transport on the approaches to “Olya” port in the conditions of the projected growth of cargo flows along the North-South transport corridor. The prospective volumes of export traffic along this corridor have been determined. The capacity of railway approaches to “Olya” port is being evaluated and proposals for the development of railway infrastructure in accordance with the planned port capacity for the development of the entire volume of cargo traffic are being considered. If each event individually does not give the expected effect of increasing the capacity, then it is necessary to consider a set of measures to achieve the required capacity of the infrastructure of interacting transport modes. The analysis of foreign and domestic experience is carried out to ensure effective interaction of various transport modes. The experience of organizing significant export cargo traffic to the ports of the South of Russia in a new direction is applied, taking into account the peculiarities of the operation of the object under study. To solve the tasks set, a methodology for calculating the throughput was used, as a result of which options for increasing it on a cargo-stressed section were proposed and the best option was selected, ensuring high reliability of transportation, timely delivery and unloading of goods.

Keywords: transport corridor, traffic volume growth, available capacity, required capacity, infrastructure development, activities, costs, assessment of capacity sufficiency.

For citation: Measures for the coordinated infrastructure development on approaches to “Olya” port in the conditions of the predicted growth of cargo flows along the North-South transport corridor / V. N. Zubkov, E. V. Ryazanova, S. M. Nauruzbayev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 – P. 63–75. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_63.

Сведения об авторах

Зубков Виктор Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: uer@rgups.ru

Рязанова Екатерина Владимировна

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

Information about the authors

Zubkov Viktor Nikolayevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of Operational Work»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: uer@rgups.ru

Ryazanova Ekaterina Vladimirovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of Operational Work»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: uer@rgups.ru

Наурузбаев Сабир Мансурович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
специалист,
e-mail: sabinauruzbaev@gmail.com

Чеботарева Евгения Андреевна

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

Меркулов Илья Владимирович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
аспирант,
e-mail: 89281692083@bk.ru

Nauruzbayev Sabir Mansurovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of Operational Work»,
Specialist,
e-mail: sabinauruzbaev@gmail.com

Chebotareva Evgeniya Andreyevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of Operational Work»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: uer@rgups.ru

Merkulov Ilya Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of Operational Work»,
Postgraduate Student,
e-mail: 89281692083@bk.ru

В. В. Зубков, Н. Ф. Сирина, П. Е. Раевская, Н. В. Раевский

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ВОЖДЕНИЯ СОЕДИНЕННЫХ ПОЕЗДОВ И ПОЕЗДОВ ПОВЫШЕННОЙ МАССЫ И ДЛИНЫ

Аннотация. Представлен анализ вождения соединенных поездов и поездов повышенной массы и длины на железных дорогах Российской Федерации. Также рассмотрены возможности их эксплуатации в некоторых странах: США, ЮАР, Китай и др.

Практика вождения соединенных поездов и повышенной массы и длины создает возможности для дальнейшего роста грузооборота, увеличения пропускной способности существующих железнодорожных участков, позволяет оперативно реагировать на изменения объема перевозок без увеличения числа поездов или отказов в выполнении заказов, что способствует повышению уровня клиентоориентированности.

Основными факторами, ограничивающими сквозное движение длинносоставных поездов и поездов повышенной массы с использованием имеющегося подвижного состава, выступают короткая длина приемоотправочных путей станций и недостаточная располагаемая мощность системы тягового электроснабжения на отдельных участках железных дорог.

Ключевые слова: перевозочный процесс, грузовые поезда, тяжеловесные поезда, соединенные поезда, поезда повышенной массы и длины, эффективность эксплуатации соединенных поездов и повышенной массы и длины.

Для цитирования: Этапы развития вождения соединенных поездов и поездов повышенной массы и длины / В. В. Зубков, Н. Ф. Сирина, П. Е. Раевская, Н. В. Раевский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 76–85. – DOI 10.46973/0201– 727X_2023_1_76.

Введение

Железнодорожный транспорт в общей системе перевозочного процесса имеет первоочередное значение. Он работает непрерывно, независимо от времени года и климатических условий; способен осуществлять массовую перевозку грузов и пассажиров.

Основополагающим показателем работы железнодорожной транспортной системы является грузооборот – произведение количества перевезенного груза на расстояние перевозки. Его динамика за последние шесть лет до 2022 года представлена на рис. 1 [1, 2].

Изменение грузооборота в меньшую сторону в 2020 году связано с введением ограничительных мер в связи с распространением новой коронавирусной инфекции и общим спадом мировой экономической активности.

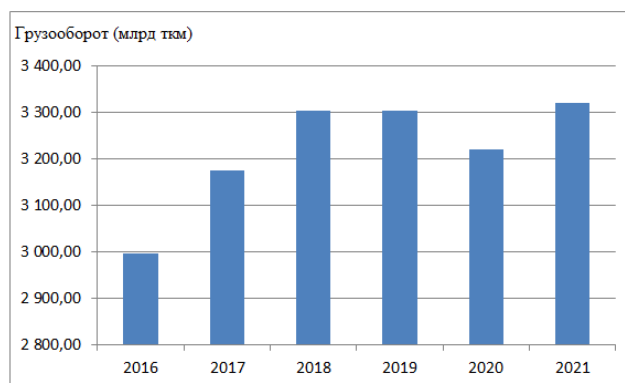


Рис. 1. Динамика изменения грузооборота на сети дорог России

Освоение растущего грузооборота и перенаправление транспортных потоков вызывают необходимость увеличения пропускной способности железнодорожных направлений.

Основная часть

Пропускная способность определяет максимальные размеры движения, которые могут быть реализованы на участке железной дороги в течение какого-то периода с учетом имеющихся постоянных устройств, типа и мощности тяговых средств, рода вагонов и способа организации движения [3–5]. Она зависит от большого числа непрерывно изменяющихся факторов: технического оснащения железнодорожного участка, количества главных путей на перегонах и приемоотправочных путей на станциях, мощности локомотивов и другого. Необходимо постоянно отслеживать тенденции этих изменений, планировать и внедрять мероприятия по ее увеличению на полигонах и направлениях.

Мероприятия, позволяющие улучшить данный показатель, должны выбираться на основе результатов технических, эксплуатационных, экономических расчетов [6], которые можно разделить на организационно-технические и реконструктивные.

Организационно-технические мероприятия включают: увеличение массы поездов за счет более полного использования кинетической энергии поезда; увеличение скорости движения на перегонах, ограничивающих пропускную способность; введение кратной тяги на отдельных перегонах; уплотнение графика движения поездов; введение соединенных поездов.

Реконструктивные мероприятия предусматривают: применение более совершенных устройств СЦБ; удлинение приемоотправочных путей и увеличение числа путей на отдельных пунктах; введение более мощных локомотивов при данном виде тяги или замену тепловозной тяги электрической; смягчение продольного профиля пути или изменение трассы на отдельных участках; укладку вторых путей на части или на всем протяжении реконструируемой линии.

Организационно-технические мероприятия, требующие меньших капиталовложений, обычно предшествуют реконструкции эксплуатируемой дороги. В ряде случаев организационно-технические мероприятия сочетаются с реконструктивными. Так при увеличении массы поезда за счет тех или иных организационных мероприятий может потребоваться удлинение приемоотправочных путей на отдельных пунктах.

Наиболее капиталоемким реконструктивным мероприятием является строительство дополнительных главных путей, значительно увеличивающих пропускную способность линии и улучшающих ее эксплуатационные показатели.

Одним из наиболее эффективных методов повышения результативности перевозочного процесса на полигонах является эксплуатация поездов повышенной массы и длины (ППМД). По документу [7] – это грузовые поезда с локомотивом в голове и в хвосте, или в голове и последней трети состава.

Соединенные поезда (СП) – грузовые поезда с постановкой действующих локомотивов в голове каждого поезда, сцепленные между собой автосцепкой, как правило, тоже имеют увеличенную длину и массу.

Основные этапы развития вождения СП и ППМД на сети железных дорог России показаны в табл. 1.

Пропускная способность линии должна иметь резерв. Резервы могут быть разных видов. Это и дополнительное количество технических средств (локомотивы, вагоны, железнодорожные пути на станциях). Это и временное резервирование, т.е. возможность использования избыточного времени. Для железнодорожных линий оно представляет время суток, не занятое пропуском поездов. Оно может выражаться в виде резервных ниток графика движения. Технология применения в эксплуатационной работе СП и ППМД способствует снижению себестоимости грузовых перевозок, при этом сокращается проблема резерва пропускной и провозной способности грузонапряженных участков и направлений [8].

Начиная с 1983 г. МПС внедрялись масштабные технологические решения по увеличению средней массы поезда, и за период до 1986 г. она возросла на 255 тонн. Это позволило без роста размеров движения освоить требуемый в тех социально-экономических условиях прирост объема перевозок.

Таблица 1

Основные этапы развития вождения СП и ППМД в Российской Федерации

| № п/п | Год | Железная дорога | Новшество, результат |
|-------|------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | 1968 | Октябрьская, Приволжская, Южная, Северная, Восточно-Сибирская | Вождение ППМД осуществлялось двойной тягой по вариантам (схемам) [9, 10, 11]: - ЛЛСС (локомотив-локомотив-состав-состав) «сдваивание»; - ЛССЛ (локомотив-состав-состав-локомотив) «спаривание». |
| 2. | 1979 | Московская | Вождение ППМД, СП позволило: - повысить среднюю массу поездов на 60 т; - сэкономить 12 млн. кВт ч электроэнергии; - уменьшить эксплуатационный парк на 30 локомотивов и 80 локомотивных бригад. |
| 3. | 1989 | Северо-Кавказская | Вождение ППМД осуществлялось [12] по специальным ниткам графика движения с использованием полной мощности локомотивов. Удлинялись приемоотправочные пути на станциях. |
| 4. | 1990 | Московская | СП применялись в целях форсирования пропускной способности в периоды технологических «окон» для капитального ремонта пути. Длина поезда достигала 1800 метров. |
| 5. | 2007 | Московская | Организация вождения ППМД позволила сократить: - более чем на 40000 количество отправленных грузовых поездов (1,2% от общего их количества); - расходы на содержание дополнительных локомотивов и локомотивных бригад на 93 млн. рублей. Средний вес грузового поезда составлял около 4000 т. |
| 6. | 2008 | Восточно-Сибирская | Организовано движение СП общей массой 12000 т (Тайшет – Иркутск –Сортировочный и Слюдянка – Улан-Удэ), это привело к увеличению пропускной способности в период летних путевых работ на 12 – 14 поездов в сутки [13]. |
| 7. | 2017 | Забайкальская | На долю Забайкальской железной дороги приходится 25 % соединенных и проведенных поездов [14]. |
| 8. | 2019 | Западно-Сибирская, Горьковская, Северо-Кавказская | Организован пропуск СП массой 12000 и 14200 т с распределенной по составу тягой на некоторых направлениях данных дорог [15]. |
| 9. | 2021 | Свердловская | С начала 2021 года было проведено более 6 тыс. поездов повышенной массы 8000 т и 9000 т. По объёму перевозимого груза пять поездов массой 9000 т равны семи поездам массой 6300 т [16]. |

В период 1990–1996 гг. актуальность увеличения массы, а также длины грузовых поездов снизилась. В это время осуществлялся значительный скачок вниз объемов перевозок. Однако к концу девяностых годов для оптимизации эксплуатационной работы эта задача вновь стала актуальной. В свою очередь в этот период для выполнения оперативно-плановых регулировочных мероприятий в перевозочном процессе предусматривалось сдваивание составов [17].

В конце 2000 – начале 2001 гг. при попытке реализации на грузонапряженных направлениях нормы массы до 9000 тонн, а также длины до 100 условных вагонов железные дороги России столкнулись с рядом трудностей (рис. 2). Данные параметры не полностью соответствовали заявленным требованиям: полезная длина приемоотправочных путей была короче длины поезда, мощности электропитания не хватало для организации движения таких поездов и др.



Рис. 2. Проблемы объектов инфраструктуры

ВНИИЖТ совместно с Гипротранстэи и ВНИИАС выполнили сравнительные технико-экономические расчеты пропуска грузовых поездов с тремя вариантами унифицированных норм массы и длины: 4000 тонн и 57 условных вагонов, 6000 тонн и 71 условный вагон, 9000 тонн и 100 условных вагонов (рис. 3).

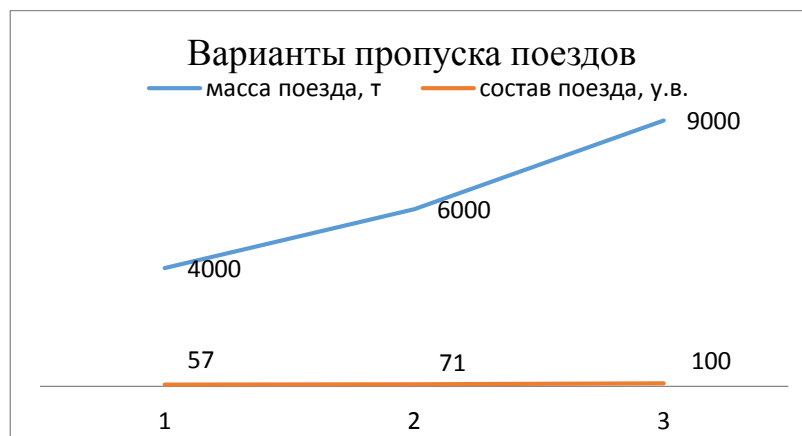


Рис. 3. Варианты пропуска грузовых поездов

После полученных результатов Министерство путей сообщения в 2002 г. приняло решение о введении организации движения поездов с массой 6000 тонн и длиной 71 условный вагон. Дальнейшие направления для инвестиционных вложений в развитие инфраструктуры представлено в распоряжении [18].

На рис. 4 представлен объем выполненной работы по удлинению приемоотправочных путей на железнодорожных станциях и вложенные инвестиции за два года.



Рис. 4. Результаты проделанной работы по улучшению инфраструктуры за два года

К 2010 году подготовлено к необходимым размерам перевозок более 35 тыс. километров.

На Восточном полигоне сети были испытания для пропуска поездов массой 7100 тонн. Основным фактором из инфраструктурных ограничений стала слабая мощность системы тягового электропитания на 17 перегонах Транссиба. Другим не менее важным результатом испытаний оказалось снижение удельного расхода электроэнергии на тягу до 10 % [19].

На Дальневосточной железной дороге в 2015 году по участку от Белогорска до станции Хабаровск II максимальный вес поезда повысился с 7100 тонн до 12000 тонн, а на участке Волочаевка-2 – Комсомольск-на-Амуре – с 4900 до 9800 тонн [20].

Средний вес грузового поезда в мае 2016 составил 4031 тонн, это максимальный показатель за всю историю российских железных дорог. Об этом заявил президент ОАО «РЖД» О. В. Белозеров [21].

В августе 2020 года железнодорожники на участке Петров Вал – имени Максима Горького – Гремячая удлинени плечо вождения соединённых поездов в полтора раза – до 410 км. Это позволило миновать сортировочную станцию имени Максима Горького без переработки и проводить расформирование на станции Гремячая. По данным специалистов применение данной технологии сокращает эксплуатационные расходы, уменьшается количество использованных «ниток» в графике движения. Также высвобождается инфраструктура для проведения технологических работ и движения поездов с

других направлений, увеличивается скорость доставки груза [22]. Под технологическими работами подразумеваются операции, которые выполняются с объектами инфраструктуры во время предоставления технологических «окон»: предусмотренных графиком движения поездов.

Анализ зарубежного опыта

Большой процент железных дорог в других странах применяют в перевозочном процессе СП, ППМД. Основные этапы развития тяжеловесного движения вне нашей страны представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные этапы развития вождения СП и ППМД в других странах

| № п/п | Страна | Железная дорога | Новшество, результат |
|-------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | США | NorfolkSouthern | В 1967 г. был проведен тяжеловесный длинносоставный поезд, длиной 6,4 км. В состав входило пятьсот вагонов-платформ, перевозивших уголь. Общий валовой вес груза составлял 47000 т, в то время данные объемы транспортировки груза считались рекордными [23]. |
| 2. | Китай | Daqing | С 2006 г. проводятся оптимизационные мероприятия, связанные с выбором схем грузовых перевозок. Вес грузового поезда увеличился с 5000 т до 10000–20000 т, а число пропущенных пар поездов в сутки увеличено с двух до 17. Кроме того было увеличено количество вагонов в составе с 204 до 210 [24]. |
| 3. | ЮАР | Сайшен – Салданыя | По данной дороге обращаются рудные маршруты массой до 22000 т, формируемые из 210 вагонов грузоподъемностью 85 т. |
| 4. | Бразилия | EstradacFerroVitoriaaMinas (EFVM), EstradadeFerroCarajas (EFC), FerrovialCentro-Atlantica (FCA) и FerrovialNotreSul (FNS) | При организации тяжеловесного движения используются вагоны с осевой нагрузкой 30,5 т/ось при более 200 вагонов в составе и массе поезда 22500 т. |
| 5. | Германия | | TrainDoubling [сдвоенный поезд] предусматривает пропуск соединенных поездов. Технология станет перспективной, если длина поезда увеличится до 1500 м и более [25, 26]. TrainCouplingandSharing (TSC) [сцепленный и распределенный поезд] предусматривает соединение на промежуточных пунктах поездов-модулей (групп вагонов с собственными тяговыми средствами соединяют между собой) следующих в одном направлении. Для реализации этой системы необходимо наличие автоматической сцепки и дистанционного управления локомотивами, распределенными по объединенному поезду. |

В США в данном направлении занимаются три компании: Union Pacific (UP), Norfolk Southern Railway, CXST. Они в разное время изменили методику использования метода нагрузки подвижного состава, увеличивая длину и вес грузового поезда, используя вагоны большей грузоподъемности (32,4 тс/ось) и увеличение вагонов в составе (120–150 вагонов) [27]. Для их вождения используется система телеуправления локомотивами, в состав включается специальный вагон с аппаратурой. А в состав поезда массой 10000–15000 тонн входит специальный вагон с компрессорной установкой для питания тормозной магистрали и пополнения утечек сжатого воздуха. Результаты исследований, проведенных на Полигоне ускоренных испытаний (FAST) Центра транспортных технологий (ТТЦ) в Пуэбло (штат Колорадо, США) показали, возможность дополнительного получения прибыли компаний за счет расширения полигона обращения тяжеловесных поездов.

В КНР тяжеловесное движение используется при перевозке каменного угля. Для этих целей в 1992 г. была спроектирована и построена специализированная железнодорожная линия Daqing [28, 29]. На данной линии была увеличена доля тяжеловесного движения до 50 млн тонн в год. Также в КНР

специалистам удалось решить технические проблемы и освоить технологию по пропуску тяжеловесных поездов с несколькими распределенными по составу электровозами [30].

На железной дороге Canadian Pacific курсируют длинносоставные поезда до 142 условных вагона, массой брутто 18500 тонн [31]. На магистрали Калгари – Ванкувер установлено 249 наполных лубрикаторов, которые подают смазку на головку рельса только при прохождении поезда; при этом не оказывающий вредного воздействия на окружающую среду состав распространяется колесами поезда на расстояние до 3 км в обе стороны от места его нанесения. Применение модификатора позволяет уменьшить трение между колесами всего поезда и рельсами, что способствует снижению воздействия на путь. В то же время уменьшение сил трения и оптимизация характеристик сцепления, достигнутые за счет улучшения состояния рабочих поверхностей рельсов, позволили сократить суммарное потребление дизельного топлива на тягу поездов в данном коридоре на 7,5 млн литров в год. Этот результат получен также благодаря инвестициям в новые технологии: автоматизированную систему Trip Optimizer, помогающую машинистам выбирать режимы ведения поезда, оптимальные с точки зрения расхода топлива. В целом инвестиции Canadian Pacific в мероприятия по организации эксплуатации длинносоставных поездов позволили повысить эффективность работы локомотивов и производительность труда персонала за счет выполнения заданного объема перевозок меньшим числом поездов и оптимального подбора тяговой мощности локомотивов в зависимости от массы поезда.

Организация тяжеловесного движения получила развитие в разных странах на всех континентах (табл. 3), в том числе и в России. Пока по некоторым направлениям Россия уступает показателям, которые представляют зарубежные железнодорожные компании.

Таблица 3

**Значимые показатели при организации тяжеловесного движения
на железных дорогах мира**

| Страна | Масса грузового поезда, тыс. т | Число вагонов в грузовом поезде, ваг |
|---------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Австралия | 48 | 320 |
| Бразилия | 22.5 | 206 |
| Канада | 13.2 | 110 |
| ЮАР | 41 | 342 |
| Китай | 20 | 200 |
| США | 16.46 | 120 |
| Россия | 9 | 100 |

Во всем мире растет доля железнодорожных перевозок тяжеловесными и длинносоставными поездами.

Выводы

1 Нарботанный практический опыт в области вождения соединенных поездов позволяет судить о перспективности этого способа повышения пропускной способности железнодорожных участков.

2 Использование вагонов со значительным повышением нагрузки на ось, по примеру США и ряда других стран, потребует замену железнодорожного пути на дорогах Российской Федерации.

3 Основными факторами, ограничивающими сквозное движение длинносоставных поездов и поездов повышенной массы с использованием имеющегося подвижного состава, выступают несоответствующая длина приемоотправочных путей станций и недостаточная располагаемая мощность системы тягового электроснабжения на отдельных участках.

4 Для магистральных железных дорог Российской Федерации необходимо определить инфраструктурные ограничения, препятствующие пропуску поездов массой 12000 тонн и длиной не менее 100 условных вагонов, и разработать программу по их снятию на основных грузонапряженных направлениях.

В отличие от существующего опыта использования соединенных поездов предлагается внедрить данную технологию в график движения поездов на постоянной основе с целью улучшения эксплуатационных показателей.

Список литературы

- 1 Показатели основной деятельности ОАО «РЖД» : официальный сайт. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9394/page/103290?id=17206> (дата обращения: 28.12.2022).
- 2 Показатели деятельности ОАО «РЖД» : официальный сайт. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377#cargo> (дата обращения: 28.12.2022).
- 3 **Кочнев, Ф. П.** Управление эксплуатационной работой железных дорог : учебное пособие для вузов / Ф. П. Кочнев, И. Б. Сотников. – Москва : Транспорт, 1990. – 424 с. – ISBN 5-277-00367-3.
- 4 Организация движения на железнодорожном транспорте : учебник / Д. П. Заглядимов, А. П. Петров, Е. С. Сергеев [и др.]. – Москва : Транспорт, 1985. – 357 с.
- 5 Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. – № 128. – 2010. – 180 с.
- 6 Экономика железнодорожного транспорта / Н. П. Терешина, В. Г. Галабурда, В. А. Токарев [и др.] : учебник для вузов ж.-д. транспорта / под ред. Н. П. Терешиной, Б. М. Лapidуса. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2011 – ISBN 978-5-9994-0067-3.
- 7 Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенного веса и длины на железных дорогах Российской Федерации (утверждена МПС РФ от 12 августа 2001 года № ЦД-ЦТ-851).
- 8 Распоряжения МПС РФ № 157у от 19.09.2003 г. «Об утверждении перечня основных направлений на сети железных дорог России».
- 9 Интенсификация использования подвижного состава и перевозочной мощности железных дорог / И. Г. Тихомиров, П. А. Сыцко, Е. П. Юшкевич [и др.]; под общей редакцией И. Г. Тихомирова. – Москва : Транспорт, 1968. – 264 с.
- 10 **Павловский, И. Г.** Организация движения сдвоенных поездов / И. Г. Павловский, А. С. Перминов, А. Д. Чернугов. – Москва : Транспорт, 1977. – 128 с.
- 11 **Шульженко, П. А.** Организация сдвоенных поездов как мера повышения провозной способности (опыт Приволжской и Восточно-Сибирской железных дорог). В книге Интенсификация использования подвижного состава и перевозочной мощности железных дорог / П. А. Шульженко. – Москва : Транспорт, 1968. – С. 185–219.

References

- 1 Indicators of the main activity of Russian Railways : official website. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9394/page/103290?id=17206> (date of access: 28/12/2022).
- 2 Performance indicators of Russian Railways : official website. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377#cargo> (date of access: 28/12/2022).
- 3 **Kochnev, F. P.** Managing the operational work of railways: course book for universities / F. P. Kochnev, I. B. Sotnikov. – Moscow : Transport, 1990. – 424 p. – ISBN 5-277-00367-3.
- 4 Organization of railway traffic: textbook / D. P. Zaglyadimov, A. P. Petrov, E. S. Sergeev [et al.]. – Moscow : Transport, 1985. – 357 p.
- 5 Instructions for calculating the available capacity of railways. – No. 128. – 2010. – 180 p.
- 6 Economics of railway transport / N. P. Tereshina, V. G. Galaburda, V. A. Tokarev [et al.] : a textbook for high school's railway transport / ed. N. P. Tereshina, B. M. Lapidus. – Moscow : UMTs ZHDT, 2011 – ISBN 978-5-9994-0067-3.
- 7 Instructions for organizing the circulation of freight trains of increased weight and length on the railways of the Russian Federation (approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation of August 12, 2001 No. TsD-TsT-851).
- 8 Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation No. 157u dated September 19, 2003 «On approval of the list of main directions on the Russian railway network».
- 9 Intensification of the use of rolling stock and transportation capacity of railways / I. G. Tikhomirov, P. A. Sytsko, E. P. Yushkevich [et al.]; under total ed. I. G. Tikhomirova. – Moscow : Transport, 1968. – 264 p.
- 10 **Pavlovsky, I. G.** Organization of the movement of dual trains / I. G. Pavlovsky, A. S. Perminov, A. D. Chernyugov. – Moscow : Transport, 1977. – 128 p.
- 11 **Shulzhenko, P. A.** Organization of double trains as a measure to increase the carrying capacity (experience of the Volga and East Siberian Railways). In the book Intensification of the use of rolling stock and transportation capacity of railways. – Moscow : Transport, 1968. – P. 185–219.

- 12 **Окипный, Л. Д.** Эксплуатационной работе – интенсивную технологию // Железнодорожный транспорт. – 1989. – № 5 – С. 11–15. – ISSN 0044-4448.
- 13 Пульс сети // Железнодорожный транспорт – 2008. – № 3. – 28 с. – ISSN 0044-4448.
- 14 Забайкальская магистраль. Время новых технологий // Гудок. – URL: <https://gudok.ru/zdr/172/?ID=1362262&archive=42144> (дата обращения: 28.12.2022).
- 15 **Юрин, Ю. Ю.** Тяжеловесное движение – гарант освоения растущих вагонопотоков / Ю. Ю. Юрин // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 12. – С. 20–22. – ISSN 0044-4448.
- 16 Уральская магистраль // Гудок. – Выпуск № 241. – 30.12.2021. – URL: <https://www.gudok.ru/zdr/181/?archive=59702> (дата обращения: 28.12.2022).
- 17 Оперативное управление движением на железнодорожном транспорте / А. К. Угрюмов, Г. М. Грошев, В. А. Кудрявцев [и др.]. – Москва : Транспорт, 1983. – 239 с.
- 18 Распоряжения МПС РФ № 157у от 19.09.2003 г. «Об утверждении перечня основных направлений на сети железных дорог России».
- 19 **Гапанович, В. А.** Среди приоритетов – скоростное пассажирское и тяжеловесное грузовое движение / В. А. Гапанович // Транспорт. Аналитический журнал. – 2015. – № 8. – С. 6–8.
- 20 На Дальневосточной железной дороге начались испытания по вождению соединенных поездов // Транспорт. – 2015. – № 3/1. – 28 с.
- 21 В мае средний вес грузового поезда на сети «РЖД» достиг рекордного показателя // Транспорт. – 2016. – № 6/3 (914). – 25 с.
- 22 **Каретникова, Л.** В одной связке. Вождение соединённых поездов позволяет увеличить скорость доставки грузов // Железнодорожник Поволжья. – 2021. – № 13. – 2 с. – URL: <https://gudok.ru/zdr/174/?ID=1551352&archive=56419> (дата обращения: 28.12.2022).
- 23 **Колышев, А. С.** Тяжеловесное движение как фактор увеличения провозной способности / А. С. Колышев // Казанская наука. – Казань : Казанский издательский дом. – 2016. – № 4. – С. 36–38. – ISSN 2078-9955.
- 24 Практика тяжеловесного движения на углевозной линии Датун-Циньхуандао в Китае // Железные дороги мира. – 2008. – № 7. – С. 26–30. – ISSN 0321-1495.
- 25 На железных дорогах мира // Железнодорожный транспорт – 2009. – № 4. – С. 78–79. – ISSN 0044-4448.
- 12 **Okipny, L. D.** Operational work – intensive technology // Railway transport. – 1989. – No. 5 – P. 11–15. – ISSN 0044-4448.
- 13 Pulse of the network // Railway transport – 2008. – No. 3. – 28 p. – ISSN 0044-4448.
- 14 Trans-Baikal Railway Time of new technologies // Gudok. – URL: <https://gudok.ru/zdr/172/?ID=1362262&archive=42144> (date of access: 28/12/2022).
- 15 **Yurin, Yu. Yu.** Heavy-haul traffic is a guarantor of the development of growing car traffic / Yu. Yu. Yurin // Railway transport. – 2017. – No. 12. – P. 20–22. – ISSN 0044-4448.
- 16 Ural Highway Issue // Gudok. – No. 241. – 12.30.2021. – URL: <https://www.gudok.ru/zdr/181/?archive=59702> (date of access: 28/12/2022).
- 17 Operational management of traffic in railway transport / A. K. Ugryumov, G. M. Groshev, V. A. Kudryavtsev [et al.]. – Moscow : Transport, 1983. – 239 p.
- 18 Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation No. 157u dated September 19, 2003 «On approval of the list of main directions on the Russian railway network».
- 19 **Gapanovich, V. A.** Among the priorities – high-speed passenger and heavy freight traffic / V. A. Gapanovich // Transport. Analytical journal. – 2015. – No. 8. – P. 6–8.
- 20 Tests for driving connected trains began on the Far Eastern Railway // Transport. – 2015. – No. 3/1. – 28 p.
- 21 In May, the average weight of a freight train on the Russian Railways network reached a record high // Transport. – 2016. – No. 6/3 (914). – 25 p.
- 22 **Karetnikova, L.** In one bundle. Driving connected trains allows you to increase the speed of delivery of goods // Zheleznodorozhnik Povolzhya. – 2021. – No. 13. – 2 p. – URL: <https://gudok.ru/zdr/174/?ID=1551352&archive=56419> (date of access: 28/12/2022).
- 23 **Kolyshev, A. S.** Heavy traffic as a factor in increasing carrying capacity / A. S. Kolyshev // Kazanskaya Nauka. – Kazan : Kazan Publishing House. – 2016. – No. 4. – P. 36–38. – ISSN 2078-9955.
- 24 The practice of heavy haul traffic on the Datong-Qinhuangdao coal line in China // Railways of the World. – 2008. – No. 7. – P. 26–30. – ISSN 0321-1495.
- 25 On the railways of the world // Railway transport – 2009. – No. 4 – P. 78–79. – ISSN 0044-4448.

26 740 m lange Güterzugestatt 52 Lkw // Der Eisenbahningenieur. – 2016. – No. 12. – 89 p.

27 **Lang, A.** Längere Güterzüge in Deutschland / A. Lang, M. Schultz-Wildelau // DeineBahn. – 2016. – No. 3. – P. 40–45.

28 **Zakharov, S. M.** Guidelines to best practices for heavy haul railway operations. Infrastructure construction and maintenance issues / Sergey M. Zakharov // Proceedings of 9th International heavy haul association. – Virginia Beach, Virginia. – 2009. – 645 p.

28 **Захаров, С. М.** Развитие тяжеловесного движения в мире / С. М. Захаров, К. П. Шенфельд // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 4. – С. 9–18. – ISSN 2223-9731.

29 **Huaxiang, Li.** Heavy haul electric on test / Li Huaxiang // Railway Gazette International. – 2015. – No. 8. – P. 62–63. – Перевод опубликован: Железные дороги мира. – 2015. – No. 10. – С. 59–61. – ISSN 0321-1495.

30 На железных дорогах мира // Железнодорожный транспорт. – 2009. – No. 3. – С. 78–79. – ISSN 0044-4448.

31 Длинносоставные поезда на железной дороге Canadian Pacific // Железные дороги мира. – No. 12. – 2011. – С. 9–13. – ISSN 0321-1495.

26 740 m lange Güterzugestatt 52 Lkw // Der Eisenbahningenieur. – 2016. – No. 12. – 89 p.

27 **Lang, A.** Längere Güterzüge in Deutschland / A. Lang, M. Schultz-Wildelau // DeineBahn. – 2016. – No. 3. – P. 40–45.

28 **Zakharov, S. M.** Guidelines to best practices for heavy haul railway operations. Infrastructure construction and maintenance issues / Sergey M. Zakharov // Proceedings of 9th International heavy haul association. – Virginia Beach, Virginia. – 2009. – 645 p.

28 **Zakharov, S. M.** Development of heavyweight movement in the world / S. M. Zakharov, K. P. Shenfeld // Vestnik VNIIZhT. – 2013. – No. 4. – P. 9–18. – ISSN 2223-9731.

29 **Huaxiang, Li.** Heavy haul electric on test / Li Huaxiang // Railway Gazette International. – 2015. – No. 8. – P. 62–63. – Translation published: Railways of the world. – 2015. – No. 10. – P. 59–61. – ISSN 0321-1495.

30 On the railways of the world // Railway transport. – 2009. – No. 3 – P. 78–79. – ISSN 0044-4448.

31 Long trains on the Canadian Pacific Railway // Railways of the world. – No. 12. – 2011. – P. 9–13. – ISSN 0321-1495.

V. V. Zubkov, N. F. Sirina, P. E. Raevskaya, N. V. Rayevsky

STAGES IN THE DEVELOPMENT OF DRIVING CONNECTED TRAINS AND TRAINS OF INCREASED WEIGHT AND LENGTH

Abstract. It is analyzed the introduction of connected trains, increased mass and length on the railways of the Russian Federation. The possibilities of their operation in some countries are also considered: the USA, South Africa, China, etc.

The practice of driving connected trains and increased mass and length creates opportunities for further growth in freight turnover, increasing the throughput of existing railway sections, allows you to quickly respond to changes in traffic volume without increasing the number of trains or refusals to fulfill orders, which contributes to an increase in the level of customer focus.

The main factors limiting the through movement of long trains and trains of increased mass using the existing rolling stock are the short length of the stations' receiving and departure tracks and the insufficient available capacity of the traction power supply system on certain sections of the railways.

Keywords: transportation process, freight trains, heavy trains, connected trains, trains of increased mass and length, operating efficiency of connected trains and increased mass and length.

For citation: Stages in the development of driving connected trains and trains of increased weight and length / V. V. Zubkov, N. F. Sirina, P. E. Raevskaya, N. V. Rayevskiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 76–85. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_76.

Сведения об авторах**Зубков Валерий Валерьевич**

Акционерное общество
«Научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации и связи на
железнодорожном транспорте»,
кандидат технических наук, доцент,
руководитель научно-технического комплекса
интеллектуальных систем контроля и управления,
e-mail: zubkovvv1973@gmail.com

Сирина Нина Фридриховна

Уральский государственный университет путей
сообщения (УрГУПС),
доктор технических наук, профессор,
проректор по учебной работе и связям с
производством,
e-mail: nsirina@usurt.ru

Раевская Полина Евгеньевна

Забайкальский институт железнодорожного
транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский
государственный университет путей сообщения»
(ЗабИЖТ ИрГУПС),
кафедра «Управление процессами перевозок»,
старший преподаватель,
e-mail: polina.volo@mail.ru

Раевский Николай Владимирович

Забайкальский институт железнодорожного
транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский
государственный университет путей сообщения»
(ЗабИЖТ ИрГУПС),
кафедра «Электроснабжение»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: raevskiy_nik@mail.ru

Information about the authors**Zubkov Valery Valerievich**

Joint-Stock Company «Research and Design
Institute of Information, Automation and
Communication in Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of the Scientific and Technical Complex of
Intelligent Control and Management Systems,
e-mail: zubkovvv1973@gmail.com

Sirina Nina Fridrikhovna

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Vice-Rector for Academic Affairs and Production
Relations,
e-mail: nsirina@usurt.ru

Raevskaya Polina Evgenievna

Zabaikalsky Railway Transport Institute (ZabIZHT
ISTU),
Chair «Transportation Process Management»,
Senior Lecturer,
e-mail: polina.volo@mail.ru

Rayevsky Nikolay Vladimirovich

Zabaikalsky Railway Transport Institute (ZabIZHT
ISTU),
Chair «Power Supply»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: raevskiy_nik@mail.ru

Л. В. Маколова, Э. А. Мамаев

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ НА ОСНОВЕ РЕИНЖИНИРИНГА ИНФРАСТРУКТУРЫ

Аннотация. Рост населения крупных городов России приводит к ухудшению экологической ситуации, вызванной увеличением загрязнения окружающей среды от использования общественного и индивидуального транспорта. Разрешение данной проблемы рассматривается по двум направлениям снижения негативного воздействия транспортной сферы на окружающую среду: переход на использование экологически чистого топлива и внедрение практики эксплуатации железнодорожного транспорта для внутригородских перевозок.

Проведен анализ типовой маршрутной сети общественного транспорта, проанализированы факторы, влияющие на возможность развития железнодорожных путей сообщения в городских условиях, изучен опыт других крупных городов России.

Представлена модель развития оптимизации маршрутной сети с позиций экологического развития, а также направления развития общественного транспорта г. Ростова-на-Дону.

Ключевые слова: экологизация, транспорт, перспективное планирование, автомобильный транспорт, загрязнение окружающей среды, городские транспортные системы, городской железнодорожный транспорт.

Для цитирования: Маколова, Л. В. Экологизация транспортной деятельности на урбанизированных территориях на основе реинжиниринга инфраструктуры / Л. В. Маколова, Э. А. Мамаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_86.

Введение

Одной из проблем социально-экономического развития населенных пунктов и городов, требующих первоочередного решения, является загрязнение окружающей среды вследствие эксплуатации общественных и индивидуальных транспортных средств. Проблема обусловлена использованием транспорта, оснащённого бензиновыми или дизельными двигателями, при работе которых происходит загрязнение атмосферы выбросами загрязняющих токсичных веществ, а также попаданием нефтесодержащих веществ и реагентов, очищающих дороги, в почву и водные источники при техническом обслуживании транспортных средств. Рост населенных пунктов увеличивает потребность в транспортных услугах, вследствие чего соответственно растут интенсивность и площадь загрязнения. При этом эффективное функционирование транспортной системы обеспечивает непрерывность материальных потоков в структуре пространственной организации предпринимательской деятельности, а также перемещение населения.

Современные экономические условия функционирования предприятий характеризуются смелой парадигмы управления в направлении экологизации деятельности, ориентированной на защиту окружающей среды. Это требует пересмотра существующих подходов к сущности производственных процессов и потребляемых ресурсов при производстве продукции или осуществлении услуги. Развитие транспорта и производства привело к существенному загрязнению окружающей среды вследствие выбросов и возникновения отходов производственной деятельности [2]. «До 70 % всех вредных выбросов приходится на автомобильный транспорт, что составляет около 22 млн т загрязняющих веществ. Номенклатура загрязняющих веществ включает в себя вещества различного происхождения: оксид и диоксид углерода, оксиды азота, углеводороды, соединения свинца, серы, твердые частицы, альдегиды, канцерогенные вещества» [5]. Поэтому стратегия развития предприятий в современных условиях предполагает необходимость учета экологических принципов. Степень загрязнения окружающей среды от производственной деятельности является значительной, вследствие чего необходимо переориентирование бизнес процессов в эколого ориентированном направлении. В частности, исследование процесса эксплуатации транспортных средств при осуществлении поставок сырья, материалов и готовой продукции показывает, что при реализации этого процесса происходит загрязнение окружающей среды

выбросами от сгорания топлива и возникновения опасных отходов (отработанных автомобильных покрышек, аккумуляторов и т.д.).

Рассмотрение проблемы развития транспортных систем города в современных условиях функционирования предполагает проведение исследования с учетом двух проблем.

Первая проблема заключается в повышении эффективности функционирования транспортных систем без ущерба населенному пункту. Данное обстоятельство определяет необходимость развития транспортных систем с учетом требований по шумовой нагрузке, безопасности перемещения жителей населенного пункта, сокращения территорий, занятых под объекты транспортной инфраструктуры: парковки транспортных средств, дорожная инфраструктура и т. д.

Вторая проблема заключается в необходимости эколого ориентированного развития городских транспортных систем, предполагающей внедрение экологически чистых транспортных процессов, транспортных средств, работающих на топливе, характеризующемся минимальными объемами выбросов загрязняющих веществ в атмосферу или их полным отсутствием [12, 13].

Изучение мирового опыта снижения транспортного воздействия на окружающую среду показало применение широкого спектра методов. На основе теоретических исследований неравновесного спроса и предложения транспортных услуг городской агломерации формируются механизмы, позволяющие оценить изменение транспортной загруженности при изменении режимов работы общественного транспорта и уровня использования индивидуального транспорта. Например, для снижения транспортной загруженности в Греции применяется подход, определяющий право пользования автомобилем в определенные дни в зависимости от того, четным или нечетным числом является номерной знак автомобиля. В Сингапуре рост автомобильного парка регулируется на основе планирования. При этом нормативный рост автопарка равен 3 %. Достижение данного показателя происходит на основе ограничений на объемы продаж автомобилей и повышения цен на них [1, 4, 10, 14].

Одним из методов решения данных проблем является подход, основанный на реинжиниринге процессов. Реинжиниринг является одним из методов совершенствования бизнес-процессов, основывающихся на коренной перестройке существующего процесса. Цель применения данного подхода заключается в получении нового улучшенного бизнес-процесса на основе внедрения нового подхода к управлению. Реинжиниринг позволяет не только улучшить существующий процесс, но и получить новый эффект в сопряженной области деятельности. Так как, например, реинжиниринг транспортного процесса на основе использования транспортных средств, потребляющих экологически чистое топливо, позволяет помимо получения экономического эффекта получить экологический эффект при выполнении транспортных операций.

Материалы и методы

Каждый крупный населенный пункт, как правило, обладает схожими проблемами: загруженность центра города, высокое загрязнение воздуха на самых загруженных участках движения, дублирование маршрутов общественного транспорта, пробки в часы пик и др., которые приводят к снижению эффективности перевозочного процесса, ухудшению экологической обстановки и качества жизни населения. Эти факторы требуют разработки механизмов, позволяющих стимулировать предприятия к переходу на эколого ориентированное функционирование. Можно выделить следующие направления развития бизнес-процессов транспортных предприятий в рамках данного механизма:

- использование транспортных средств, работающих на газомоторном топливе;
- маршрутизация перевозок с учетом загруженности магистралей и использованием маршрутов-обходов населённых пунктов;
- создание логистической цепи поставок на основе использования варианта смешанных перевозок и консолидации грузов;
- переориентация железнодорожной инфраструктуры, расположенной внутри населённого пункта на обеспечение городских пассажирских перевозок.

В настоящее время наблюдается интенсивный рост загрязнения окружающей среды вследствие увеличения количества эксплуатируемых транспортных средств, работающих на бензине или дизельном топливе. Особую опасность составляют отработанные выхлопные газы, которые содержат вредные для человека и окружающей среды химические элементы. Помимо выхлопных газов опасность представляет мелкодисперсная пыль, скапливающаяся вдоль обочин транспортных магистралей. Исследование уровня загрязнения вдоль автомобильных магистралей показало наличие полосы загрязне-

ния, которая дифференцируется в зависимости от интенсивности движения и топографических особенностей местности. Особой актуальностью обладает необходимость снижения данных видов загрязнения в границах мегаполиса, так как вдоль транспортных магистралей располагаются жилые кварталы.

Целью представленного исследования является предложение вариантов снижения уровня загрязнения мегаполиса предоставлением транспортных услуг на основе использования экологически чистых видов транспорта: автомобильного транспорта, функционирующего на газомоторном топливе, и железнодорожного транспорта.

В рамках данного исследования было проведено рассмотрение изменения уровня загрязнения окружающей среды в г. Ростове-на-Дону при использовании различных видов общественного транспорта. На основе анализа модельного маршрута, по которому следуют транспортные средства, был рассмотрен процесс доставки пассажиров и загрязнение данной территории в рамках реализации маршрута (таблица). При проведении расчетов использовался коэффициент, взятый из списка Департамента окружающей среды Великобритании (Defra), который учитывает количество углекислого газа «CO₂», выделяемого при использовании транспортных средств и в соответствии с Распоряжением от 16 апреля 2015 г. № 15-р «Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации» [6].

Результаты

Анализ перевода каждого маршрута городского (общественного) транспорта на экологические виды транспорта должны предварять технические решения (таблица). «Один из главных источников загрязнения окружающей среды – это выхлопные газы автотранспорта. Они содержат опасные для экологии и здоровья человека химические соединения: оксиды углерода и азота, углеводороды, сажу, сернистый ангидрид, тетраэтилсвинец и другие» [6]. Несомненным вектором и тенденцией развития предприятий транспортной отрасли является минимизация вредного воздействия транспорта на экологию и здоровье человека.

Сравнение общественного транспорта по модельному маршруту в г. Ростове-на-Дону

| Наименование критерия | Наименование транспортного средства | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------|---------|
| | автобус на дизельном топливе | автобус на газомоторном топливе | троллейбус | трамвай |
| Протяженность маршрута, км | 15,4 | 16 | 12,3 | 14,4 |
| Число пассажиров, перевезенных в течение 1 часа наблюдения | 194 | 168 | 96 | 55 |
| Коэффициент выброса углекислого газа на 1 км следования транспортного средства, кг/1 чел/1 км | 0,069 | 0,069 | 0,042 | 0,042 |
| Количество выбросов углекислого газа в почву транспортным средством, кг/чел/км | 206,14 | 185,47 | 49,59 | 33,26 |
| Выбросы загрязняющих веществ при эксплуатации | + | - | - | - |
| Отработанные автомобильные прокрышки (наличие) | + | + | + | - |
| Аккумуляторы (наличие) | + | + | + | - |
| Смазочные материалы (наличие) | + | + | + | + |

В настоящее время наиболее экологически чистым и доступным по стоимости является газомоторное топливо. Немаловажным фактором выступают затраты, которые необходимы для организации перехода транспортного средства на использование газомоторного топлива. Стоимость развития обеспечивающей инфраструктуры газомоторного топлива при растущем объеме потребления газа, доработка и совершенствование двигателей, стоимость негативного воздействия на окружающую среду при сегодняшней конъюнктуре рынка и сложившемся соотношении цен оказываются экономически выгодными по сравнению с другими видами топлива [6, 11].

Механизм функционирования транспортной системы мегаполиса многими учеными рассматривается с позиции совокупности управляемых и неуправляемых транспортных потоков. С помощью теории графов осуществляется описание взаимодействия элементов транспортной системы в транспортных узлах [3, 8].

На основе проведенного исследования предлагается модель эколого ориентированной транспортной системы мегаполиса с позиции упорядочения различных видов используемого транспорта в зависимости степени воздействия его на окружающую среду в процессе эксплуатации.

Представим транспортную систему мегаполиса как совокупность n маршрутов ($i=1,2,\dots,n$) транспорта, по каждому маршруту происходит перемещение m ($j=1,2,\dots,m$) видов единиц транспортных средств. Пусть известны:

l_i – протяженность маршрута i ;

α_i^j – затраты, связанные с загрязнением окружающей среды за счет используемого топлива на маршруте i при использовании единицы вида транспортного средства j на км пути;

β_i^j – затраты, связанные с загрязнением окружающей среды за счет прочих загрязняющих средств на маршруте i при использовании единицы вида транспортного средства j на км пути;

p^j – пассажиропоток, обеспечиваемый единицей транспортного средства вида j ;

w^j – наличный парк транспортных средств вида j для обеспечения перевозок;

z^j – затраты, связанные с ликвидацией (реализация, утилизация) транспортного средства вида j для обеспечения перевозок;

r^j – затраты, связанные с приобретением транспортного средства вида j для обеспечения перевозок;

P_i – пассажиропоток на маршруте i ;

A – предельное допустимое загрязнение окружающей среды общественным транспортом за счет используемого топлива в стоимостном выражении;

B – предельное допустимое загрязнение окружающей среды общественным транспортом за счет прочих загрязняющих средств в стоимостном выражении;

R – общие (предельные) затраты на обновление транспортных средств для обеспечения перевозок.

Обозначим x_i^j – число транспортных средств j вида на маршруте i . Тогда модель задачи оптимизации эколого ориентированной транспортной системы мегаполиса с целью снижения ее воздействия на окружающую среду имеет вид:

$$U(x) = \min_x \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_i^j \beta_i^j l_i x_i^j, \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^m p^j x_i^j \geq P_i, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_i^j l_i x_i^j \leq A, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_i^j l_i x_i^j \leq B, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n x_i^j - w^j \right) z^j \operatorname{sign} \left(\sum_{i=1}^n x_i^j - w^j \right) + \quad (5)$$

$$+ \left(w^j - \sum_{i=1}^n x_i^j \right) r^j \operatorname{sign} \left(w^j - \sum_{i=1}^n x_i^j \right) \leq R.$$

Ограничения (2)–(5) выражают удовлетворение общественным транспортом потребности в перевозках, выполнение требований по загрязнению окружающей среды выбросами от сжигания топлива, выполнение требований по загрязнению окружающей среды прочими отходами от работы общественного транспорта, удовлетворение требований на достаточность средств на перевод транспорта на экологически безопасные, соответственно.

В настоящее время можно отметить реализацию стратегии переориентирования общественного

транспорта на использование экологически чистых видов транспорта: трамваев, троллейбусов и автобусов, работающих на газомоторном топливе.

По состоянию на 01.01.2022 количество подвижного состава общественного транспорта в г. Ростове-на-Дону составляет 1466 единиц, из которых экологически чистый транспорт (трамваи и троллейбусы) составляет около 8 % от общего числа, автобусы стандарта Евро-5, работающие на газомоторном топливе, – 15 % от общего числа.

Обсуждение

Одним из направлений снижения уровня загрязнения при эксплуатации транспортных средств является перераспределение транспортной нагрузки на железнодорожный транспорт. В начале 2010-х идея реализации метрополитена уступила возможности строительства «легкого метро» – надземных железнодорожных линий, реализовавшихся впоследствии в проект «Городской электрички». Увеличение площади города совместно с возросшей необходимостью соединения жилых массивов города высокоскоростным внеуличным транспортом привело к идее создания кольцевой системы железнодорожного транспорта.

Одним из вариантов использования железнодорожного транспорта является вариант закольцованного движения электропоездов с учетом уже существующих путей (Ростов-Главный – ст. Сельмаш), а также движение по кольцевым маршрутам, проходящим через левобережные районы города.

Идея создания кольцевого железнодорожного сообщения не является революционной для реалий нашей страны. В крупнейшем городе России – Москве для решения транспортных проблем в 2016 году был реализован проект Московского центрального кольца (МЦК), а также сопутствующий ему проект Московских центральных диаметров (МЦД). Общая длина линий МЦК составила 54 километра, была построена и спроектирована 31 станция для создания транспортно-пересадочных узлов. С открытием МЦК стало доступно более 350 вариантов перемещения по территории города. Интеграция МЦК с городским общественным транспортом, а также с Московским метрополитеном позволила существенно разгрузить центральные транспортные артерии города, снизив не только напряженность на дорогах в утренние и вечерние часы, но и поспособствовав уменьшению уровня загрязнения окружающей среды. МЦК открыло для пассажиров новые и быстрые маршруты. Кольцо прошло по территории 26 районов Москвы, сделав их доступнее. МЦК стало либо альтернативой, либо удобным дополнением при планировании поездки. У части пассажиров пропала потребность ехать на пригородном поезде до вокзалов, чтобы пересесть на другой вид транспорта [1].

Данное решение транспортных проблем вполне применимо для крупных городов, имеющих схожие проблемы [7–9]:

- наличие нескольких крупных спальных районов;
- наличие крупных градообразующих предприятий, расположенных на большом удалении друг от друга;
- транспортная загруженность крупных улиц города в утренние и вечерние часы;
- высокая стоимость реализации масштабных инфраструктурных проектов (строительство метрополитена).

Для строительства железной дороги требуется уделять особое внимание географическим особенностям местности. Технические решения, предусматриваемые в проектах железной дороги, должны обеспечивать охрану литосферы, атмосферы, флоры и фауны, рациональное использование земельных ресурсов, увязку дороги с ландшафтом, сохранение исторических, этнографических и архитектурных памятников. Железные дороги со всеми сооружениями и устройствами занимают достаточно большие площади, поэтому актуальной является задача сокращения этих площадей, особенно в районах с развитым сельским хозяйством.

В настоящий момент суммарная протяженность железнодорожных путей в г. Ростове-на-Дону составляет 59,6 км. Модернизация путевой инфраструктуры позволит увеличить протяженность путей, используемых для внутригородских перевозок населения.

«Растущая загруженность автомобильной инфраструктуры и объективный рост транспортной активности населения требует принятия системных и долгосрочных решений, которые позволят повысить эффективность железнодорожной системы в целом. Одним из инструментов повышения эффективности железнодорожного транспорта является развитие скоростных и высокоскоростных межрегиональных сообщений, которые призваны сблизить субъекты Российской Федерации» [3, 14].

Развитие высокоскоростного движения послужит стимулом для экспорта прогрессивных зарубежных технологий, станет причиной массового создания новых рабочих мест. В рамках реализации Стратегии развития железнодорожного комплекса Российской Федерации до 2030 года, а также согласно планам строительства высокоскоростных магистралей (ВСМ) в России запланирована прокладка ВСМ Москва – Ростов-на-Дону – Адлер. Одним из вариантов прохождения магистрали может стать движение поездов в западной части города за микрорайоном Левенцовский. Степной ландшафт, удаленность от загруженного транспортом центра города позволяют создать новый перспективный транспортно-пересадочный узел. Подведение маршрутов общественного транспорта, а также быстрая пересадка на пригородные электропоезда позволят модернизировать существующую маршрутную сеть, снизить затраты пассажиров на перемещение до железнодорожного вокзала, а введение единой системы оплаты проезда позволит сэкономить от 3 до 10 рублей от стоимости каждой поездки.

Заключение

Интенсивное увеличение городских агломераций сопровождается увеличением количества автомобильного транспорта, эксплуатация которого приводит к необходимости формирования объектов транспортной инфраструктуры, что приводит к сокращению площадей, занятых растениями, вырабатывающими кислород. Эксплуатация транспортных средств приводит не только к выбросам загрязняющих веществ, но и шумовым воздействиям в населенных пунктах, накоплению отходов, возникающих при использовании транспорта. В связи с чем проблема сокращения воздействия транспортной сферы на окружающую среду должна решаться в следующих направлениях: сокращении выбросов загрязняющих веществ в атмосферу; организации механизмов сбора и переработки отходов транспортной сферы (автомобильных покрышек, отработанных смазочных материалов и т.д.); оптимизации функционирования транспортной инфраструктуры с позиции сокращения загрязнения и шумовой нагрузки [3, 11, 14]. На основе проведенного исследования была разработана стратегия экологизации транспортной системы, представленная на рисунке.

Таким образом, можно заключить, что в настоящее время назрела необходимость пересмотра стратегии развития транспортных предприятий с позиции экологизации деятельности. На основе проведенных исследований можно заключить, что процесс экологизации является сложным и требует значительных капиталовложений. Первым шагом по эколого ориентированному развитию в рамках стратегии развития транспортного предприятия является реализация процесса обновления основных производственных фондов предприятия в направлении использования экологически чистых видов транспорта – автомобилей, работающих на газомоторном топливе или электромобилей. Одновременно с этим необходима существенная поддержка транспортной деятельности со стороны государственных структур и бизнеса, заключающаяся в формировании инфраструктуры необходимой для эксплуатации данных видов транспорта.



Направления перспективного развития транспортных предприятий на основе процессов экологизации деятельности

Список литературы

1 Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 918. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031.

2 Integration of thermal power plant wastes into environmentally-oriented economic development / S. P. Kiseleva, Ya. D. Vishnyakov, S. A. Pukhov [et al.]. – 2020. – No. 11. – P. 64–66. – DOI 10.18796/0041-5790-2020-11-64-66.

3 **Guda, A. N.** Executable logic prototypes of systems engineering complexes and processes on railway transport / A. N. Guda, V. V. Ilicheva, O. N. Chislov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 680. – P. 161–170. – DOI 10.1007/978-3-319-68324-9_18.

4 **Li, C.-B.** Supply and demand non-equilibrium model of city agglomeration transportation system / C.-B. Li // Jiaotong Yunshu Xitong Gongcheng Yu Xinxin = Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. – 2017. – 17(1). – P. 47–53. – URL: <https://doi.org/10.1155/2015/502739>.

5 **Маколова, Л. В.** К вопросу совершенствования механизмов управления рисками на предприятии на основе логистического подхода / Л. В. Маколова // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 64–2. – С. 59–62. – DOI 10.18411/lj-08-2020-47.

6 **Маколова, Л. В.** К вопросу снижения экологических рисков транспортного предприятия на основе рационального природопользования / Л. В. Маколова // Вестник университета. – 2019. – № 7. – С. 69–75. – DOI 10.26425/1816-4277-2019-7-69-75.

7 **Мамаев, Э. А.** К оценке потенциала развития международного транспортного коридора : теоретические аспекты / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин, И. Д. Долгий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4. – С. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

8 Imitation and analytical approaches to assessment of condition and modeling of city transport system nodes / E. A. Mamaev, N. A. Kovaleva, A. I. Khashev, O. V. Mulyenko // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – 786(1), 012086. – DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012086.

9 **Mikhaylyk, M.** Empirical markers in the concept of digital logistics of multichannel supply chains / M. Mikhaylyk, V. Baginova, E. Mamaev // E3S Web

References

1 Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 918. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031.

2 Integration of thermal power plant wastes into environmentally-oriented economic development / S. P. Kiseleva, Ya. D. Vishnyakov, S. A. Pukhov [et al.]. – 2020. – No. 11. – P. 64–66. – DOI 10.18796/0041-5790-2020-11-64-66.

3 **Guda, A. N.** Executable logic prototypes of systems engineering complexes and processes on railway transport / A. N. Guda, V. V. Ilicheva, O. N. Chislov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 680. – P. 161–170. – DOI 10.1007/978-3-319-68324-9_18.

4 **Li, C.-B.** Supply and demand non-equilibrium model of city agglomeration transportation system / C.-B. Li // Jiaotong Yunshu Xitong Gongcheng Yu Xinxin = Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. – 2017. – 17(1). – P. 47–53. – URL: <https://doi.org/10.1155/2015/502739>.

5 **Makolova, L. V.** On the issue of improving risk management mechanisms at an enterprise based on a logistic approach / L. V. Makolova // Trends in the development of science and education. 2020. – No. 64–2. – P. 59–62. – DOI 10.18411/lj-08-2020-47.

6 **Makolova, L. V.** On the issue of reducing the ecological risks of a transport enterprise on the basis of rational environmental management / L. V. Makolova // Vestnik universiteta. 2019. – No. 7. – P. 69–75. – DOI 10.26425/1816-4277-2019-7-69-75.

7 **Mamaev, E. A.** For assessment of the potential international transport corridor development : theoretical aspects / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin, I. D. Dolgiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4. – P. 89–101. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_4_89.

8 Imitation and analytical approaches to assessment of condition and modeling of city transport system nodes / E. A. Mamaev, N. A. Kovaleva, A. I. Khashev, O. V. Mulyenko // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – 786(1), 012086. – DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012086.

9 **Mikhaylyk, M.** Empirical markers in the concept of digital logistics of multichannel supply chains / M. Mikhaylyk, V. Baginova, E. Mamaev // E3S

of Conferences. – 2019. – Vol. 229. – DOI 10.1051/e3sconf/20199108056.

10 **Montwill, A.** The role of Integrated Logistics Centers (ILCs) in modelling the flows of goods in urban areas based on the example of Italy / A. Montwill, O. Pietrzak, K. Pietrzak // Sustainable Cities and Society. – 2021. – DOI 10.1016/j.scs.2021.102851.

11 What influences the effectiveness of green logistics policies? A grounded theory analysis / Wei Zhang, Mingyang Zhang, Wen Yao Zhang [et al.] // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 714. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.136731.

12 **Agyabeng-Mensah, Y.** Exploring financial performance and green logistics management practices : Examining the mediating influences of market, environmental and social performances / Y. Agyabeng-Mensah, E. Afum, E. Ahenkorah // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 258. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120613.

13 **Yao, E.-J.** Research on supply and demand non-equilibrium depth of urban agglomeration transportation system / E.-J. Yao, T.-W. Lu // CICTP 2017 : Transportation Reform and Change – Equity, Inclusiveness, Sharing, and Innovation – Proceedings of the 17th COTA International Conference of Transportation Professionals, 2018. – URL: <https://DOI.org/10.1155/2018/2051606>.

14 Methodological bases of modeling and optimization of transport processes in the interaction of railways and maritime transport / O. Chislov, V. Zadorozhniy, D. Lomash [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1083 AISC. – P. 79–89. – DOI 10.1007/978-3-030-34069-8_7.

Web of Conferences. – 2019. – Vol. 229. – DOI 10.1051/e3sconf/20199108056.

10 **Montwill, A.** The role of Integrated Logistics Centers (ILCs) in modelling the flows of goods in urban areas based on the example of Italy / A. Montwill, O. Pietrzak, K. Pietrzak // Sustainable Cities and Society. – 2021. – DOI 10.1016/j.scs.2021.102851.

11 What influences the effectiveness of green logistics policies? A grounded theory analysis / Wei Zhang, Mingyang Zhang, Wen Yao Zhang [et al.] // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 714. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.136731.

12 **Agyabeng-Mensah, Y.** Exploring financial performance and green logistics management practices : Examining the mediating influences of market, environmental and social performances / Y. Agyabeng-Mensah, E. Afum, E. Ahenkorah // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 258. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120613.

13 **Yao, E.-J.** Research on supply and demand non-equilibrium depth of urban agglomeration transportation system / E.-J. Yao, T.-W. Lu // CICTP 2017 : Transportation Reform and Change – Equity, Inclusiveness, Sharing, and Innovation – Proceedings of the 17th COTA International Conference of Transportation Professionals, 2018. – URL: <https://DOI.org/10.1155/2018/2051606>.

14 Methodological bases of modeling and optimization of transport processes in the interaction of railways and maritime transport / O. Chislov, V. Zadorozhniy, D. Lomash [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1083 AISC. – P. 79–89. – DOI 10.1007/978-3-030-34069-8_7.

L. V. Makolova, E. A. Mamaev

ECOLOGIZATION OF THE TRANSPORT ACTIVITIES IN URBANIZED AREAS BASED ON INFRASTRUCTURE REENGINEERING

Abstract. The growth of the population of large cities in Russia leads to a deterioration in the environmental situation caused by an increase in environmental pollution from the use of public and individual transport. The resolution of this problem is considered in two directions to reduce the negative impact of the transport sector on the environment: the transition to the use of environmentally friendly fuel and the introduction of the practice of operating railway transport for intercity transportation.

The analysis of a typical route network of public transport has been carried out, the factors influencing the possibility of developing railway lines in urban conditions have been analyzed, and the experience of other large Russian cities has been studied.

A model for the development of optimization of the route network from the standpoint of environmental development, as well as the direction of development of public transport in the city of Rostov-on-Don, is presented.

Keywords: ecologization, transport, long-term planning, road transport, environmental pollution, urban transport systems, urban rail transport.

For citation: Makolova, L. V. Ecologization of the transport activities in urbanized areas based on infrastructure reengineering / L. V. Makolova, E. A. Mamaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_86.

Сведения об авторах

Маколова Людмила Викторовна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Логистика и управление
транспортными системами»,
доктор экономических наук, доцент,
профессор кафедры,
e-mail: makolova76@mail.ru

Мамаев Энвер Агапашаевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Логистика и управление
транспортными системами»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: mamaev_enver@mail.ru

Information about the authors

Makolova Lyudmila Viktorovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Logistics and Management of Transport
Systems»,
Doctor of Economic Sciences, Professor,
e-mail: makolova76@mail.ru

Mamaev Enver Agapashaevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Logistics and Management of transport
Systems»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of Chair,
e-mail: mamaev_enver@mail.ru

Минь Тьен Нгуен, А. В. Багинов

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОРГАНИЗАЦИИ И РАЗВИТИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ ВЬЕТНАМА

Аннотация. Рассматриваются проблемы в логистических центрах Вьетнама, что является актуальной темой в свете развития логистической инфраструктуры этой страны и разработке имитационных моделей для логистических центров Лаокай и Фуок Лонг с помощью программного обеспечения AnyLogic. Использование имитационных моделей Лаокай и Фуок Лонг позволило более точно оценить эффективность работы этих логистических центров и выявить возможные узкие места в их функционировании. Реализация имитационного моделирования мер приведет к улучшению работы уже существующих логистических центров и формированию более эффективной и конкурентоспособной логистической системы в Республике Вьетнам. Оптимизация логистических процессов в стране способствует развитию международной торговли и улучшению экономических показателей региона.

Ключевые слова: транспорт, транспортно-инфраструктурная система, транспортная технология, логистический центр, имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование.

Для цитирования: Нгуен, Минь Тьен. Применение имитационного моделирования в организации и развитии логистических центров Вьетнама / Минь Тьен Нгуен, А. В. Багинов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 95–105. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_95.

Введение

В настоящее время логистика является очень важным элементом экономики, играющим незаменимую роль в производстве, распределении и обращении товаров, особенно в повышении эффективности производственной деятельности и бизнеса во всех сферах. Наряду с развитием логистики формирование логистических центров (ЛЦ) стало мировой тенденцией благодаря увеличению скорости физических и финансовых потоков, сокращению количества посредников в транспортно-логистической цепочке [1, 2]. Построенные ЛЦ созданы для выполнения основных функций, таких как: складирование, погрузка и выгрузка, сбор товаров, сортировка товаров, координация распределения товаров, оптимальное хранение товаров, создание добавленной стоимости, передача, возвратная логистика, стимулирование торговли и потребления и др. [1, 2].

Согласно рейтингу Всемирного банка, Республика Вьетнам в настоящее время занимает 64-е место из 160 стран по уровню развития логистики и 4-е место в регионе АСЕАН после Сингапура, Малайзии и Таиланда. С годовым темпом роста 14–16 % логистика является одной из самых быстрорастущих и стабильных отраслей услуг в республике за последние годы [3]. С растущим экономическим потенциалом и географическим положением, являющимся важным связующим звеном Восточной Азии и мира, Республика Вьетнам имеет полноценный потенциал стать ЛЦ в Азии и мире.

В работе проведен анализ состояния и перспектив развития ЛЦ во Вьетнаме для освоения перспективных объемов потоков. В качестве методического инструментария выбрано имитационное моделирование процессов в ЛЦ.

Основная часть

Согласно данным за 2015 и 2020 годы, а также прогнозам до 2030 года спрос на контейнерные перевозки в Республике Вьетнам имеет быстрый рост: в 2020 году он составил 22 597 687 TEU, а в 2030 году составит 42 668 339 TEU [4] (табл. 1). Созданы условия для развития логистической инфраструктуры республики, в которую растут инвестиции, строятся ЛЦ. Формирование и развитие системы ЛЦ в регионах страны разнообразно, определяется их особенностями и задачами для страны.

Северный регион имеет 10 региональных ЛЦ: Гия Лам (г. Ханой), Хоай Дык (г. Ханой), Тиен Сон (г. Бакнинь), Хай Дуонг (провинция Хайзыонг), Фук Лок (г. Нинбинь), Туи Ван (провинция Футхо), Хай Линь (провинция Футхо), Лаокай (провинция Лаокай), Хоа Са (провинция Намдинь), Монг Кай (провинция Куаннинь) [5] (рис. 1).

ЛЦ на севере характеризуются небольшим количеством, площадью и масштабом эксплуатации, некоторые не имеют специализированного разгрузочного оборудования. В основном ЛЦ имеют подходы к автомобильным дорогам, имеется только один ЛЦ с подъездными железнодорожными путями. Объем эксплуатации по-прежнему ограничен, в основном предоставление услуг автомобильного транспорта, аренды склада и ряда связанных сопутствующих услуг.

Особенности сети ЛЦ на севере Вьетнама:

- формирование на основных экономических коридорах;
- располагаются вдали от морского порта;
- в основном связаны по автомобильной дороге;
- малая территория, в основном около 10 га;
- эффективность бизнеса невысока.

Таблица 1

Объем грузов, перевозимых контейнерами по экономическим коридорам и зонам в Республике Вьетнам с прогнозом до 2030 г.

| № п/п | Экономический коридор (ЭК), экономическая зона (ЭЗ) | Объем контейнерных перевозок, TEU | | |
|-------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|----------|----------|
| | | 2015 г. | 2020 г. | 2030 г. |
| 1 | Прибрежная ЭЗ | 831864 | 1368454 | 2265927 |
| 2 | ЭК Ханой – Ланг Сын | 1064048 | 1605858 | 3145239 |
| 3 | ЭК Ханой – Лаос Кай | 526707 | 1255844 | 2256963 |
| 4 | ЭЗ Северо-запад Ханой | 243675 | 437901 | 902215 |
| 5 | ЭЗ Юго-восток Ханой | 1466334 | 3237759 | 6157726 |
| 6 | ЭЗ Нги Сон | 125661 | 262655 | 433476 |
| 7 | ЭК 12А и 8 шоссе | 70880 | 221751 | 475595 |
| 8 | ЭК 9 шоссе | 96420 | 221670 | 413205 |
| 9 | ЭЗ Да Нанг – Хуе | 532172 | 965053 | 1561564 |
| 10 | ЭК 19 шоссе | 518294 | 847408 | 1478409 |
| 11 | ЭЗ Северо-восточный город Хошимин | 6082005 | 9632196 | 18954985 |
| 12 | ЭЗ Юго-западный город Хошимин | 805296 | 1696091 | 3113863 |
| 13 | ЭЗ Меконг | 498033 | 845047 | 1509172 |
| 14 | Всего | 12861389 | 22597687 | 42668339 |

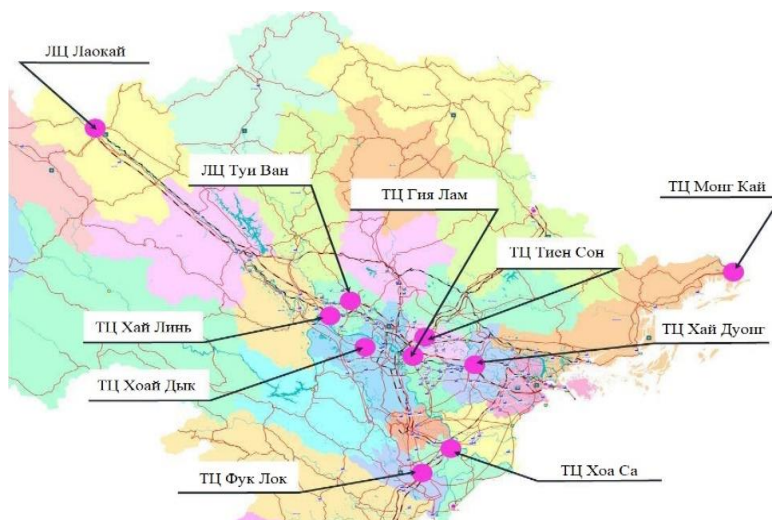


Рис. 1. Расположение ЛЦ центров на севере Республики Вьетнам

В данной работе использована среда имитационного моделирования Anylogic для ЛЦ Лаокай, который расположен в провинции Лаокай и является одним из двух крупных ЛЦ в Республике Вьетнам, связанных с железными дорогами. Он был построен для удовлетворения потребности в перевозках грузов по ЭК Куньмин – Лаокай – Ханой – Хайфон.

ЛЦ Лаокай с площадью 13,5 га включает в себя:

- открытые контейнерные площадки: 3,1 га;
- складские помещения: 3,528 м²;
- железнодорожную станцию;
- площадку для ожидания разгрузки и погрузки автомашин;
- административное здание со вспомогательными помещениями: 242 м².

Услуги ЛЦ Лаокай следующие [4]:

- погрузка, разгрузка, перегрузка на/с железнодорожный/автомобильный транспорт;
- ответственное хранение, подбор, сортировка, консолидация грузов, маркировка, упаковка, растарка;
- таможенная очистка товаров;
- оформление товаросопроводительных документов, информационные, консультационные услуги.

Ресурсы ЛЦ Лаокай приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ресурсы (мощности) ЛЦ Лаокай

| № п/п | Ресурс | Количество |
|-------|-------------------------------------------------|------------|
| 1 | Электрический погрузчик для контейнера, ед. | 5 |
| 2 | Электрический погрузчик для сборного груза, ед. | 6 |
| 3 | Грузовик для контейнера, ед. | 2 |
| 4 | Ячейки стеллажей участка хранения, ячеек | 20 |
| 5 | Мостовой кран, ед. | 2 |

При моделировании был взят промежуток времени 9:00–10:00 20 декабря 2021 года, что является периодом интенсивного грузопотока в ЛЦ Лаокай. В этом промежутке объем переработки грузов составляет 84 TEU контейнера и 8 тонн сборного груза. Распределение объема переработки грузов представлено в табл. 3

Таблица 3

Распределение объема переработки грузов

| № п/п | Структура объектов | Погрузка | Разгрузка | Сумма |
|-------|---------------------------------------|----------|-----------|--------|
| 1 | Автомобильный контейнерный терминал | 27 TEU | 26 TEU | 53 TEU |
| 2 | Железнодорожный контейнерный терминал | 23 TEU | 8 TEU | 31 TEU |
| 3 | Склад | 6 тонн | 2 тонн | 8 тонн |

Для изучения работы ЛЦ Лаокай в среде Anylogic была разработана имитационная дискретно-событийная модель (рис. 2). Модель представляет собой набор блоков, моделирующих различные операции (события), происходящие с агентами (погрузчиками, грузовиками, контейнерами, кранами, поездами). К этим событиям относятся: появление контейнеров и грузовиков в модели (блок Source), появление поездов (trainSource), помощь кранов и погрузчиков (seizeTransporter, rackStore, rackPick, moveByCrane), прием и возврат контейнеров из транспорта (pickup, dropoff), маршрутизация (moveByTransporter, moveTo) и удаление агентов из модели (sink, trainDispose). Архитектура модели и разметка пространства ЛЦ Лаокай в AnyLogic представлена на рис. 2.

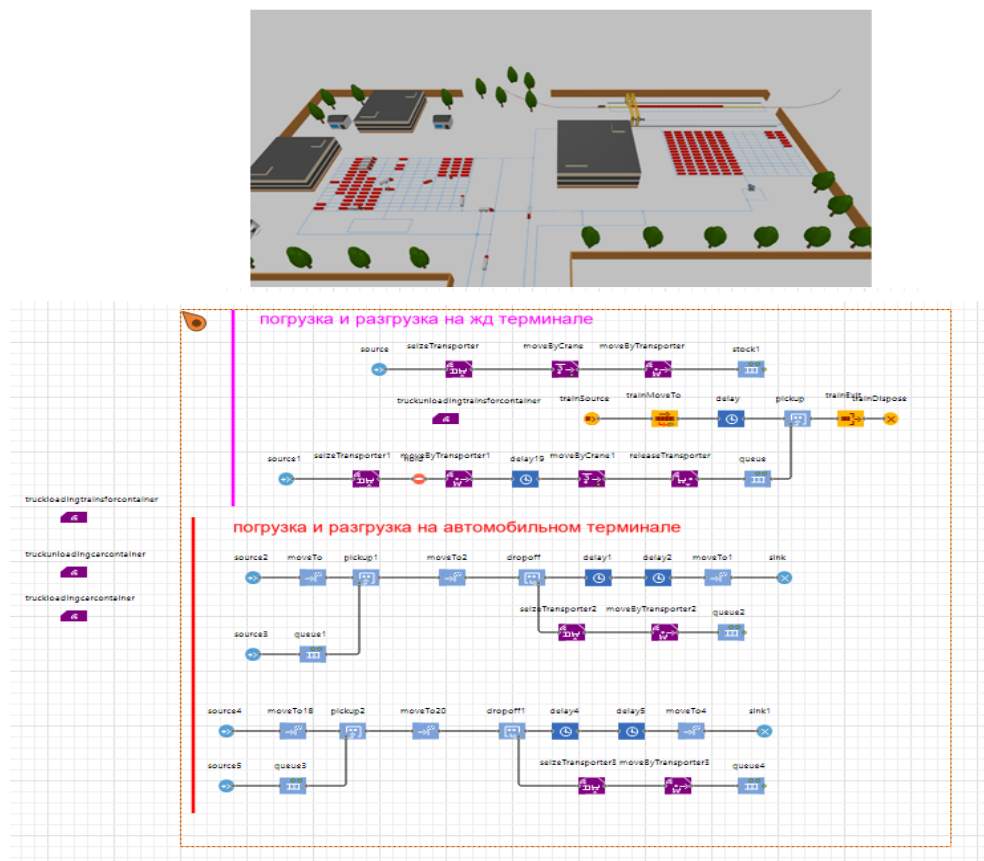


Рис. 2. Разметка моделируемого пространства и архитектура имитационной дискретно-событийной модели логистического центра Лаокай в среде AnyLogic

В работе имитационной модели фактически происходит моделирование движения потоков автотранспорта и контейнера с каждого направления, а взаимодействия этих потоков определяет общее поведение системы. Подробное описание блоков модели представлено в табл. 4.

Таблица 4

Значения и описание параметров модели ЛЦ Лаокай

| Тип | Функция | Имя блока | Описание |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Source | Создает агентов, используется в качестве начальной точки потока агентов. | Source | Появление контейнеров с прибытием поездов |
| | | Source1 | Появление контейнеров на ж/д терминале |
| | | Source2 | Появление автоконтейнеровозов по интенсивности 60 авт/1 час |
| | | Source3 | Появление контейнеров с прибытием автоконтейнеровозов |
| | | Source4 | Появление контейнеровозов по интенсивности 30 авт/1 час |
| Source5 | Появление контейнеров на автомобильном терминале | | |
| trainSource | Создает поезда, помещает их на пути ж/д узла, и вставляет агента-поезд | trainSource | Появление поездов по интенсивности 3 поезд/сутки |

Продолжение табл. 4

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| trainSource | Создает поезда, помещает их на пути ж/д узла, и вставляет агента-поезд | trainSource | Появление поездов по интенсивности 3 поезд/сутки |
| seizeTransporter | Захватывает один транспортер из указанного автопарка, заданного блоком TransporterFleet. Направляет транспортер в заданное место | seizeTransporter, seizeTransporter1 | Захватывание грузовиков из автопарка до места нахождения крана |
| | | seizeTransporter2, seizeTransporter3 | Захватывание погрузчиков к месту прибытия авто-контейнеровозов |
| moveByCrane | Этот блок управляет перемещением агента с помощью крана | moveByCrane | Цель движения: от фитинговой платформы до грузовиков |
| | | moveByCrane | Цель движения: от грузовиков до фитинговой платформы |
| moveByTransporter | Этот блок управляет перемещением грузовики с помощью транспортера | moveByTransporter | Цель движения: от крана до ж/д терминала |
| | | moveByTransporter1 | Цель движения: от ж/д терминала до крана |
| | | moveByTransporter2, moveByTransporter3 | Цель движения: от автоконтейнеровозов до назначенных мест в автомобильном терминале |
| trainMoveTo | Единственный блок, который управляет движением поезда | trainMoveTo | Цель движения: до грузовой станции |
| moveTo | Перемещает агента в новое место | moveTo, moveTo4, moveTo18 | Цель движения: от входа логического центра к автомобильному терминалу |
| | | moveTo2, moveTo20 | Цель движения: к месту погрузка и выгрузка в автомобильном терминале |
| | | moveTo1 | Цель движения: от автомобильного терминала до выхода |

Окончание табл. 4

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| delay | Задерживает агентов на заданный период времени | Delay | Задержка поезда до тех пор, когда закончится погрузка контейнеров Используемая функция: if (queue.size()==23) delay.stopDelayForAll(); |
| | | delay19 | Задержка на 1 минуту |
| | | delay1 | Задержка автоконтейнеровоза, пока закончится погрузка контейнеров Используемая функция на блоке moveByTransporter2: delay1.stopDelayForAll(); |
| | | delay2 | Задерживание на 15 с |
| | | delay4 | Задержка автоконтейнеровоза, пока закончится погрузка контейнеров Используемая функция на блоке moveByTransporter3: delay4.stopDelayForAll(); |
| queue | Хранилище агентов общего назначения | stock1 | Хранение контейнеров в ж/д терминале |
| | | queue | Хранение контейнеров на фитинговой платформе |
| | | queue2, queue4 | Хранение контейнеров в автомобильном терминале |
| | | pickup | Погрузка контейнеров в поезд |
| pickup | Удаляет агентов из заданного блока Queue и добавляет их к содержимому поступающего агента-контейнера | Pickup1, Pickup2 | Погрузка контейнера в автоконтейнеровоз |
| | | Dropoff, dropoff1 | Выгрузка контейнера из автоконтейнеровоза |
| dropoff | Удаляет избранных агентов из поступающего агента-контейнера | | |
| trainExit | Покидающие блок поезда | trainExit | Покидающие блок поезда |
| trainDispose | Удаляет поезда из модели | trainDispose | Удаляет поезда из модели |
| sink | Удаление агентов из модели | Sink, Sink1 | Удаление агентов из модели |

Имитационный эксперимент в условиях существующих ресурсов ЛЦ Лаокай приведен на рис. 3.

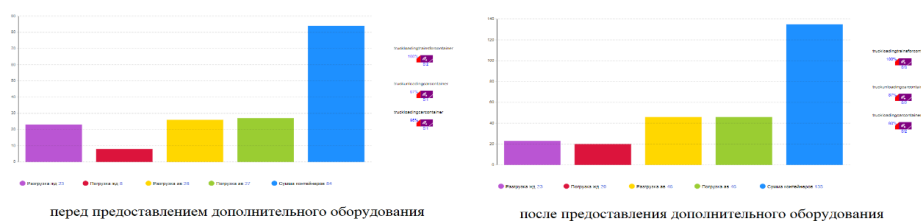


Рис. 3. Объем переработки контейнеров в ЛЦ Лаокай перед и после предоставления дополнительного оборудования

На рис. 3 показано, что погрузчики и грузовики для контейнеров работали с максимальной нагрузкой (> 96 %), объем переработки контейнеров перед предоставлением дополнительного оборудования в логистическом центре составляет 84 TEU, результаты эксперимента совпадают с фактическими данными. В течение периода обзора фактический спрос переработки контейнеров в ЛЦ Лаокай составляет 150 TEU, что показывает перегрузку, нехватку ресурсов и необходимость обновления ресурсов в ЛЦ Лаокай.

Согласно плану модернизации логистического центра Лаокай были предоставлены дополнительно два погрузчика и один грузовик. Результат эксперимента показал, что при условиях наличия дополнительных погрузчиков и грузовиков для контейнеров и работы двух терминалов с максимальной нагрузкой объем переработки контейнеров в ЛЦ составил 135 TEU (см. рис. 3).

В работе показано, что объем переработки контейнеров в ЛЦ Лаокай увеличился до 60 % после эксперимента с большим количеством грузовиков и погрузчиков.

В южном регионе Вьетнама объем товаров в обращении велик, объем контейнерных грузов через морские порты составляет 70 % всей страны. Это один из важных факторов, способствующих формированию региональных ЛЦ, пунктов таможенного оформления за пределами пограничных ворот и пунктов складской системы. Южный регион имеет 11 региональных ЛЦ: Фуок Лонг (г. Хошимин), Трансимекс (г. Хошимин), Труонг Тхо (г. Хошимин), Сотранс (г. Хошимин), Фук Лонг (г. Хошимин), Танамеско (г. Хошимин), Лонг Бинг (провинция Донгнай), Сонг Тан (Г. Биньзыонг), Бьен Хоа (провинция Донгнай), Тан Тао (г. Биньзыонг) [5].

Особенности сети ЛЦ на юге Республики Вьетнам:

– сосредоточены в районе города Хошимин с тенденцией развития в районах Биньзыонг и Донгнай;

- большая роль в поддержке системы морских портов;
- формирование ряда крупных ЛЦ, тенденция совмещения оказания логистических услуг;
- большинство ЛЦ имеют площадь больше 10 га;
- большинство ЛЦ связаны с внутренними водными путями.

В работе использовалась среда имитационного моделирования ЛЦ Фуок Лонг (г. Хошимин). Средства моделирования использовались для создания модели ЛЦ Фуок Лонг, который расположен в городе Хошимин и является одним из крупнейших ЛЦ в стране с пропускной способностью 500 000 TEU/год.

ЛЦ Фуок Лонг с площадью 35,5 га включает в себя:

- открытые контейнерные площадки: 15 га;
- складские помещения: 5000 м²;
- речной порт;
- площадку для ожидания разгрузки и погрузки автомашин;
- административное здание со вспомогательными помещениями.

Услуги ЛЦ Фуок Лонг следующие:

- погрузка, разгрузка, перегрузка на/с внутренний водный/автомобильный транспорт;
- ответственное хранение, подбор, сортировка, консолидация грузов, маркировка, упаковка,

растарка;

- хранение рефрижераторных контейнеров;
- таможенная очистка товаров;
- ремонт, обслуживание контейнеров, оформление товаросопроводительных документов, информационные, консультационные.

Ресурсы ЛЦ Фуок Лонг приведены в табл. 5.

Таблица 5

Ресурсы логистического центра Фуок Лонг

| № п/п | Ресурс | Количество | Единица |
|-------|--------------------------------------------|------------|---------|
| 1 | Электрический погрузчик для контейнера | 9 | шт. |
| 2 | Электрический погрузчик для сборного груза | 3 | шт. |
| 3 | Грузовик для контейнера | 7 | шт. |
| 4 | Ячейки стеллажей участка хранения | 300 | ячеек |
| 5 | Стреловой кран | 7 | шт. |

При моделировании был взят промежуток времени 14:00–15:00 23 декабря 2021 года, что является периодом интенсивного грузопотока логистического центра Фуок Лонг. В этом промежутке объем переработки грузов составляет 84 TEU контейнера и 8 тонн сборного груза. Распределение объема переработки грузов представлено в табл. 6.

Таблица 6

Распределение объема переработки грузов

| № п/п | Структура объектов | Погрузка | Разгрузка | Сумма |
|-------|-------------------------------------|----------|-----------|---------|
| 1 | Автомобильный контейнерный терминал | 22 TEU | 20 TEU | 42 TEU |
| 2 | Речной контейнерный терминал | 66 TEU | 69 TEU | 135 TEU |
| 3 | Склад | 9 тонн | 6 тонн | 15 тонн |

Для изучения работы ЛЦ Фуок Лонг в среде Anylogic была разработана имитационная дискретно-событийная модель (рис. 4). Модель представляет собой набор блоков, моделирующих различные операции (события), происходящие с агентами (погрузчиками, грузовиками, контейнерами, кранами, поездами). К этим событиям относятся: появление контейнеров, грузовиков и судов в модели (блок Source), помощь кранов и погрузчиков (seizeTransporter, rackStore, rackPick, moveByCrane), прием и возврат контейнеров из транспорта (pickup, dropoff), маршрутизация (moveByTransporter, moveTo) и удаление агентов из модели (sink, trainDispose).

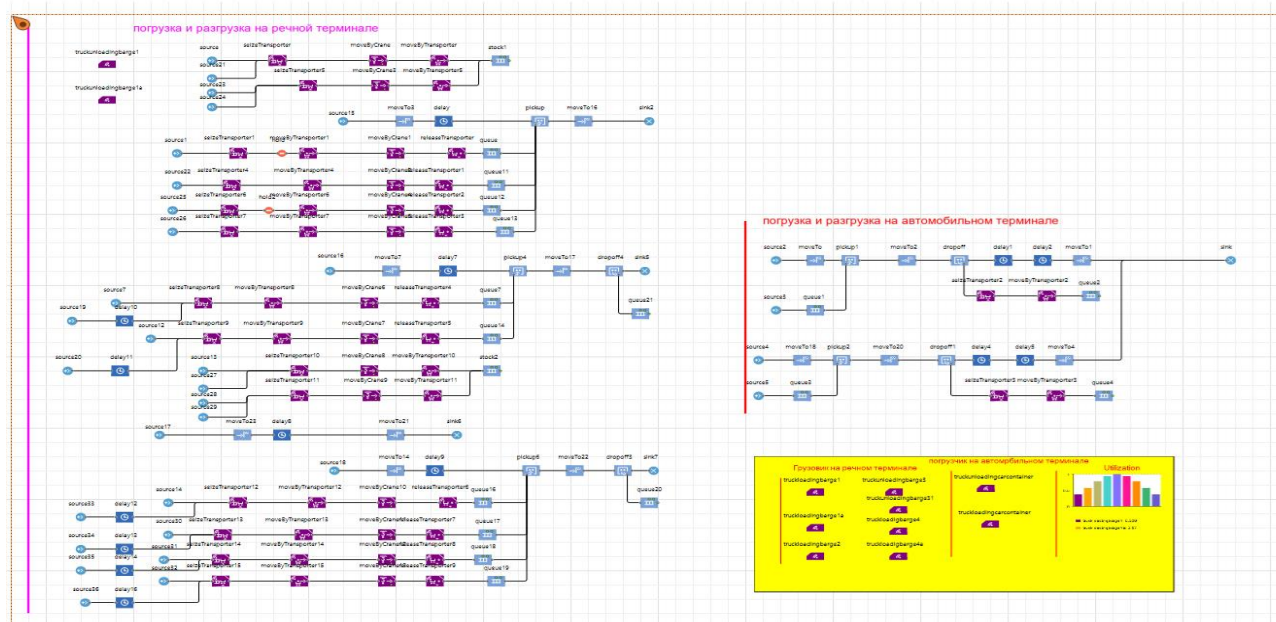
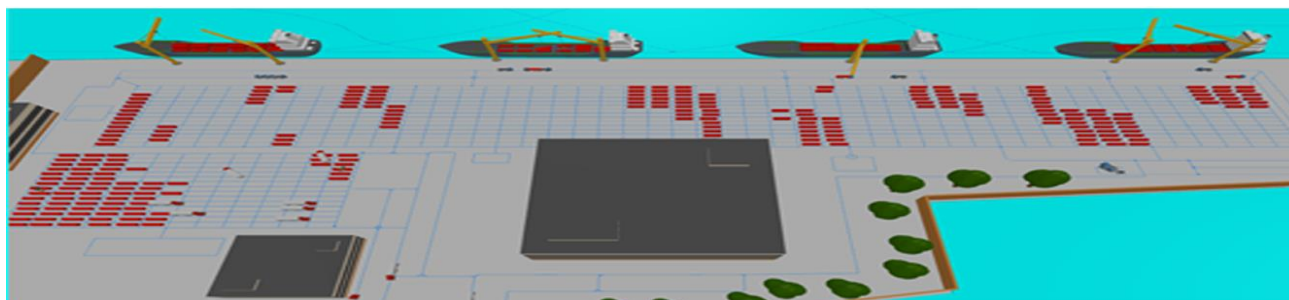


Рис. 4. Разметка моделируемого пространства и архитектура имитационной дискретно-событийной модели логистического центра Фуок Лонг в среде AnyLogic

В работе имитационной модели фактически происходит моделирование движение потоков автотранспорта и контейнера с каждого направления, а взаимодействие этих потоков определяет общее поведение системы.

Эксперимент в условиях существующих ресурсов ЛЦ Фуок Лонг приведен на рис. 5.

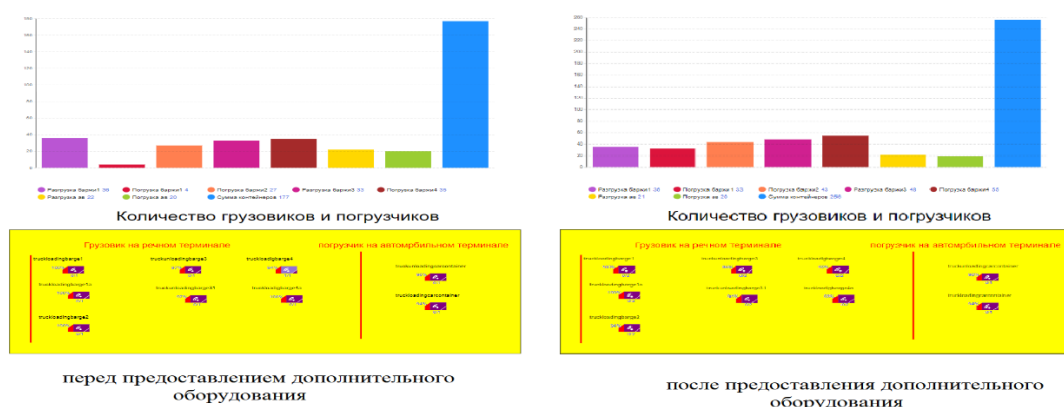


Рис. 5. Объем переработки контейнеров в ЛЦ Фуок Лонг перед и после предоставления дополнительного оборудования

На рис. 5 показано, что погрузчики и грузовики для контейнеров работали с максимальной нагрузкой ($> 94\%$), объем переработки контейнеров в ЛЦ составляет 177 TEU, результаты эксперимента совпадают с фактическими данными. В течение периода обзора фактический спрос переработки контейнеров в ЛЦ Фуок Лонг составляет 300 TEU, что показывает перегрузку, нехватку ресурсов и необходимость обновления ресурсов в ЛЦ Фуок Лонг.

Согласно плану модернизации логистического центра Фуок Лонг были предоставлены дополнительно 7 грузовиков. Результат эксперимента показал, что при условии использования погрузчиков и грузовиков для контейнеров в двух терминалах и работы с максимальной нагрузкой объем переработки контейнеров в ЛЦ составляет 256 TEU (см. рис. 5).

Таким образом, объем переработки контейнеров в ЛЦ Фуок Лонг увеличился на 45 % после эксперимента с количеством грузовиков и погрузчиков.

Для развития рынка транспортно-логистических услуг Республики Вьетнам правительство уделяет особое внимание планированию развития логистической системы страны в целом. Однако развитие ЛЦ в республике по-прежнему имеет ряд специфических недостатков, а именно:

- отсутствие генерального плана ЛЦ, которые построены индивидуально под каждую местность и под каждый вид транспорта, что ведет к отсутствию непрерывной связи;
- заторы грузов на терминалах, дефицит товаров, а также пустые склады, по-прежнему такое часто происходит из-за нерационального распределения сети и неэффективной возможности регулирования воздушного движения. Въезд большого количества контейнеровозов в жилые районы вызывает загрязнение окружающей среды;
- ограничения в мощности инфраструктуры и в специализированной погрузочно-разгрузочной технике;
- недостаточно квалифицированный персонал для организации и управления ЛЦ.

Выводы

Имитационное моделирование как метод совершенствования структуры логистической системы заключается в разработке модели реальной системы и постановке экспериментов с целью изучения её поведения: предельные нагрузки, узкие места и т.д.

Таким образом, создание единой логистической системы с ядром ЛЦ различного уровня и назначения, тесно связанных между собой, станет надежной основой для формирования единого транспортного пространства Республики Вьетнам.

Список литературы

1 Багинова, В. В. Управление транспортными системами и логистической инфраструктурой : учеб. Пособие / В. В. Багинова, А. Ю. Кузьмин. – Москва : Прометей, 2020. – С. 35–38. – ISBN 978-5-00172-043-0.

References

1 Baginova, V. V. Management of transport systems and logistics infrastructure : textbook. Allowance / V. V. Baginova, A. Yu. Kuzmin. – Moscow : Prometheus, 2020. – P. 35–38. – ISBN 978-5-00172-043-0.

2 **Багинова, В. В.** Логистика : научная монография / В. В. Багинова, Л. С. Федоров, Е. А. Сысоева. – Москва : Прометей, 2020. – С. 26–29. – ISBN 978-5-00172-070-6.

3 Báo cáo logistics Việt Nam 2020 = Отчет о логистике Вьетнама 2020 / Министерство промышленности и торговли Вьетнама. – Ханой : Издательство "Промышленность и торговля", 2020. – URL : <https://tancang-stc.vn/wp-content/uploads/2021/04/Bao-cao-Logistics-Viet-Nam-2020.pdf> (дата обращения: 01.02.2023).

4 Báo cáo logistics Việt Nam 2021 = Отчет о логистике Вьетнама 2021 / Министерство промышленности и торговли Вьетнама. – Ханой : Издательство «Промышленность и торговля», 2021. – URL: <https://daotaocq.gdnn.gov.vn/wp-content/uploads/2022/06/4.-BC-Logistics-Viet-Nam-2021-Bo-CT.pdf> (дата обращения: 01.02.2023).

5 **Dang, Dinh Dao.** Phát triển dịch vụ logistics ở Việt Nam = Развитие логистических услуг во Вьетнаме / Данг Динь Дао // Вьетнамский научно-технический журнал. – 2013. – № 6. – 14 с. – ISSN 2615-9759.

6 **Nguyen, Thi Hien.** Những vấn đề cần giải quyết để hệ thống logistics vùng kinh tế trọng điểm miền Trung cất cánh = Вопросы, которые необходимо решить для того, чтобы логистическая система центрального ключевого экономического района заработала / Нгуен Тхи Хиен // Вьетнамский научно-технический журнал. – 2021. – № 3. – 35 с. – ISSN 2615-9759.

7 **Kuzmin, D.** Особенности организации контейнерных перевозок с использованием средств многоподходного имитационного моделирования / Д. Кузьмин // РИСК : Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2014. – № 3. – С. 39–43. – EDN SYPHQJ.

8 **Fedorov, L.** Развитие транспортно-логистического рынка: отношения между субъектами в современных условиях / Л. Федоров, Д. Кузьмин, А. Багинов // РИСК : Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2015. – № 1. – С. 20–23. – EDN TOVHUD.

9 **Kuzmin, D.** Дискретно-событийная имитационная модель железнодорожного вокзала / Д. Кузьмин, В. Багинова, А. Агейкин // X Международный научный Сибирский транспортный форум – ТрансСибирь 2022, Новосибирск, 02–05 марта 2022 года. – Новосибирск : Эльзевир, Б. В., 2022. – С. 929–937. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.091.

10 **Kuzmin, D.** Модель работы дискретно-событийного пересечения (Ясный проезд – улица Дежнева, Москва) / Д. Кузьмин, В. Багинова // Умные инновации, системы и технологии. –

2 **Baginova, V. V.** Logistics. Scientific monograph : textbook. Allowance / V. V. Baginova, L. S. Fedorov, E. A. Sysoveva. – Moscow : Prometheus, 2020. – P. 26–29. – ISBN 978-5-00172-070-6.

3 Báo cáo logistics Việt Nam 2020 = Vietnam Logistics Report 2020 / Ministry of Industry and Trade of Vietnam. – Hanoi : Industry and Trade Publishing House, 2020. – URL: <https://tancang-stc.vn/wp-content/uploads/2021/04/Bao-cao-Logistics-Viet-Nam-2020.pdf> (date of access: 02/01/2023).

4 Báo cáo logistics Việt Nam 2021 = Vietnam Logistics Report 2021 / Ministry of Industry and Trade of Vietnam. – Hanoi : Industry and Trade Publishing House, 2021. – URL: <https://daotaocq.gdnn.gov.vn/wp-content/uploads/2022/06/4.-BC-Logistics-Viet-Nam-2021-Bo-CT.pdf> (date of access: 02/01/2023).

5 **Dang, Dinh Dao.** Phát triển dịch vụ logistics ở Việt Nam = Developing logistics services in Vietnam / Dang Dinh Dao // Vietnam Science and Technology Journal. – 2013. – No. 6. – 14 p. – ISSN 2615-9759.

6 **Nguyen, Thi Hien.** Những vấn đề cần giải quyết để hệ thống logistics vùng kinh tế trọng điểm miền Trung cất cánh = Issues that need to be solved for the logistics system of the central key economic region to take off / Nguyen Thi Hien // Vietnam Science and Technology Journal. – 2021. – No. 3. – 35 p. – ISSN 2615-9759.

7 **Kuzmin, D.** Features of the organization of piggyback transportation using multi-approach simulation tools / D. Kuzmin // RISK : Resources, Information, Supply, Competition. – 2014. – No. 3. – P. 39–43. – EDN SYPHQJ.

8 **Fedorov, L.** Development of the transport and logistics market: relations between subjects in modern conditions / L. Fedorov, D. Kuzmin, A. Baginov // RISK : Resources, Information, Supply, Competition. – 2015. – No. 1. – P. 20–23. – EDN TOVHUD.

9 **Kuzmin, D.** Discrete event simulation model of the railway station / D. Kuzmin, V. Baginova, A. Ageikin // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, March 02–05, 2022. – Novosibirsk : Elsevier, B. V., 2022. – P. 929–937. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.091.

10 **Kuzmin, D.** Discrete-Event Intersection Operation Model (Yasnyy Proyezd – Dezhnev street, Moscow) / D. Kuzmin, V. Baginova // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. –

2022. – Вып. 247. – С. 283–294. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_29.

11 **Кузьмин, Д. В.** Дискретно-событийная имитационная модель работы перекрестка / Д. В. Кузьмин, В. В. Багинова // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки : труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. – Москва : Российский университет транспорта, 2021. – С. 487–497. – DOI 10.47581/2022/Obrazcov.65.

Vol. 247. – P. 283–294. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_29.

11 **Kuzmin, D. V.** Discrete-event simulation model of the intersection / D. V. Kuzmin, V. V. Baginova // Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov – the founder of transport science : Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the university, Moscow, October 22, 2021. – Moscow : Russian University of Transport, 2021. – P. 487–497. – DOI 10.47581/2022/Obrazcov.65.

Minh Chien Nguyen, A. V. Baginov

APPLICATION OF SIMULATION MODELING IN THE ORGANIZATION AND DEVELOPMENT OF LOGISTICS CENTERS IN VIETNAM

Abstract. The paper deals with the problems in the logistics centers in Vietnam, which is a relevant topic in the light of the development of the logistics infrastructure in this country and the development of simulation models for the logistics centers of Lao Cai and Phuoc Long using the AnyLogic software. The use of simulation models by Lao Cai and Phuoc Long made it possible to more accurately assess the performance of these logistics centers and identify possible bottlenecks in their operation. The implementation of simulation modeling of measures will lead to the improvement of the work of existing logistics centers and the formation of a more efficient and competitive logistics system in the Republic of Vietnam. The optimization of logistics processes in the country contributes to the development of international trade and the improvement of the economic performance of the region.

Keywords: transport, transport infrastructure system, transport technology, logistics center, simulation modeling, discrete-event modeling.

For citation: Nguyen, Minh Chien. Application of simulation modeling in the organization and development of logistics centers in Vietnam / Minh Chien Nguyen, A. V. Baginov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 95–105. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_95.

Сведения об авторах

Нгуен Минь Тьен

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
аспирант,
e-mail: nguyenminhchienutc@gmail.com

Багинов Андрей Владимирович

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
соискатель,
e-mail: baginov93@mail.ru

Information about the authors

Nguyen Minh Chien

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Logistics and Management of Transport Systems»,
Postgraduate Student,
e-mail: nguyenminhchienutc@gmail.com

Baginov Andrei Vladimirovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Logistics and Management of Transport Systems»,
External Doctoral Candidate,
e-mail: baginov93@mail.ru

С. Э. Ольховиков, Е. А. Петренева, И. Н. Кагадий, О. Б. Шерстобитова

ФОРМИРОВАНИЕ УЗЛОВЫХ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ

Аннотация. Рассмотрены вопросы организации мультимодальных транспортно-логистических центров (МТЛЦ) – ведущих элементов логистической инфраструктуры России. Учитывая большую протяженность территории Российской Федерации, деление ее на административно-территориальные единицы, витиеватую сеть путей сообщения, необходимость в перевозке и переработке огромных объемов грузов, а также в оптимальном выборе логистики, уже в ближайшее время будет необходимо образование около 80 МТЛЦ федерального, регионального и территориального уровня. Предложен проект организации МТЛЦ регионального уровня на территории Новосибирского транспортного узла.

Ключевые слова: мультимодальные транспортно-логистические центры, мультимодальные логистические транспортно-распределительные центры, промышленно-логистический парк, грузовой терминал, контейнерный терминал, терминально-складской комплекс, распределительный центр, транспортно-логистическая инфраструктура, транспортные коридоры, транспортный узел.

Для цитирования: 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. – С. 106–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_106.

Введение

Вследствие инновационного развития экономики и вступления Российской Федерации во Всемирную торговую организацию транспорт сейчас является важнейшим показателем социально-экономического прогресса России.

В период до 2030 года Российская Федерация свою транспортную стратегию нацелила на развитие экспорта транспортных перевозок и осуществление транзитных возможностей страны в системе международных транспортных коридоров (МТК).

Для достижения поставленной цели необходимо совершенствовать логистическую инфраструктуру и создавать мультимодальные транспортно-логистические центры (МТЛЦ) в больших транспортных узлах опорной сети на территории России, что позволит сформировать единое технологическое и информационное пространство для комплексного удовлетворения требований клиентов. Каждый МТЛЦ будет представлять собой крупный технологический комплекс по переработке, складированию, таможенной очистке грузов и контейнеров, оказывающий полный спектр дополнительных услуг добавленной стоимости. [1]

Актуальность реализации проекта по строительству объекта логистической инфраструктуры позволит решить вопросы выбора местоположения МТЛЦ, сокращения пробега автотранспорта и как следствие дальность перевозок грузов.

Основная часть

Мультимодальные транспортно-логистические центры являются ведущими составляющими логистической инфраструктуры МТК и представляют собой стратегическое начало подъема экономики России.

Далее на рис. 1 схематично представлено размещение на территории России мультимодальных логистических транспортно-распределительных центров (МЛТРЦ).

Учитывая территориальную протяженность Российской Федерации, деление ее на административно-территориальные единицы, витиеватую сеть путей сообщения, необходимость в перевозке и переработке огромных объемов грузов, а также оптимальном выборе логистики, уже в ближайшее время будет просто необходимо образование, по начальной оценке, около 80 МТЛЦ федерального, регионального и территориального уровня [2].



Рис. 1. Схема размещения мультимодальных логистических транспортно-распределительных центров (МЛТРЦ) на территории России

В значительно больших мультимодальных узлах федерального уровня рационально организовать центральную сеть терминалов и логистических центров, соединяющихся в региональные транспортно-логистические системы (РТЛС) на основе создания единого организационно-экономического, научно-технического, информационного, кадрового и нормативно-правового обеспечения управления системой грузо- и товародвижения [3].

Организация базы цепочек МЛТЦ на территории прилегания к национальным и международным транспортным коридорам, а также внедрение на их основе транспортно-логистических систем (ТЛС), что влияет на рост экономики региона, конкурентоспособность транспортной отрасли России во всеобщем устройстве МТК, что в дальнейшем станет фрагментом государственной (региональной) транспортной политики, будет занимать первостепенное место в прогрессе транспортной инфраструктуры, совершенствовании транспортно-экономических связей и вообще всей системы грузоперевозки и товаропотоков [4].

Далее в статье будут рассмотрены транспортно-логистические зоны Новосибирского транспортного узла: западный, южный и восточный.

Западный транспортно-логистический участок охватывает такие крупные производственные объекты, как:

- промышленно-логистический парк (ПЛП) – один из самых крупных промышленных парков за Уралом, находящийся в 12 км от Новосибирска. Зона парка разделена на три площадки – «А», «Б» и «В». Площадки «А» и «Б» предназначены для реализации логистических и промышленных предложений и разработок представителей парка. На площадке «Б» расположены конструктивный и выставочный центр, места общепита и гостиничный комплекс. Площадка «В» – производственная зона высоких технологий, одна из частей которой предназначена для строительства жилья для сотрудников парка;

- грузовой терминал «Толмачево Карго», входящий в состав Международного аэропорта Новосибирск (Толмачево). В данном терминале происходят манипуляции внутреннего и международного грузопотока, формируется логистика перемещения грузов. В терминале соблюдаются особые условия обработки и хранения, используется современное оборудование в обслуживании грузов различных категорий, а возможности грузового комплекса около 50 тысяч тонн груза в год. Преимуществами склада также являются выгодное географическое расположение, лояльная система ценообразования для своих клиентов;

- крупнейший за Уралом международный выставочный комплекс «Новосибирск Экспоцентр», является одним из обладателей самых высоких технологических оснащений на сегодня во всей России;

- контейнерный терминал «Клещиха», являющийся одним из наиболее крупных терминалов для сорокафутовых контейнеров, на котором информационное пространство ведет свою деятельность для клиентов и работников терминала, соискателей и контрагентов «Интеллектуального контейнерного терминала» (ИКТ). Он помогает оптимизировать и автоматизировать технологические процессы отработки контейнеров, позволяет сократить простой контейнеров и вагонов по грузовым операциям,

уменьшить нерациональные пробеги во время операций, а также сэкономить электроэнергию, сократить расход топлива и издержки деятельности терминала.

Восточный транспортно-логистический участок включает следующие крупные производственные объекты:

– оптово-розничный центр «Нордмолл» – пример современного формата торговой деятельности федерального уровня с развитой платформой и системой обслуживания клиентов. Данный торговло-логистический комплекс стал значимым сортировочным центром товаров производства Узбекистана, Турции, Китая, Вьетнама, Киргизии, а также товаров российских производителей;

– распределительный центр розничной сети «Магнит», в состав которого входит несколько различных складов, перерабатывающий цех вторсырья, административное строение, сооружение предприятия автотранспорта с ремонтной площадкой, пункты заправки и технического контроля. Работа логистического комплекса максимально автоматизирована такими системами, как автоматический заказ, авторазмещение товаров, а также системой тайм-слоттинга для выбора оптимального времени прибытия поставщика на выгрузку, тем самым позволяющая устранять очереди автотранспорта на пунктах приема товаров в торговых точках. С помощью таких систем логистический комплекс способен самостоятельно анализировать динамику продаж с учетом сезонности и акций, рассчитывать уровень обеспеченности товарами и необходимость в их пополнении, формировать заказы поставщику;

– терминально-логистический центр «Евросиб-Терминал-Новосибирск», занимающийся железнодорожными перевозками практически всех видов грузов, является одним из крупнейших в Сибири. ТЛЦ компании «Евросиб» создавался с целью обхвата наибольшего диапазона сервисов, в которых так нуждаются как мелкие предприятия, так и крупные клиенты, которые стараются максимально сокращать издержки, связанные с хранением, транспортировкой грузов, а также всей логистической цепочкой. Логистический центр находится недалеко от Северного объезда в районе пригородного сообщения ж.-д. станции N1. Возможности терминала позволяют обслуживать в сутки до двух контейнерных поездов. На территории терминального центра находятся Новосибирский Восточный таможенный пост и склад временного хранения;

– промышленно-логистический парк «Восточный» является одной из важнейших составляющих транспортно-логистической инфраструктуры Новосибирской области, на территории которого предполагается складской комплекс классов «А» и «В», контейнерные площадки для крупнотоннажных контейнеров, парковки грузовых машин, административных и хозяйственных строений. Первоначально этот парк создавался частными предпринимателями, желавшие реализовать свои проекты в одном месте, что сокращало затраты на создание общинженерного и транспортного функционирования.

В южный транспортно-логистический участок входят следующие производственные объекты:

– биотехнопарк Новосибирской области – объединение компаний, занимающихся исследованиями, разработкой и производством в информационных технологиях и биотехнологиях. Этот научно-производственный проект инициировался администрацией Новосибирской области и руководством наукограда Кольцово;

– технопарк микрорайона Академгородка (Академпарк) обладает исключительной технологической и организационной инфраструктурой, предоставляет максимально эффективные условия для создания и реализации передовых компаний и результативного становления существующих высокотехнологических организаций. Технопарк специализируется в сферах информационных технологий, силовой электротехники, приборостроения, биомедицины и биотехнологий.

Развитие этих площадок вынудит строительство Восточного обхода Новосибирска создавать инфраструктуру гораздо мощней.

Перспективный ПЛП «Южный», инвестором которого планирует выступить корпорация «Нестле», территориально будет располагаться между городами Бердск и Искитим на участке площадью 145 га.

В Новосибирской области создаются перспективные проекты, а также происходит скоротечное развитие уже имеющихся площадок, обладающих целостной совокупностью инженерной и транспортной коммуникаций, заинтересовывающих внимание новых инвесторов, что влечет за собой увеличение финансовых вливаний в регион.

Далее в статье будет рассмотрено перспективное развитие мультимодальных транспортно-логистических центров Новосибирской области.

Новосибирская область удачно расположена территориально, что делает Новосибирск крупнейшим транспортным, распределительным и транзитным пунктом на востоке страны. Сосредоточение путей сообщения транспорта в Новосибирске, протягивающихся с запада на восток, на юг (страны Средней Азии и Монголия), на юго-запад (Республика Казахстан), на север, Южный Кузбасс. Сосредоточение товаропотоков в Новосибирске способствует оперативному обслуживанию десятков городов Сибири, Алтая, Казахстана и Средней Азии [5].

В области перевозок железнодорожным транспортом комплексом погрузочных (разгрузочных) операций, группировкой грузов и другими складскими работами и услугами заведует Центральная дирекция управления терминально-складским комплексом (ТСК).

По данным соответствующих источников, ТСК крупнейшей компании ОАО «РЖД» достигает 28 % от всей складской инфраструктуры отечественного рынка, но вместе с тем доля его доходов не более 5 %. Складской комплекс ОАО «РЖД» в основном представляет собой открытые площадки, лишь малая часть площадок крытые, а общая площадь складов достигает 5,7 млн м² [6].

В настоящее время перед компанией поставлена главная задача в организации комплекса мультимодальных терминально-логистических центров в наибольших транспортных узлах сети российских железных дорог. В будущем МТЛЦ предоставят возможность сформировать единственного совокупного информационно-технологического пространства для комплексной сатисфакции потребностей клиентов.

Региональная транспортная составляющая представлена всеми видами транспорта, обеспечивающими транспортной инфраструктуре внешнеторговую деятельность региона и страны.

На рис. 2 представлены крупнейшие транспортные коридоры, находящиеся на Востоке страны и проходящие по территории Новосибирской области:

1 Магистральные железнодорожные пути: Транссибирская железнодорожная магистраль, пересекающая восемь часовых поясов, соединяющая более восьмидесяти городов России, проходящая через территории пяти федеральных округов и двух частей света; Туркестано-Сибирская магистраль из Сибири в Среднюю Азию и Среднесибирская, проходящая по территории Омской области, северного Казахстана, Новосибирской области и Алтайского края.

2 Федеральные автомобильные дороги «Иртыш» (Р-254) и «Сибирь» (Р-255) автомобильного транспортного коридора (Москва – Челябинск – Новосибирск – Владивосток) и «Чуйский тракт» (Р-256) – выход на Монголию, Китай и страны Средней Азии.

3 Региональные автодороги с выходом на Северную широтную магистраль (Томск), Северо-Восточный Казахстан, Южный Кузбасс, сельскохозяйственные районы Алтая.

4 Река Обь, которая выполняет важную роль в транспортном обслуживании северных нефтедобывающих районов Сибири (ХМАО, ЯНАО).

5 Узловой аэропорт Толмачёво, осуществляющий авиасообщение с 80 городами России, ближнего и дальнего зарубежья и имеющий большое значение как пункт транзитной посадки воздушных судов, выполняющих рейсы между Японией, Кореей, Китаем и городами Западной Европы и Скандинавии, а также обеспечение транзитов по кросс-полярным линиям [7].

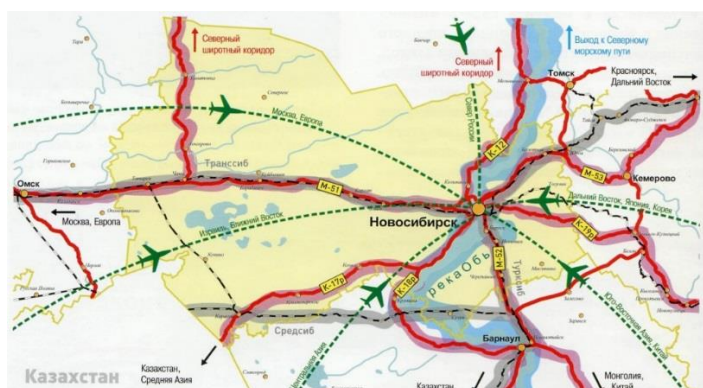


Рис. 2. Крупнейшие транспортные коридоры, проходящие через НСО

Приведя весомые доводы в выборе Новосибирска для формирования мультимодального узла, обобщим вышенаписанное. Новосибирск является центром Сибирского федерального округа, соединяющим двенадцать субъектов РФ и задействующим пять видов транспорта. Город удачно входит в

систему международных транспортных коридоров, осуществляющих высокоактивную внешнюю экономику, обладает наличием крупнейших в Сибири оптово-розничных сетей и бизнес-центров, культурных и образовательных учреждений, развитой системой терминально-складских комплексов. Также немаловажно наличие в регионе нефтяных месторождений, нефте- и газопроводов и огромной территории свободной земли.

Мультимодальный транспортно-логистический центр координирует и реализовывает погрузочно-разгрузочные работы, перемещение грузов, группировку, складирование, переработку, проведение нужных таможенных мероприятий и других процедур по приемке, отправке и перенаправлению груза, экспедирование, переадресовку грузов, предоставляет полный спектр услуг и правильного обслуживания. Логистический центр обеспечивает взаимосвязь путей сообщения своевременной организацией и предоставлением в полном объеме транспортно-логистических услуг [8].

Для определения местоположения МТЛЦ возможно использование следующих методов решения:

– макроподход, разработанный Эдгаром Гувером, основывается на сокращении издержек при транспортировке груза за счет уменьшения расстояния между производителем и клиентами для быстрого и своевременного пополнения их запасами, а также за счет деления груза клиентами и потребителями на небольшие партии готовой продукции. Место размещения и размер ЛЦ определяется в зависимости от требуемой скорости поставок, среднего размера заказа и от величины удельных издержек на местную транспортировку;

– макроподход Роджера Шменнера, который предложил принимать во внимание специфику выпускаемого продукта. Данный метод основывается на трех типах стратегий: в размещении нескольких ЛЦ, при этом каждый из которых обслуживает только один продукт; в каждом ЛЦ хранятся и обрабатываются все виды продукции; каждый ЛЦ обслуживает все рынки в определенной географической области;

– модель Фон Тюнена (Танена), который предложил схему размещения товарного производства вблизи изолированного субъекта, то есть расположение сельского хозяйства должно быть рядом с городом, который в свою очередь является поставщиком промышленных товаров и рынком сбыта;

– модель Альфрода Вебера, предложившего классифицировать факторы, влияющие на размещение производства. По его мнению, сокращение транспортных издержек, расходов на рабочую силу и сосредоточение промышленности в определенном месте влечет экономическую выгоду хозяйственной деятельности;

– метод калькуляции затрат, который заключается в вычислении предполагаемых зависящих от места расположения общих переменных затрат на ведение деятельности с возможностью выбора самого дешевого из подобранных вариантов. Минусом такого метода может стать затрудненное получение точного прогнозирования затрат, объемов заказов, а также в дальнейшем изменении затрат;

– метод пробной точки, предложенный Адилем Мухтаровичем Гаджинским, основывается на поиске месторасположения распределительного склада на участке, ограниченном четырьмя узлами пересечения автомобильных дорог, посредством определения расстояния между узлом и каждым клиентом, а после несложной манипуляции перемножения величин расстояния и величины грузопотока клиента выясняется значение грузооборота для каждого потребителя [9].

Нами была поставлена задача определения места дислокации МТЛЦ с использованием следующих методологических подходов: гравитационного и частичного перебора, позволяющих учесть объемы зарождения и движения товаропотоков, а также загруженность сети автомобильных дорог.

Для решения поставленной задачи гравитационным методом требуется знать месторасположение организаций-производителей и потребителей данной продукции (клиентов), объемы поставок продукции, маршруты доставки (характеристику транспортной сети), затраты (тарифы) на транспортные услуги.

Месторасположение логистического центра, то есть его координаты определяются по формулам:

$$X_c = \frac{\sum T_i \cdot Q_i \cdot x_i}{\sum T_i \cdot Q_i},$$
$$Y_c = \frac{\sum T_i \cdot Q_i \cdot y_i}{\sum T_i \cdot Q_i},$$

где Q_i – объем поставки (потребления), т;

x_i, y_i – координаты поставщиков (потребителей), км;
 T_i – тариф за перевозку, руб./ткм.

Конкретное географическое расположение участка, обеспечивающего минимальные работы при транспортировке, часто не соответствует найденному центру тяжести, но зачастую оказывается поблизости. Выбирается оптимальное место дислокации склада путем анализа предполагаемых участков в районе найденного центра тяжести. Также собирается информация об этом участке, то есть транспортная развязка, протяженность и его форма, немаловажно иметь понятие о планах на эту территорию местных органов власти.

Для решения поставленной задачи определения места дислокации МТЛЦ методом частичного перебора необходимы следующие исходные данные: месторасположение организаций-производителей и потребителей данной продукции (клиентов), объемы поставок продукции, маршруты доставки (характеристика транспортной сети).

На чертеже зоны обслуживания точками обозначается предполагаемое место размещения терминала, тем самым сокращается область поиска узлами, которые находятся в районе данных точек.

Итак, после выбора узла сети путей сообщения, в котором есть возможность разместить МТЛЦ, по участкам сети путей сообщения определяются расстояния от этого МТЛЦ до каждого клиента. Далее необходимо рассчитать транспортный грузооборот путем перемножения величины расстояния и величины объема поставки клиента. Далее сравниваются показатели всех узлов, а именно: общий грузооборот транспорта по доставке грузов всем клиентам. В результате чего, тот узел путей сообщения, который обеспечивает минимальный грузооборот транспорта, будет являться искомым местом размещения МТЛЦ [10, 11].

На основании концепции создания терминально-логистических центров на территории Российской Федерации нами были разработаны следующие критерии выбора местоположения МТЛЦ:

- примыкание земельных участков к железнодорожным путям, что снизит стоимость и уменьшит время на подготовку к строительству;
- наиболее близкое размещение к крупному транспортному узлу и центру массового зарождения и/или погашения грузопотоков;
- доступность энергетических ресурсов;
- соседство свободных земельных участков для устройства в дальнейшем собственной грузовой базы ТЛЦ;
- возможность организации на сопредельной территории дистрибуционных мощностей (лесные биржи, металлобазы, складские и торговые комплексы и прочее). За счет контейнерного и таможенного сервисов ТЛЦ сконцентрирует входящий в регион поток товаров повседневного спроса, а также значительную часть грузов промышленного назначения. Наряду с этим создаются благоприятные условия для реализации распределительных функций, в том числе с использованием современных торговых форматов.

Для размещения МТЛЦ рассмотрены грузовые железнодорожные станции, расположенные на З-С железной дороге в западном, восточном и южном направлениях от железнодорожной станции N2 на расстоянии 30 километров от границ города Новосибирска.

В результате поиска на публичной кадастровой карте России площадок для размещения МТЛЦ рассматривались земельные участки в непосредственной близости от станций.

Итак, в западном направлении от железнодорожной станции N2 вблизи железнодорожной станции N3 были рассмотрены две площадки № 1 и № 2 – это земельные участки площадью 54 и 73 тыс. м² соответственно.

Вблизи станции N4 были рассмотрены три земельных участка для размещения МТЛЦ.

Вблизи железнодорожной станции N5 были рассмотрены три площадки для возможного размещения МТЛЦ.

В непосредственной близости от полосы отвода железной дороги расположена площадка № 1, на которой функционируют различные торговые и оптово-розничные компании, складские комплексы и хозяйственные корпуса, земельные участки которых числятся в частной собственности у разных владельцев.

В радиусе двух километров от станции расположена площадка № 2 общей площадью 777 801 м², земли которой разрешено использовать для размещения складских помещений. Организацией ООО «Инвест-Недвижимость» на данном участке ведутся строительные работы складского комплекса класса «А».

Земельные участки общей площадью 216 300 м² составляют площадку № 3. Данная территория находится в частной собственности: на участках разрешено размещение коммунальных и складских объектов. В настоящее время они частично заняты тремя складскими комплексами.

В непосредственной близости с железнодорожной станцией №6, расположенной в черте города, все территориальные ресурсы использованы: с южной стороны станция ограничена жилыми домами, с северной – производственными и торговыми предприятиями. Посредством этого можно сделать вывод, что свободных земельных участков для размещения МТЛЦ вблизи данной станции нет.

В южном направлении от железнодорожной станции №2 земельный участок для строительства МТЛЦ расположен в районе железнодорожной станции №7, в Южной транспортно-логистической зоне Новосибирского транспортного узла. Примерная площадь 150 гектар. Земельный участок занят лесами.

Участок примыкает к Федеральной магистральной автомобильной трассе Р-256 (М-52) «Новосибирск – Барнаул – граница с М1». На Юге располагается Алтайский край, который занимает крупнейшую область в экономике по производству зерновых, крупяных и технических культур. Это предпочтительное направление для Новосибирского железнодорожного узла.

Рядом реализуется проект «Восточный обход» города Новосибирска, который позволит связать Восточную и Южную зоны города. В непосредственной близости от комплекса находятся два населенных пункта: города Бердск и Искитим.

Возле железнодорожной станции №7 имеется большой участок земли, но он относится к землям лесного фонда. Строительство на данной территории предполагает большие затраты на возведение МТЛЦ. На противоположной стороне участок, который примыкает к самой станции, имеет болотистую местность, строительство МТЛЦ на таком участке не предусмотрено.

В восточном направлении от Новосибирска рассмотрены следующие потенциальные участки для строительства МТЛЦ.

Первый земельный участок расположен в районе железнодорожной станции №8, вдоль автомобильной дороги, соединяющей поселок Ленинский с федеральной автомобильной дорогой М-53 «Б» в Восточной транспортно-логистической зоне Новосибирского транспортного узла. В непосредственной близости от комплекса находятся три населенных пункта: поселки Мочище, Ленинский и Октябрьский. Примерная площадь 56–58 гектар.

Участок примыкает к магистральной железной дороге – участку Т1 (восточное направление), в том числе к железнодорожной станции №8 и ее маневровым путям. Это позволяет обеспечить все необходимые операции по приему и отправлению железнодорожных грузов, в том числе контейнеров.

В непосредственной близости от участка расположена одна из крупных станций Новосибирского железнодорожного узла – станция №1.

Участок прилегает к автодороге на поселок Ленинский с выходом на федеральную трассу М-53 «Б». Участок расположен на расстоянии около 4 км от Северного автодорожного обхода города Новосибирска, выезд на Северный обход осуществляется по участку федеральной трассы М-53

Второй земельный участок для строительства МТЛЦ расположен в районе железнодорожной станции №1 в Восточной транспортно-логистической зоне Новосибирского транспортного узла в непосредственной близости от населенного пункта Пашино. Примерная площадь участка 45 гектар.

Участок примыкает к магистральной железной дороге – участку Т1 (восточное направление), в том числе к железнодорожной станции №1. Это позволяет обеспечить все необходимые операции по приему и отправлению железнодорожных грузов, в том числе контейнеров.

Участок находится возле Северного объезда, что способствует быстрому выходу на Западное направление, минуя Новосибирск.

Земельный участок возле железнодорожной станции №8 наиболее предпочтителен, так как находится в непосредственной близости от станции и имеет самую низкую цену земли. Возле станции №1 уже существует логистическая инфраструктура (терминал «Евросиб»), а также идет строительство промышленно-логистического парка «Восточный».

Если рассмотреть перспективу развития восточной транспортно-логистической зоны, то станция №8 сможет занять лидирующую позицию, посредством развития промышленно-логистического парка «Восточный» и окончания строительства Восточного обхода, который через Северный обход

города Новосибирска свяжет федеральные трассы Р-255 «Сибирь» и Р-256 «Чуйский тракт», обеспечит двусторонний транзит транспорта между европейской частью России, Алтаем и Монголией.

Развитие транспортно-логистической инфраструктуры Новосибирского транспортного узла в восточной зоне позволит оптимизировать дорожное сообщение России, сократит время доставки грузов, разгрузит улично-дорожную сеть Новосибирска и улучшит городскую экологию.

Отбор потенциальных клиентов ОАО «РЖД» осуществлялся на основе следующих критериев:

- предприятия малого и среднего бизнеса, объем поставки которых составляет 500 кг в месяц;
- организационно-правовые формы организаций: общество с ограниченной ответственность (ООО), акционерные общества: публичные (ПАО) и непубличные (АО);
- максимальное удаление предприятий от границ Новосибирска – 30 км;
- отсутствие железнодорожных путей необщего пользования.

В ходе выполнения работы была построена карта Новосибирска в масштабе 1:200 000 (рис. 3), на которую были нанесены потенциальные клиенты ОАО «РЖД», автодороги федерального регионального межмуниципального местного значения (улицы) Новосибирска и Оби.

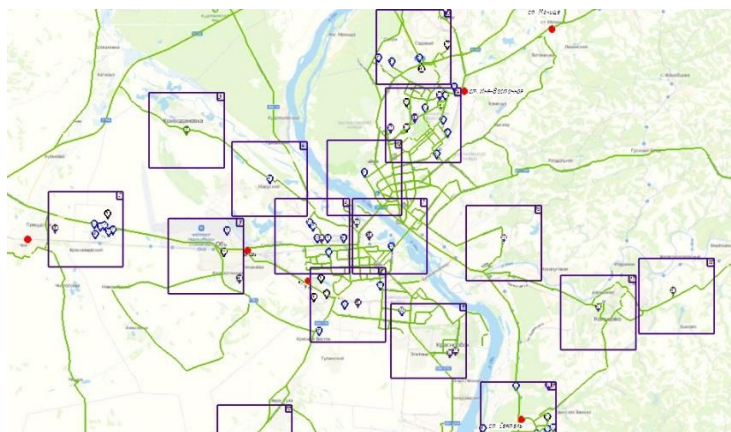


Рис. 3. Предприятия потенциальные клиенты ОАО «РЖД»

Для оптимизации расчетов все предприятия потенциальных клиентов, нанесенные на карту, были поделены на 16 секторов площадью по 4 км².

В каждом секторе гравитационным методом были определены местоположения центров тяжести. В качестве минимально возможного объема поставки была принята масса 750 кг. Объем поставки каждого сектора был рассчитан по принципу умножения минимально возможного объема на количество предприятий в соответствующем секторе (табл. 1).

Таблица 1

Пример расчета центра тяжести секторов

| Номер сектора | Координаты | | | | Адрес центров тяжести секторов |
|---------------|----------------------|-----------|--------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | предприятий секторов | | центров тяжести секторов | | |
| | x | y | x | y | |
| 1 | 55,010163 | 82,176265 | 55,0083405 | 82,19566 | Россия, Новосибирская область, Коченевский район, рабочий поселок Коченёво, ул. Молодежная, д. 8 |
| | 55,006518 | 82,215045 | | | |
| 2 | 55,003492 | 82,475262 | 55,0055084 | 82,53084 | Россия, Новосибирская область, населенный пункт 3307 км, д. 15 |
| | 55,003181 | 82,522415 | | | |
| | 55,000508 | 82,529878 | | | |
| | 55,008491 | 82,533461 | | | |
| | 55,006226 | 82,539231 | | | |
| | 55,002298 | 82,549529 | | | |
| | 55,003168 | 82,552473 | | | |
| 55,016703 | 82,544467 | | | | |

Выбор площадки, наиболее подходящей для размещения объектов МТЛЦ, производился методом частичного перебора среди выбранных ранее площадок вблизи железнодорожных станций.

Расстояния от потенциальных мест размещения МТЛЦ до каждого предприятия рассчитывались по кратчайшему пути по дорогам общего пользования.

В табл. 2 приведен расчет методом частичного перебора предполагаемого местоположения МТЛЦ вблизи станций N1 и N4.

Таблица 2

Пример расчета местоположения МТЛЦ вблизи станций N1 и N4

| Номер сектора на карте | Объем поставки, т | Грузооборот транспорта | | | |
|------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | | для железнодорожной станции N1 | | для железнодорожной станции N4 | |
| | | расстояние от МТЛЦ, км | грузооборот транспорта, т·км | расстояние от МТЛЦ, км | грузооборот транспорта, т·км |
| 1 | 1,5 | 70 | 105 | 40 | 60 |
| 2 | 6 | 47 | 282 | 13 | 78 |
| 3 | 0,75 | 39 | 29,25 | 22 | 16,5 |
| 4 | 0,75 | 29 | 21,75 | 12 | 9 |
| 5 | 2,25 | 36 | 81 | 5,3 | 11,93 |
| 6 | 5,25 | 23 | 120,75 | 10 | 52,5 |
| 7 | 2,25 | 22 | 49,5 | 14 | 31,5 |
| 8 | 5,25 | 26 | 136,5 | 16 | 84 |
| 9 | 2,25 | 27 | 60,75 | 11 | 24,75 |
| 10 | 1,5 | 43 | 64,5 | 27 | 40,5 |
| 11 | 1,5 | 51 | 76,5 | 35 | 52,5 |
| 12 | 0,75 | 32 | 24 | 60 | 45 |
| 13 | 3,75 | 8 | 30 | 29 | 108,75 |
| 14 | 9 | 4 | 36 | 25 | 225 |
| 15 | 0,75 | 14 | 10,5 | 17 | 12,75 |
| 16 | 0,75 | 26 | 19,5 | 27 | 20,25 |
| 17 | 0,75 | 32 | 24 | 35 | 26,25 |
| 18 | 0,75 | 38 | 28,5 | 41 | 30,75 |
| 19 | 6,75 | 39 | 263,25 | 59 | 398,25 |
| 20 | 2,25 | 50 | 112,5 | 49 | 110,25 |
| 21 | 2,25 | 65 | 146,25 | 69 | 155,25 |
| Итого | | | 1722 | | 1593,7 |

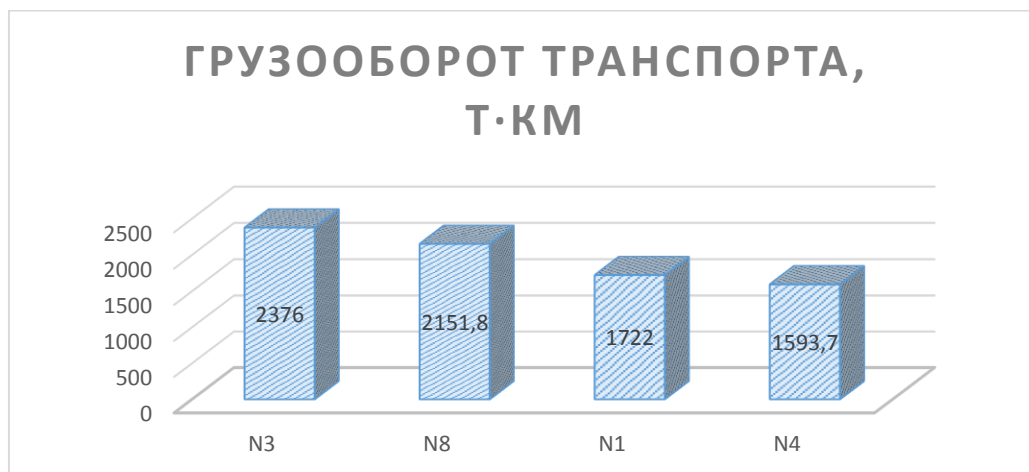


Рис. 4. Выбор предполагаемого места расположения МТЛЦ в городе Новосибирске

По результатам расчетов (рис. 4) для Новосибирского транспортного узла площадки (свободные от застройки земельные участки), расположенные вблизи станции N4 являются оптимальным вариантом для размещения объектов МТЛЦ, поскольку общий грузооборот транспорта по доставке грузов ко всем потенциальным клиентам города Новосибирска от/до данной станции является минимальным.

Данный подход позволяет решить вопросы выбора оптимального местоположения МТЛЦ, сократить пробег автотранспорта и может использоваться для определения места дислокации мультимодальных транспортно-логистических центров в других регионах страны.

Список литературы

- Гришкова, Д. Ю.** Анализ транспортно-логистической инфраструктуры Новосибирской области / Д. Ю. Гришкова // Глобальная экономика в XXI веке : роль биотехнологий и цифровых технологий : сборник научных статей по итогам работы второго круглого стола с международным участием. – Москва, 2020. – С. 170–172. – ISBN 978-5-6044657-0-7.
- Бондаренко, Е. М.** Логистический подход при выборе варианта транспортного обслуживания производственного предприятия / Е. М. Бондаренко // Инновационные технологии на транспорте : образование, наука, практика : материалы XLII Международной научно-практической конференции в рамках реализации Послания Президента РК Н. Назарбаева «Новые возможности развития в условиях четвертой промышленной революции». – Алматы, 2018. – С. 143–146. – ISBN 978-601-325-028-1.
- Псеровская, Е. Д.** Расположение городского распределительного центра : научно-методологический подход / Е. Д. Псеровская, А. П. Грешштейн // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(83). – С. 131–140. – ISSN 0201-727X.

References

- Grishkova, D. Yu.** Analysis of the transport and logistics loss of the Novosibirsk region / D. Yu. Grishkova // Global economy in the XXI study : the role of biotechnologies and digital technologies : a collection of scientific articles on the results of the second round table with the participation of peoples. – Moscow, 2020. – P. 170–172. – ISBN 978-5-6044657-0-7.
- Bondarenko, E. M.** Logistic approach to choosing the option of transport service of a manufacturing enterprise / E. M. Bondarenko // Innovative technologies in transport : education, science, practice. Materials of the XLII International Scientific and Practical Conference in the framework of the implementation of the Message of the President of the Republic of Kazakhstan N. Nazarbayev «New development opportunities in the conditions of the Fourth Industrial Revolution». – Almaty. – 2018. – P. 143–146. – ISBN 978-601-325-028-1.
- Pserovskaya, E. D.** Location of the urban distribution center: a scientific and methodological approach / E. D. Pserovskaya, A. P. Grefenstein // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 3(83). – P. 131–140. – ISSN 0201-727X.

4 **Ольховиков, С. Э.** Проектирование складской логистической системы / С. Э. Ольховиков // Наука, образование, кадры : материалы национальной конференции в рамках IX Международного Сибирского транспортного форума. – Новосибирск, 2019. – С. 152–157. – ISBN 978-5-00148-068-6.

5 **Псеровская, Е. Д.** Оценка влияния основных параметров грузовой станции на ее перерабатывающую способность / Е. Д. Псеровская, И. Н. Кагадий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1 (40). – С. 19–29. – ISSN 1815-9265.

6 **Покровская, О. Д.** Эволюционно-функциональный подход к развитию железнодорожных транспортных узлов / О. Д. Покровская // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2019) : сборник трудов. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 119–127.

7 **Ольховиков, С. Э.** Методика расчета «зеленого» аспекта работы грузового терминала / С. Э. Ольховиков, К. А. Заболоцкая // Наука, образование, кадры : материалы национальной конференции в рамках IX Международного Сибирского транспортного форума. – Новосибирск, 2019. – С. 146–152. – ISBN 978-5-00148-068-6.

8 **Юрданова, П. Е.** Анализ возможностей транспортной связи аэропорта и железнодорожного вокзала города Новосибирска на основе минимизации затрат на железнодорожную инфраструктуру и подвижной состав / П. Е. Юрданова, С. В. Карасёв // Интеллектуальный потенциал Сибири : материалы конференции. – Новосибирск, 2021. – С. 96–99. – ISBN 978-5-7782-4476-4.

9 **Уланов, А. А.** Перспективы развития интеллектуальных транспортных систем в России на примере железнодорожного транспорта / А. А. Уланов, М. П. Лыкова // Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов : сборник материалов V Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 7–12. – ISBN 978-5-93856-531-9.

10 **Покровская, О. Д.** Логистическое руководство: математические основы терминалистики, маркировка, классификация и идентификация логистических объектов железнодорожного транспорта / О. Д. Покровская. – Казань : ООО «Бук», 2017. – 281 с. – ISBN 978-5-00118-425-6.

11 **Бурдяк, П. С.** Оптимизация эксплуатации инфраструктуры железнодорожных станций на

4. **Olkhovikov, S. E.** Designing a warehouse logistics system / S. E. Olkhovikov // Science, education, personnel. Materials of the national conference within the framework of the IX International Siberian Transport Forum. – Novosibirsk, 2019. – P. 152–157. – ISBN 978-5-00148-068-6.

5 **Pserovskaya, E. D.** Assessment of the influence of the main parameters of the cargo station on its processing capacity / E. D. Pserovskaya, I. N. Kagadiy // Bulletin of the Siberian State University. – 2017. – No. 1(40). – P. 19–29. – ISSN 1815-9265.

6 **Pokrovskaya, O. D.** An evolutionary and functional approach to the development of railway transport hubs / O. D. Pokrovskaya // Development of infrastructure and logical technologies in transport systems (REALTTRANS-2019) : collection of works. – St. Petersburg, 2020. – P. 119–127.

7 **Olkhovikov, S. E.** Methodology for calculating the "green" aspect of the cargo terminal operation / S. E. Olkhovikov, K. A. Zabolotskaya // Science, education, personnel. Materials of the national conference within the framework of the IX International Siberian Transport Forum. – Novosibirsk, 2019. – P. 146–152. – ISBN 978-5-00148-068-6.

8 **Yurdanova, P. E.** Analysis of the possibilities of transport communication between the airport and the railway station of the city of Novosibirsk on the basis of minimization of costs for railway infrastructure and rolling stock / P. E. Yurdanova, S. V. Karasev // Intellectual potential of Siberia : conference materials. – Novosibirsk, 2021. – P. 96–99. – ISBN 978-5-7782-4476-4.

9 **Ulanov, A. A.** Prospects for the development of intelligent transport systems in Russia on the example of railway transport / A. A. Ulanov, M. P. Lykova // Actual problems of society, economics and law in the context of global challenges : collection of materials of the V International Scientific and Practical Conference. – St. Petersburg, 2021. – P. 7–12. – ISBN 978-5-93856-531-9.

10 **Pokrovskaya, O. D.** Logistic guidance: mathematical foundations of terminalistics, marking, classification and identification of logical objects of railway transport / O. D. Pokrovskaya. – Kazan : LLC "Buk", 2017. – 281 p. – ISBN 978-5-00118-425-6.

11 **Burdyak, P. S.** Optimization of the operation of the infrastructure of railway stations based on the

основе применения шаблона контроля постановки подвижного состава / П. С. Бурдяк, Д. А. Сивицкий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск, 2019. – № 3 (50). – С. 31–37. – ISSN 1815-9265.

use of a rolling stock control template / P. S. Burdyak, D. A. Sivitsky // Bulletin of the Siberian State University. – Novosibirsk, 2019. – No. 3(50). – P. 31–37. – ISSN 1815-9265.

S. E. Olkhovikov, E. A. Petreneva, I. N. Kagadiy, O. B. Sherstobitova

FORMATION OF JUNCTION MULTIMODAL TRANSPORT AND LOGISTICS CENTERS

Abstract. The issues of organization of Multimodal Transport and Logistics Centers (MTLC) as the leading elements of the logistics infrastructure of Russia are considered. It is given the large extent of the territory of the Russian Federation, division into administrative-territorial units, an ornate network of communication routes, the need for the transportation and processing of huge cargo volumes and the optimal choice of logistic. In future it will be necessary to form about 80 MTLC at the federal, regional and territorial level. The project of organizing a regional-level MTLC on the territory of the Novosibirsk transport hub is proposed.

Keywords: multimodal transport and logistics centers, multimodal logistics transport and distribution centers, industrial and logistics park, cargo terminal, container terminal, terminal and warehouse complex, distribution center, transport and logistics infrastructure, transport corridors, transport hub.

For citation: Formation of junction multimodal transport and logistics centers / S. E. Olkhovikov, E. A. Petreneva, I. N. Kagadiy, O. B. Sherstobitova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 106–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_106.

Сведения об авторах

Ольховиков Сергей Эдуардович

Сибирский университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,
кандидат экономических наук, доцент,
e-mail: smot@mail.ru

Петренива Елена Алексеевна

Сибирский университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,
преподаватель,
e-mail: petreneva.ea@mail.ru

Кагадий Игорь Николаевич

Сибирский университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kagaigor@mail.ru

Information about the authors

Olkhovikov Sergey Eduardovich

Siberian Transport University (STU),
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,
Candidate of Economic Sciences,
Associate Professor,
e-mail: smot@mail.ru

Petreneva Elena Alekseyevna

Siberian Transport University (STU),
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,
Lecturer,
e-mail: petreneva.ea@mail.ru

Kagadiy Igor Nikolayevich

Siberian Transport University (STU),
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kagaigor@mail.ru

Шерстобитова Ольга Борисовна

Сибирский университет путей сообщения
(СГУПС),
кафедра «Логистика, коммерческая работа и
подвижной состав»,
аспирант,
e-mail: olga2008sh@rambler.ru

Sherstobitova Olga Borisovna

Siberian Transport University (STU),
Chair «Logistics, Commercial Work and Rolling
Stock»,
Postgraduate Student,
e-mail: olga2008sh@rambler.ru

Н. Ф. Сирина, А. Г. Сахаров

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННЕЙ СИСТЕМ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ВОСТОЧНОГО ПОЛИГОНА

Аннотация. Определены факторы внешних и внутренней систем и проведен анализ их влияния на пропускную и перерабатывающую способность участков железных дорог Восточного полигона.

При анализе зависимости элемента пропускной способности (участковая скорость в грузовом движении) от величины рабочего парка железных дорог определена область, не отображающая принципов взаимосвязи между данными параметрами.

Проведена детализация состава образования поездопотоков Восточного полигона с учетом применения фактора – путевое развитие станций и участков железных дорог.

Определена причина снижения пропускной и перерабатывающей способности железных дорог Восточного полигона.

Ключевые слова: внешние системы, внутренняя система, пропускная способность, влияющие факторы, составообразование.

Для цитирования: Сирина, Н. Ф. Анализ влияния внешних и внутренней систем на пропускную способность участков железных дорог Восточного полигона / Н. Ф. Сирина, А. Г. Сахаров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 119–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_119.

Введение

В настоящее время вектор международной экономики направлен на восток, а это повышает темпы развития как Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), так и регионов России, в особенности Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, представляемых и отождествляемых с железнодорожной инфраструктурой Восточного полигона (ВП). Наряду с этим правительством страны поставлен комплекс задач перед ОАО «РЖД» по развитию логистической инфраструктуры, совершенствованию перевозочного процесса, внедрению инновационных продуктов для своевременной и качественной реализации транспортного потенциала государства [1].

На рис. 1 представлены фактические объемы корреспонденций грузов в смешанном сообщении (железнодорожно-морском) через железные дороги Восточного полигона и международные морские порты Дальнего Востока за 2020 год и эти же прогнозные значения на 2024 год.

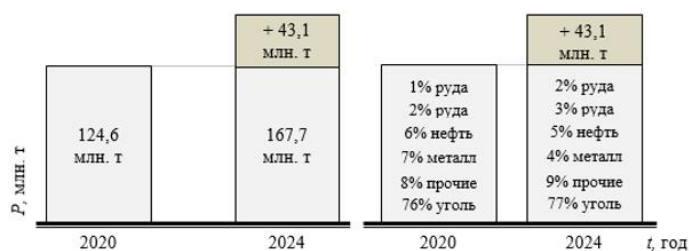


Рис. 1. Фактические объемы корреспонденций грузов в 2020 году и прогнозные объемы корреспонденций грузов на 2024 год в смешанном сообщении (железнодорожно-морском) через железные дороги Восточного полигона

Увеличение объемов корреспонденций грузов, зарождаемых в пределах Восточного полигона, а также внутренних и внешних транзитных грузопотоков приведет к значительному росту грузонапряженности всех участков железных дорог ВП [2].

Актуальность научной разработки

Наиболее эффективно достижение заданных параметров грузооборота путем повышения пропускной способности участков железных дорог. Теоретические исследования и практический опыт показывают, что методом динамического роста массы и длины грузового поезда получают максимальный результат в пропускной способности при минимальных финансовых затратах.

В советский период к формированию тяжеловесных и длинносоставных поездов приступили в 1935 году, это время характеризуется этапом достижения высокой производительности труда [3]. Начало организации движения грузовых поездов с весом и длиной, превосходящим нормы, установленные графиком, положено в 1960-е годы. Данная организация движения получила массовое применение в условиях проведения «окон» на участках железных дорог и осуществлялась по отдельному диспетчерскому расписанию [4].

Следующей мерой повышения пропускной способности стала организация обращения сдвоенных поездов, данная технология была применена впервые в 1969 году [5]. Управление такими поездами машинисты осуществляли без специализированных синхронизирующих систем, что не обеспечивало должного уровня безопасности при их эксплуатации, в свою очередь это дало толчок для развития инновационных продуктов в области синхронизации управления локомотивами, тормозами и т.д. В 1984 году на сети железных дорог вводится новый график движения поездов, в котором впервые нашли отражение «нитки» длинносоставных, сдвоенных поездов, а также было предусмотрено расписание следования порожних маршрутов [6]. Как результат, в 1984 году масса поезда по сети железных дорог увеличена на 86 тонн, в 1985 году достигнуто увеличение данного показателя от 1984 года на 78 тонн, а в 1986 году рост по сравнению с 1985 годом на 61 тонну. Более того, при снижении по стыкам железных дорог среднесуточной сдачи грузовых поездов на 1,2 процента увеличилась передача грузовых вагонов на 14,7 тысяч [7]. В целом программой увеличения массы поезда был достигнут положительный и ранее недостижимый эффект.

В настоящее время при значительном росте корреспонденций грузов на ВП, с одной стороны, актуально продолжение программы тяжеловесного и длинносоставного движения, а с другой стороны, при имеющемся развитии транспортной инфраструктуры и технологий, актуально развитие дальнейших исследований и оценки данного научно-практического опыта, актуален поиск ответов на вопросы: где предел роста массы поезда и его длины; на сколько и до какого уровня готова инфраструктура и технологии к существующим методам и способам повышения пропускной способности; когда это экономически и ситуативно целесообразно; в условиях влияния непрогнозируемых внешних факторов, трансформации транспортной модели и изменении конъюнктуры рынка транспортных услуг, какими еще методами возможно влиять на повышение пропускной способности участков железных дорог?

Методы исследования

Известно, что устойчивость перевозочного процесса характеризуется балансом между предъявляемым к перевозке объемом грузов (грузопоток) и существующими ресурсными производственными возможностями, то есть, проецируя данное на ВП, можно сделать вывод, что управление движением на данном полигоне оценивается как высокая степень использования пропускной способности участков и перерабатывающей способности. Более того, в границах ВП наличествует неравномерность грузопотоков в отдельные периоды по независимым от железнодорожной системы причинам (воздействии внешних систем). Ресурсные производственные возможности полигона характеризуются этой же отличительной чертой, то есть определенным временным периодом снижения пропускной и перерабатывающей способности. Причины этих снижений: отказы технических средств, плановые и неплановые виды ремонтных и строительных работ на транспортной инфраструктуре, специфика пропуска отдельных поездов с уменьшенной скоростью, метеорологические особенности – при этом повлиять на снижение времени действия этого периода возможно, а полностью исключить нельзя [8].

Влияющие факторы (рис. 2), при длительном периоде их воздействия, увеличивают долю рабочего парка вагонов как на отдельных участках железных дорог, так и в целом на ВП или не увеличивают рабочий парк вагонов при незначительном периоде их действия, что можно выразить следующим образом:

$$W_{1...i} \rightarrow n_{\text{раб}}^{\text{ВП}} \leq n_{\text{нор.раб}}^{\text{ВП}}, \text{ то } \sum p_{1...i} [f_{1...i}; q_{1...i}; k_{1...i}] = 0, \quad (1)$$

где $W_{1...i}$ – возмущающие внутрисистемные и внешнесистемные действия, влияющие на величины пропускной и перерабатывающей способности;

$n_{\text{раб}}^{\text{ВП}}$ – рабочий парк вагонов ВП в измеряемом периоде времени;

$n_{\text{нор.раб}}^{\text{ВП}}$ – нормативное значение рабочего парка вагонов ВП в измеряемом периоде времени;

$p_{1...i}$ – действия, решения (управляющие, координирующие), направленные на снижение величины парка вагонов;

$f_{1...i}$ – управляющие решения, характерны для внутренней системы, применяются в совокупности с факторами A_{11} и A_{12} ;

$q_{1...i}$ – управляющие действия, характерны для внутренней системы, применяются в совокупности с фактором A_{11} ;

$k_{1...i}$ – координирующие решения, характерны для внешних систем, применяются на основе факторов B_9 , B_{10} и A_{11} и A_{12} .

Если

$$W_{1...i} \rightarrow n_{\text{раб}}^{\text{ВП}} > n_{\text{нор.раб}}^{\text{ВП}}, \text{ то } \sum p_{1...i} [f_{1...i}; q_{1...i}; k_{1...i}] > 0. \quad (2)$$

На рис. 2 систематизировано представлены факторы внешних и внутренней систем, влияющие на величины пропускной и перерабатывающей способности участков железных дорог ВП.

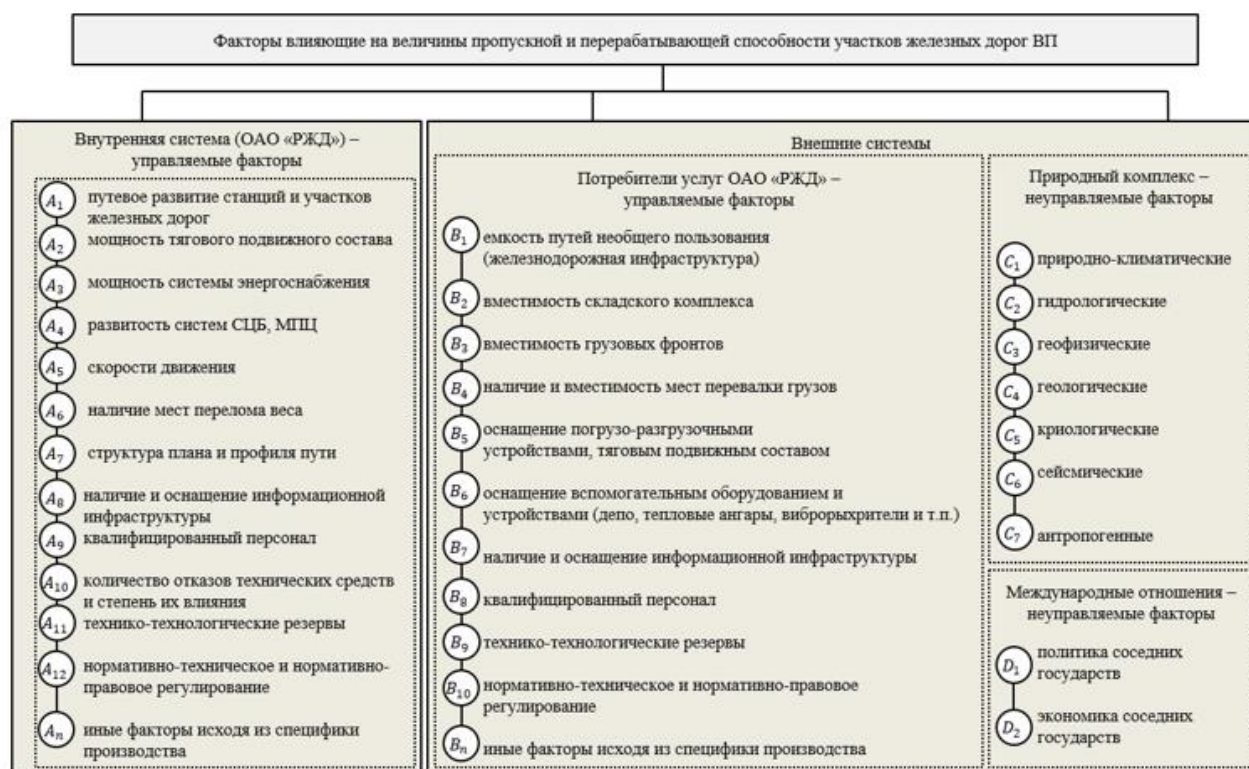


Рис. 2. Систематизированное представление влияющих факторов внешних и внутренней систем на величины пропускной и перерабатывающей способности участков железных дорог ВП

Влияние величины рабочего парка вагонов на элемент пропускной способности (участковая скорость) железных дорог в границах ВП представлено на рис. 3.

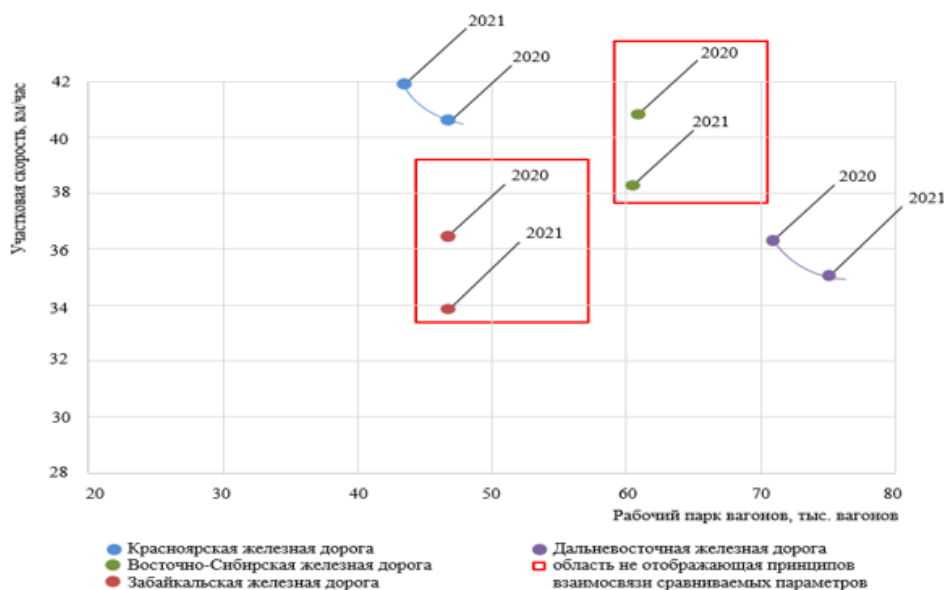


Рис. 3. Зависимость элемента пропускной способности (участковой скорости) от величины рабочего парка вагонов на железных дорогах ВП по итогам 2020 и 2021 годов

Анализ показал (рис. 3), что в границах Красноярской и Дальневосточной железных дорог, наблюдается зависимость участковой скорости от величины рабочего парка. Так, на Красноярской железной дороге среднесуточная величина рабочего парка грузовых вагонов в 2021 году снижена к 2020 году на 4,7 %, а среднесуточная участковая скорость в грузовом движении в 2021 году увеличена на 2,9 % по отношению к 2020 году; на Дальневосточной железной дороге среднесуточное содержание рабочего парка грузовых вагонов в 2021 году увеличено на 6,8 % к 2020 году, среднесуточная участковая скорость в грузовом движении за 2021 год снижена к уровню 2020 года на 2,8 %. При этом путем анализа данных в границах Забайкальской и Восточно-Сибирской железных дорог определена область, не отображающая принципов взаимосвязи между сравниваемыми параметрами. Так, на Забайкальской железной дороге в 2021 году содержание рабочего парка грузовых вагонов в среднесуточном измерении снижено на 1 %, среднесуточная участковая скорость в грузовом движении снижена на 7 % по отношению к 2020 году; на Восточно-Сибирской железной дороге значения среднесуточного рабочего парка грузовых вагонов, среднесуточной участковой скорости в грузовом движении снижены на 1,44 и 7,5 % соответственно к уровню 2020 года.

Для дальнейшего определения степени влияния грузопотоков на пропускную способность участков железных дорог ВП (области, не отображающие принципов взаимосвязи), требуется детализация составообразования поездопотоков с учетом применения фактора A_1 (см. рис. 2).

Рыночная экономика и постоянный рост объемов корреспонденций грузов в границах ВП создают такие условия, когда требуется увеличивать доходы от основного вида деятельности компании ОАО «РЖД», при этом не повышая его себестоимости [9]. В границах ВП, в контексте вышеизложенного и с целью максимального использования пропускной способности участков железных дорог, применяют комплекс методов, в том числе метод динамического роста массы и длины грузового поезда.

На рис. 4 представлена детализация составообразования поездопотоков ВП с учетом применения фактора A_1 (см. рис. 2).

| Наименование железной дороги | Доля прямо-отправочных путей вместимостью, % | | Доля главных путей вместимостью, % | |
|------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| | более 71 условного вагона от общего их количества | в том числе более 100 условных вагонов от общего их количества | более 71 условного вагона от общего их количества | в том числе более 100 условных вагонов от общего их количества |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Красноярская | 42,7 | 0,4 | 61,3 | 1,7 |
| Восточно-Сибирская | 51,7 | 1,5 | 63,44 | 1,14 |
| Забайкальская | 34,1 | 3,2 | 42 | 8,1 |
| Дальневосточная | 43,1 | 1,1 | 52,74 | 2,34 |

| Наименование железной дороги | Доля принятых поездов с условной длиной свыше 71 вагона по междорожным стыковым пунктам (2021 год в сравнении с 2020 годом), % | | Доля сданных поездов с условной длиной свыше 71 вагона по междорожным стыковым пунктам (2021 год в сравнении с 2020 годом), % | | Доля соединенных поездов (2021 год в сравнении с 2020 годом), % |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------|
| | груженое направление | порожнее направление | груженое направление | порожнее направление | |
| 1 | 2 | | 3 | | 4 |
| Красноярская | +9,8 | | +18,3 | | +26,4 |
| | груженое направление | порожнее направление | груженое направление | порожнее направление | |
| | +23,9 | -14,1 | +22,2 | -3,9 | |
| Восточно-Сибирская | +2,6 | | +16 | | -29,7 |
| | груженое направление | порожнее направление | груженое направление | порожнее направление | |
| | +24,5 | -21,8 | +37,8 | -21,8 | |
| Забайкальская | +8,7 | | -6 | | +31,8 |
| | груженое направление | порожнее направление | груженое направление | порожнее направление | |
| | +22,6 | -13,9 | +17,4 | -23,4 | |
| Дальневосточная | +18,8 | | -18 | | -12,4 |
| | груженое направление | порожнее направление | груженое направление | порожнее направление | |
| | +23,7 | -4,9 | | -18,5 | |

Рис. 4. Детализация состава образования поездопотоков ВП с учетом применения фактора A_1

Из представленных данных (рис. 4) видно, что фактор A_1 (рис. 2) наименее развит на Забайкальской железной дороге, технологическому процессу которой при имеющейся транспортной инфраструктуре было затруднительно переработать предъявленный грузопоток по составообразованию 2021 года. Так, по всем железным дорогам ВП достигнут рост принятых и сданных поездов с условной длиной свыше 71 вагона по междорожным стыковым пунктам по отношению к 2020 году, за исключением Забайкальской и Дальневосточной железных дорог, где допущено снижение к этому же периоду доли сданных поездов с условной длиной свыше 71 вагона по междорожным стыковым пунктам на 6 и 18 % соответственно, характеризуется это как изменением географии передачи поездопотоков (перераспределение передачи поездов на другие междорожные стыковые пункты), так и изменением их состава образования (поездопотоки установленной унифицированной длины). Результаты детализации состава образования поездопотоков показали, что основные принципы метода динамического роста массы и длины грузового поезда применялись при формировании груженого направления, так, всеми железными дорогами ВП в 2021 году достигнуто значительное увеличение доли принятых и сданных поездов с условной длиной свыше 71 вагона по междорожным стыковым пунктам по отношению к 2020 году, более того, на Забайкальской железной дороге увеличена доля сформированных сдвоенных поездов к уровню 2020 года на 31,8 %.

Таким образом, переориентирование структуры состава образования при формировании поездов с условной длиной свыше 71 вагона в груженом и порожнем направлениях и при недостаточном развитии фактора A_1 на Забайкальской железной дороге (рис. 4) стало причиной снижения пропускной и перерабатывающей способности Забайкальской железной дороги и, как следствие, Восточно-Сибирской железной дороги (неприем поездов по междорожным стыковым пунктам) (рис. 3).

Выводы

1 При планировании формирования длинносоставных, объединенных и соединенных поездов необходимо в том числе учитывать фактор A_1 и степень его влияния на пропускную и перерабатыва-

ющую способность участков железных дорог, а также факторы A_{10} и A_n – в части планирования технологических «окон», ремонтно-путевых и строительных работ (количество, продолжительность, имеющиеся ресурсы и т.д.).

2 Применение технологии формирования и вождения объединенных и соединенных поездов в каждом случае необходимо экономически и ситуативно подтверждать.

3 В границах ВП требуется разработка такой методологии повышения пропускной и провозной способности, которая бы увязывала существующее развитие информационного комплекса, технологий и обеспечивала экономическую доходность перевозочного процесса, а для этого требуется проведение дополнительных исследований.

Список литературы

1 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (дата обращения 10.02.2023).

2 Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 г. №769/р «Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга)». – URL: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (дата обращения 10.02.2023).

3 **Аветикян, А. А.** Опыт вождения грузовых поездов повышенной массы / А. А. Аветикян // Железнодорожный транспорт в СССР и за рубежом. Москва : Изд-во ЦНИИ ТЭИП, 1981. – Вып. 12. – С. 49–60.

4 **Паристый, И. Д.** Вождение поездов повышенного веса и длины / И. Д. Паристый, Р. Г. Черепашенцев. Москва : Транспорт, 1983. – 240 с.

5 **Югрин, О. П.** Эффективность организации тяжеловесного движения и вождения соединенных поездов / О. П. Югрин, Ю. А. Танайно // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4 (51). – С. 22–27. – ISSN 1815-9265.

6 **Розенберг, Е. Н.** О развитии бортовых и напольных систем контроля безопасности, минимизирующих влияние человеческого фактора / Е. Н. Розенберг, А. С. Коровин, В. В. Батраев // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2013. – № 5. – С. 24–35.

7 **Левин, Д. Ю.** Системное управление перевозочным процессом на железнодорожном транспорте : монография / Д. Ю. Левин. – Москва : ИНФРА-М, 2020. – 313 с. – (Научная мысль). – ISBN 978-5-16-105879-4.

References

1 The Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035 : approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 3363-r dated November 27, 2021. . – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (date of access: 02.10.2023).

2 Order of JSC "Russian Railways" dated 17.04.2018 No. 769/r "On approval of the Strategy of scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (WHITE PAPER)".

URL:http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (date of access: 02/02/2023).

3 **Avetikyan, A. A.** Experience of driving heavy freight trains. Collection of art. / A. A. Avetikyan // Railway transport in the USSR and abroad. Moscow : Publishing House of TSNII TEIP, 1981. – No. 12. – P. 49–60.

4 **Paristy, I. D.** Driving trains of increased weight and length / I. D. Paristy, R. G. Cherepashentsev. Moscow : Transport, 1983. – 240 p.

5 **Yugrina, O. P.** Efficiency of the organization of heavy traffic and driving of connected trains O. P. Yugrina, Yu. A. Tanaino // Bulletin of the Siberian State University of Railways. – 2019. – No. 4 (51). – P. 22–27. – ISSN 1815-9265.

6 **Rosenberg, E. N.** On the development of on-board and floor safety control systems that minimize the influence of the human factor / E. N. Rosenberg, A. S. Korovin, V. V. Batraev // Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways". – 2013. – No. 5. – P. 24–35.

7 **Levin, D. Yu.** System management of the transportation process in railway transport: monograph / D. Yu. Levin. – Moscow : INFRA-M, 2020. – 313 p. – (Scientific thought). – ISBN 978-5-16-105879-4.

8 **Зябиров, Х. Ш.** интегральные показатели повышения качества системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте (теория. Практика. перспективы) : монография / Х. Ш. Зябиров, И. Н. Шапкин. – Москва : Финансы и статистика, 2022. – 384 с. – ISBN 978-5-00184-064-0.

9 **Шенфельд, К. П.** Развитие методов управления перевозочным процессом в условиях рыночной экономики и реформирования железнодорожного транспорта: сборник научных трудов / К. П. Шенфельд, Е. А. Сотников. – Москва : ВНИИЖТ, 2015. – 202 с. – ISBN 978-5-91522-421-5.

8 **Zyabirov, H. S.** Integral indicators of improving the quality of the transportation process management system in railway transport (theory, practice, prospects) : monograph / H. Sh. Zyabirov, I. N. Shapkin. – Moscow : Finance and Statistics, 2022. – 384 p. – ISBN 978-5-00184-064-0.

9 **Schoenfeld, K. P.** Development of methods of transportation process management in a market economy and railway transport reform: collection of scientific papers / K. P. Schoenfeld, E. A. Sotnikov. – Moscow : VNIIZhT, 2015. – 202 p. – ISBN 978-5-91522-421-5.

N. F. Sirina, A. G. Sakharov

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL AND INTERNAL SYSTEMS ON THE CAPACITY OF RAILWAY SECTIONS OF THE EASTERN POLYGON

Abstract. The factors of external and internal systems are determined and their influence on capacity and processing capacity of the railway sections of the Eastern Polygon is analyzed. When analyzing the dependence of the capacity element (section speed in freight traffic) on the size of the working fleet of railways, an area is determined that does not reflect the principles of the relationship between these parameters. The detailed composition of the train flows of the Eastern Polygon has been carried out, taking into account the application of the factor – the track development of stations and sections of railways. The reason for the decrease in the capacity and processing capacity of the railways of the Eastern Polygon has been determined.

Keywords: external systems, internal system, capacity, influencing factors, composition.

For citation: Sirina, N. F. Analysis of the influence of external and internal systems on the capacity of railway sections of the Eastern polygon / N. F. Sirina, A. G. Sakharov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 119–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_119.

Сведения об авторах

Сирина Нина Фридриховна

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
доктор технических наук, профессор,
проректор по учебной работе и связям с производством,
e-mail: nsirina@usurt.ru

Александр Геннадьевич Сахаров

ОАО «РЖД»,
начальник департамента управления бизнес-блоком «Железнодорожные перевозки и инфраструктура»,
e-mail: salgenn@yandex.ru

Information about the authors

Sirina Nina Fridrikhovna

Ural State University of Railway Transport (USURT),
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Vice-Rector for Academic Affairs and Production Relations,
e-mail: nsirina@usurt.ru

Aleksandr Gennadievich Sakharov

JSC "Russian Railways",
Head of the Department of Management of the business unit "Railway transportation and infrastructure",
e-mail: salgenn@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 62 – 50 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_126

*А. А. Агапов, А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко***АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ***

Аннотация. Проведен анализ применения законов управления, разработанных на базе метода квазиоптимального синтеза с помощью подхода на основе условия максимума функции обобщенной мощности с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации прикладных задач управления транспортными системами на железной дороге. Построены схемы рассматриваемых систем в среде MATLAB Simulink, блок нечеткого логического вывода Такаги – Сугено реализован в Fuzzy Logic Designer. Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что предлагаемый закон управления дает возможность повысить эффективность управления по функционалам быстродействия и точности в сравнении с известным решением на основе подхода дифференциальных игр и принципа максимума Понтрягина в задачах управления типовыми динамическими объектами.

Ключевые слова: закон управления, условие максимума функции обобщенной мощности, нечеткая логика, уравнения Лагранжа 2-го рода.

Для цитирования: Агапов, А. А. Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации транспортных систем / А. А. Агапов, А. А. Костоготов, С. В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 126–135. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_126.

Введение

Необходимость решения задач управления в условиях качественного роста интенсивности транспортных потоков, числа транспортных средств, повышения интенсивности скоростного режима требует применения новых подходов к модернизации железнодорожного транспорта. Это определяет актуальность применения интеллектуальных транспортных систем (ИТС), развитие которых основывается на комплексном использовании методов интеллектуализации, теории управления, системного анализа и других дисциплин [1, 2]. Одной из функций бортовых средств ИТС является автоматическое управление [3], развитие которого происходило по направлениям расширения классов и видов задач оптимального управления, усложнения систем управления и интеграции ранее качественно различных методов управления в единый комплекс [1]. Интеллектуализация ответственных процессов управления позволит повысить безопасность движения поездов [4].

Построение системы управления может осуществляться с применением известного метода квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче [5], включающего в себя условие максимума функции обобщенной мощности.

Так как условия функционирования в процессе движения изменяются непредвиденным образом в широких пределах, представляется эффективным применять адаптивные системы управления [6, 7]. Адаптацию управления к изменению условий движения можно осуществить с помощью использования нечеткого логического вывода [8, 9], что обеспечивается за счет изменения гиперповерхности переключения [9].

В работе рассматривается вопрос применимости законов управления, построенных на основе метода квазиоптимального синтеза с применением аппарата нечеткой логики.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00812. – URL: <https://rscf.ru/project/23-29-00812>.

Цель работы – анализ эффективности законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и аппарата нечеткой логики в сравнении с известными решениями.

1 Постановка задачи синтеза управления с использованием системного подхода и формализма Лагранжа

Рассматривается совокупность динамических систем, движение которых удовлетворяет уравнению Лагранжа второго рода [10, 11]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} = u_s(t), \quad s = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_1] \subset R, \quad (1)$$

где $T = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – кинетическая энергия; $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T \in R^n$ – вектор обобщенных координат; $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n]^T \in R^n$ – вектор обобщенных скоростей; $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_n(t)]^T$ – вектор ограниченных на конечном замкнутом интервале времени $[t_0, t_1] \subset R$ управляющих обобщенных сил, $\mathbf{u} \in \bar{G}$, \bar{G} – ограниченная замкнутая область суммируемых функций; $n = \dim \mathbf{q}$ – число степеней свободы динамической системы; T – знак транспонирования; точкой обозначена производная по времени.

Такой случай «играет центральную роль при рассмотрении систем вида (1) и их обобщений» [12]. Кинетическая энергия динамической системы (1) является положительно определенной квадратичной формой обобщенных скоростей $\psi_0 \sum_{s=1}^n \dot{q}_s^2 \leq T \leq \psi_1 \sum_{s=1}^n \dot{q}_s^2$, $\psi_j = \text{const}$, $\psi_j > 0$, $j = \overline{0, 1}$, и коэффициенты матрицы кинетической энергии непрерывно дифференцируемы.

Положим, что управляющие силы $\mathbf{u}(t)$ для любых двух заданных точек расширенного координатного пространства переводят динамическую систему (1) из начального состояния $t = t_0$, $\mathbf{q}(t_0) = [q_{10}, \dots, q_{n0}]^T$, $\dot{\mathbf{q}}(t_0) = [\dot{q}_{10}, \dots, \dot{q}_{n0}]^T$ в конечное состояние $t = t_1$, $\mathbf{q}(t_1) = [q_{11}, \dots, q_{n1}]^T$, $\dot{\mathbf{q}}(t_1) = [\dot{q}_{11}, \dots, \dot{q}_{n1}]^T$.

Для определенности

$$\bar{G} = \{u_s(t) : |u_s| \leq h_s, h_s = \text{const}, s = \overline{1, n}\},$$

$$h_0 = \min_{1 \leq s \leq n} h_s > 0.$$

Тогда в соответствии с [13] выполняется необходимое и достаточное условие управляемости исследуемого класса лагранжевых динамических систем (1).

Пусть задана скалярная непрерывная вместе со своими частными производными определенно-положительная целевая функция $F(\mathbf{q})$. Задача синтеза управления системой (1) состоит в поиске управляющих обобщенных сил, доставляющих минимум целевому функционалу

$$I[\mathbf{q}] = \int_{t_0}^{t_1} F(\mathbf{q}) dt \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in \bar{G}}$$

при вышеприведенных условиях.

2 Построение квазиоптимальных законов управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода

Конструктивным подходом к решению задачи квазиоптимального синтеза управления является подход на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче, который включает в себя условие максимума функции обобщенной мощности, что позволяет определить структуру управления в виде [5]

$$u_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \lambda^{-1} (\mu_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{q}_s + V_s(\mathbf{q})), \quad s = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа, μ_s – синтезирующая функция, V_s – фиктивная обобщенная сила, зависящая от формы задания целевого функционала [14], $V_s = \frac{\delta F}{\delta q_s}$, $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$ – обобщенные координаты и скорости, n – количество степеней свободы системы.

В задаче управления объектом с несколькими степенями свободы существует возможность применения метода декомпозиции [15], что позволит исключить из рассмотрения взаимовлияние между степенями свободы и строить законы управления для множества независимых подсистем.

Адаптацию параметров закона управления в подсистеме можно обеспечить за счет применения аппарата нечеткой логики и построения блока нечеткого логического вывода, который позволяет определять параметр закона управления в зависимости от текущего состояния системы [16, 17].

Для управления отдельной подсистемой в работе [9] был предложен закон управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности (2) и нечеткого логического вывода, который имеет вид

$$u_{cmp} = sat \left[k_1 \left(q + k_2 \frac{\dot{q}|\dot{q}|}{|q| + \tilde{k}_3} \right) \right], \quad (3)$$

где k_1, k_2 – параметры управления, \tilde{k}_3 – параметр на основе нечеткого логического вывода, $sat(\psi)$ – функция насыщения, обеспечивающая сглаживание скользящего режима [18]:

$$sat\psi = \begin{cases} 1, & \psi > \varepsilon, \\ \frac{\psi}{\varepsilon}, & |\psi| \leq \varepsilon, \\ -1, & \psi < -\varepsilon, \end{cases} \quad (4)$$

где ε – малая положительная постоянная.

Параметр \tilde{k}_3 формируется на основе нечеткого логического вывода Такаги – Сугено [17, 19] с базой правил

$$\begin{aligned} R_1 : q = \alpha_1 &\Rightarrow y_1, \\ R_2 : q = \alpha_2 &\Rightarrow y_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где α_1, α_2 – нечеткие лингвистические термы блока фаззификации, в котором выполняется процедура определения значений функций принадлежности $m_1(q)$, $m_2(q)$ соответственно; y_1, y_2 – выходные переменные блока вывода [17].

Так как база правил (5) содержит только одну лингвистическую переменную, этапы агрегирования подусловий и активизации подзаключений в нечетких правилах продукций выполняются тривиальным образом. Аккумуляция заключений нечетких правил продукций для нечеткого логического вывода Такаги – Сугено фактически отсутствует [20].

Дефаззификация осуществляется следующим образом. Выходной сигнал представляет собой нормализованную взвешенную сумму заключений y_1 и y_2 :

$$\tilde{k}_3 = \frac{m_1(q)y_1 + m_2(q)y_2}{m_1(q) + m_2(q)}. \quad (6)$$

Заключения y_1, y_2 определяются в процессе настройки нечеткого логического вывода Такаги – Сугено в соответствии с моделью выбранного объекта управления. Применение нечеткого параметра \tilde{k}_3 позволяет изменять гиперповерхность переключения в зависимости от текущего состояния системы, что дает возможность адаптации к априорно неизвестным начальным условиям функционирования системы.

Блок системы управления на основе предлагаемого закона (3) представлен на рис. 1.

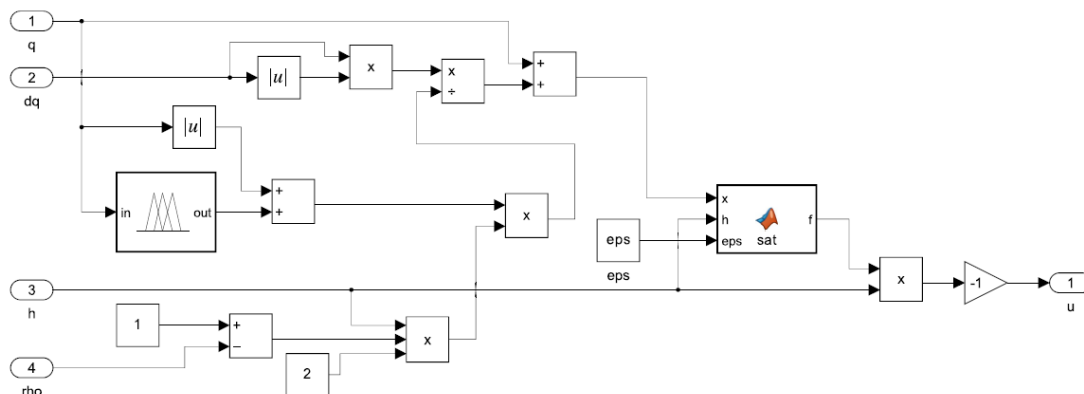


Рис. 1. Схема в MATLAB Simulink построенного управления (3)

В качестве показателя эффективности управления рассмотрим функционал быстродействия [21]

$$J_t = \int_{t_0}^{t_k} dt, \quad (7)$$

где t_0 – начало управления, t_k – время достижения заданной окрестности терминальной точки $q_k = \pm\xi$, $\dot{q}_k = \pm\xi$, примем $\xi = 10^{-3}$.

Моделирование

Рассмотрим модель движения [18] в среде с сопротивлением, которая в первом приближении описывает динамику движения высокоскоростного транспорта

$$\ddot{q} = -0.8\dot{q}^2 + u, \quad (8)$$

схема системы представлена на рис. 2.

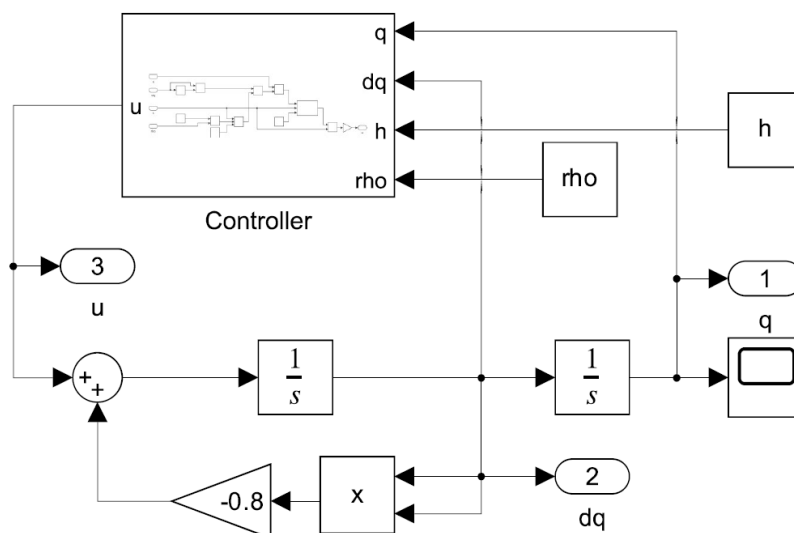


Рис. 2. Схема в MATLAB Simulink системы (8)

Для системы (8) в работе [9] выходные переменные базы правил (5) были определены как $y_1 = 2$, $y_2 = 0,53$, функции принадлежности $m_1(q)$, $m_2(q)$ определены в виде

$$m_1(q) = \frac{1}{1 + e^{-12(q-0.5)}}, \quad m_2(q) = \frac{1}{1 + e^{12(q-0.5)}},$$

их графики представлены на рис. 3.

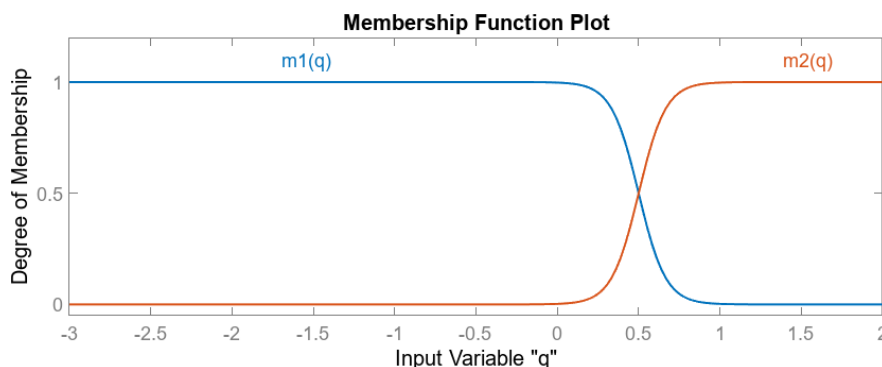


Рис. 3. Функции принадлежности нечетких лингвистических терм базы правил (5), реализованы в программном пакете MATLAB Fuzzy Logic Designer

Сравним разработанное управление (3) с известным управлением, предложенным для системы (8), которое представлено на рис. 4 и имеет вид [18]

$$\begin{aligned} u_{resh} &= h \text{sat}(\psi(q, \dot{q})), \\ \psi(q, \dot{q}) &= -q - k \cdot \dot{q} |\dot{q}|, \\ k &= [2h(1-\rho)]^{-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

где h – ограничение на управление, ρ – постоянная, определяющая величину независимых ограниченных возмущений v : $|v| \leq \rho h$, $\rho < 1$. Так, для системы (8) величина ρ соответствует максимальному по модулю значению $v = -0.8\dot{q}^2$.

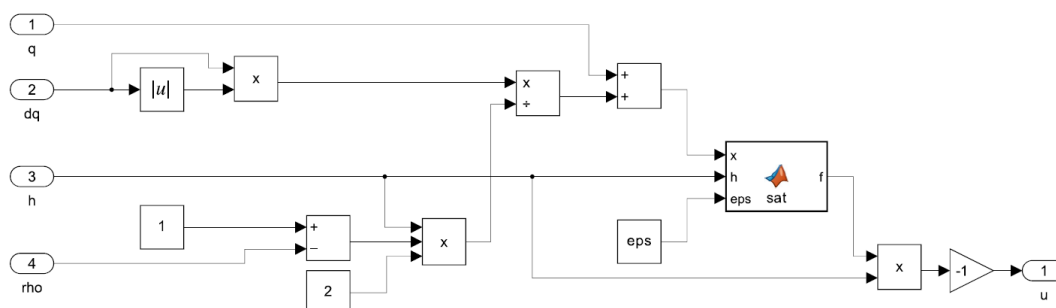


Рис. 4. Схема в MATLAB Simulink управления (9), блок sat реализован в соответствии с (4)

Значения показателя эффективности (7) для систем (8), (3) и (8), (9) с параметрами [9, 18] $\varepsilon = 10^{-3}$, $h = 1$, $k_1 = -1$, $k_2 = [2h(1-\rho)]^{-1}$ на области начальных условий $q_0 = -1$, $\dot{q}_0 \in [-1, 1]$ представлены на рис. 5. Так как на выбранном интервале $\dot{q}_0 \in [-1, 1]$ максимальное по модулю значение $v = -0.8\dot{q}^2 = 0.8$, определим $\rho = 0.8$.

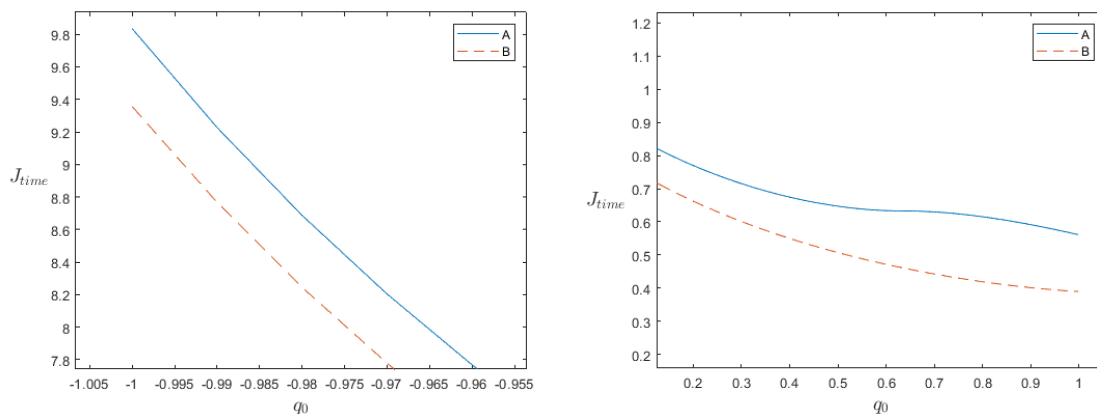


Рис. 5. Значения показателя (7) (левый и правый края интервала \dot{q}_0) при управлении системой (8):

A – известное управление (9), *B* – для построенное управление (3)

Результаты моделирования показывают, что на рассмотренной области начальных условий разработанное управление (3) доставляет выигрыш по функционалу (7) в сравнении с управлением (9).

Рассмотрим модель тягового электропривода поезда в виде апериодического звена второго порядка [22], представленную на рис. 6:

$$T_1 T_2 \ddot{x} + (T_1 + T_2) \dot{x} + x = u, \quad (10)$$

где $T_1 = 1,44$ с, $T_2 = 2,53$ с, $x = q - q^*$, q соответствует силе тяги/электрическому торможению, развиваемому локомотивом; q^* – целевое значение силы тяги/электрического торможения.

Поскольку управление силой тяги осуществляется с учетом равнодействующей сил основного и дополнительного сопротивления движению [22], которые можно рассматривать как априорно неизвестные мешающие возмущения, то рассматриваемые управления (3) и (9) могут быть реализованы при наличии сведений о величине r максимально возможных априорно неизвестных возмущений.

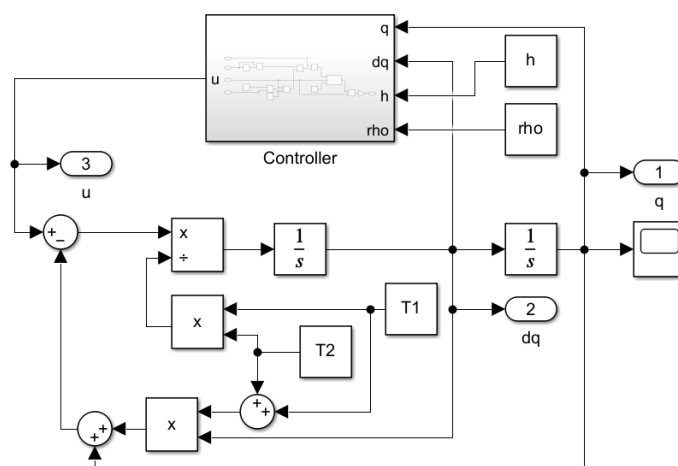


Рис. 6. Схема модели тягового электропривода поезда (10)

Помимо показателя (7) эффективность электропривода целесообразно определять по показателю точности [23], который выражается квадратичным функционалом

$$J_x = \int_{t_0}^{t_k} x^2 dt. \quad (11)$$

Значения показателя эффективности (7) для систем (10), (3) и (10), (9) с параметрами [9, 18] $\varepsilon = 10^{-3}$, $\rho = 0,76$, $h = 5$, $k_1 = -1$, $k_2 = [2h(1-\rho)]^{-1}$ и начальными условиями $x_0 = 1$, $\dot{x}_0 = 0,7$: для системы (10), (9) – 1,537 с, для системы (10), (3) – 1,213 с. Значения по показателю (11): для системы (10), (9) – 0,515 м², для системы (10), (3) – 0,479 м². Поведение систем на фазовой плоскости представлено на рис. 7.

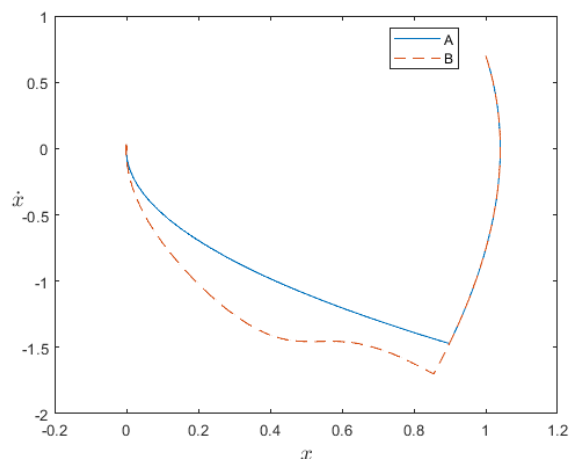


Рис. 7. Поведение системы (10) на фазовой плоскости под управлениями: A – (9), B – (3)

Результаты моделирования показывают, что предлагаемое управление (3) обеспечивает выигрыш по показателю эффективности (7) 21,4 % в сравнении с известным управлением (9), при этом

имеет место проигрыш на 19,72 % по функционалу $J_v = \int_{t_0}^{t_k} v^2 dt$.

Заключение

Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что закон управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и аппарата нечеткой логики дает возможность повысить эффективность управления по функционалу быстродействия и квадратичному функционалу в сравнении с известными решениями при управлении различными динамическими объектами.

Разработанный закон управления при детализации математической модели динамики движения с учетом особенностей работы электропривода поезда может быть использован в составе комплекса автоматизированного управления подвижным составом как элемент интеллектуальной транспортной системы.

Список литературы

- 1 Маркелов, В. М. Интеллектуальные транспортные системы как инструмент управления / В. М. Маркелов, И. В. Соловьев, В. Я. Цветков // Economic Consultant. – 2014. – № 3(7). – С. 42–49. – ISSN 2686-9012.
- 2 Цветков, В. Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью / В. Я. Цветков // Мир транспорта. – 2013. – № 5 (49). – С. 6–9. – ISSN 1992-3252.
- 3 Жанказиев, С. В. Интеллектуальные транспортные системы в обеспечении безопасности дорожного движения / С. В. Жанказиев // Актуальные проблемы деятельности по обеспечению безопасности дорожного движения (состояние, проблемы,

References

- 1 Markelov, V. M. Intelligent transport systems as a management tool / V. M. Markelov, I. V. Soloviev, V. Ya. Tsvetkov // Economic consultant. – 2014. – No. 3 (7). – P. 42–49. – ISSN 2686-9012.
- 2 Tsvetkov, V. Ya. Integral control of a high-speed highway / V. Ya. Tsvetkov // Mir Transporta. – 2013. – No. 5 (49). – P. 6–9. – ISSN 1992-3252.
- 3 Zhankaziev, S. V. Intelligent Transport Systems in Ensuring Road Safety / S. V. Zhankaziev // Actual problems of road safety activities (state, problems, ways of improvement) : materials of the interdepartmental scientific and practical

пути совершенствования) : материалы межведомственной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 124–128. – ISBN 978-5-91837-156-5.

4 Обеспечение надёжности и безопасности прицельного торможения подвижного состава на тупиковых путях станций / В. М. Абрамов, Б. Д. Никифоров, М. Ю. Капустин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 1 (37). – С. 95–101. – ISSN 0201-727X.

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

6 **Шалягин, Д. В.** Интеллектуализация систем управления / Д. В. Шалягин, Е. Н. Розенберг, В. И. Астрахан // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 12. – С. 21–23. – ISSN 0044-4448.

7 **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.

8 **Furtat, I. B.** Robust adaptive control with disturbances compensation : 12th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing ALCOSP 2016 / I. B. Furtat, J. V. Chugina // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, No. 13. – P. 117–122. – DOI 10.1016/j.ifacol.2016.07.937.

9 **Агапов, А. А.** Построение закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода / А. А. Агапов, А. А. Костоглотов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 4(216). – С. 35–40. – DOI 10.17213/1560-3644-2022-4-35-40.

10 **Новоселов, В. С.** Вариационные методы в механике / В. С. Новоселов. – Ленинград : Изд-во Ленинградского университета, 1966. – 72 с.

11 **Лурье, А. И.** Аналитическая механика / А. И. Лурье. – Москва : Физматгиз, 1961. – 824 с.

12 **Пятницкий, Е. С.** Синтез иерархических систем управления механическими и

conference. – St. Petersburg, 2019. – P. 124–128. – ISBN 978-5-91837-156-5.

4 Ensuring the reliability and safety of targeted braking of rolling stock on dead-end tracks of stations / V. M. Abramov, B. D. Nikiforov, M. Yu. Kapustin [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2010. – No. 1 (37). – P. 95–101. – ISSN 0201-727X.

5 **Kostoglotov, A. A.** A method of quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem using asynchronous variation / A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Theory and control systems. – 2021. – Vol. 6, No. 6. – P. 3–12. – DOI 10.31857/S0002338821060111.

6 **Shalyagin, D. V.** Intellectualization of control systems / D. V. Shalyagin, E. N. Rozenberg, V. I. Astrakhan // Railway Transport. – 2014. – No. 12. – P. 21–23. – ISSN 0044-4448.

7 **Kapustin, M. Yu.** Model of an adaptive system for targeted electro-pneumatic braking of an electric train / M. Yu. Kapustin, S. I. Krasnolobov, P. S. Sarkisyan // Nauka i Tekhnika Transporta. – 2011. – No. 4. – P. 33–43. – ISSN 2074-9325.

8 **Furtat, I. B.** Robust adaptive control with disturbances compensation : 12th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing ALCOSP 2016 / I. B. Furtat, J. V. Chugina // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, No. 13. – P. 117–122. – DOI 10.1016/j.ifacol.2016.07.937.

9 **Agapov, A. A.** Construction of a Control Law Based on the Maximum Condition of the Generalized Power Function and Fuzzy Logical Inference / Agapov, A. A., Kostoglotov, A. A. // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. North Caucasian Region. Technical Sciences. – 2022. – No. 4(216). – P. 35–40. – DOI 10.17213/1560-3644-2022-4-35-40.

10 **Novoselov, V. S.** Variational methods in mechanics / V. S. Novoselov. – Leningrad : Publishing house of the Leningrad University, 1966. – 72 p.

11 **Lurie, A. I.** Analytical mechanics / A. I. Lurie. – Moscow : Fizmatgiz, 1961. – 824 p.

12 **Pyatnitsky, E. S.** Synthesis of hierarchical control systems for mechanical and

электромеханическими объектами на принципе декомпозиции. I / Е. С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1989. – Т. 50, № 1. – С. 87–99. – ISSN 0005-1179.

13 **Пятницкий, Е. С.** Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями / Е. С. Пятницкий // Автоматика и телемеханика. – 1996. – Т. 57, № 12. – С. 29–37. – ISSN 0005-1179.

14 **Костоглотов, А. А.** Объединенный принцип максимума в информационных технологиях анализа и синтеза : монография / А. А. Костоглотов, А. И. Костоглотов, С. В. Лазаренко. – Ростов-на-Дону : РТИСТ, 2010. – 164 с. – ISBN 978-5-91403-036-7.

15 **Пятницкий, Е. С.** Принцип декомпозиции в управлении механическими системами / Е. С. Пятницкий // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 300, № 2. – С. 300–303. – ISSN 0002-3264.

16 **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с. – ISBN 978-5-9963-1495-9.

17 **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия, 2006. – 452 с. – ISBN 5-93517-103-1.

18 **Ананьевский, И. М.** Непрерывное управление механической системой на основе метода декомпозиции / И. М. Ананьевский, С. А. Решмин // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 3–17. – DOI 10.7868/S0002338814040027.

19 **Штовба, С. Д.** Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. – Москва : Горячая линия, 2007. – 288 с. – ISBN 5-93517-359-X.

20 **Леоненков, А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с. – ISBN 5-94157-087-2.

21 The minimum time control of electromechanical positional system / V. P. Kurgan, K. V. Pavlovich, A. A. Pankin, P. A. Aleksandrovich // Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. – 2016. – Vol. 24, No. 1. – P. 116–121. – DOI 10.14498/tech.2016.1.%u.

22 **Притыкин, Д. Е.** Метод обратных задач динамики для синтеза регулятора скорости магистрального электровоза / Д. Е. Притыкин //

electromechanical objects based on the principle of decomposition. I / E. S. Pyatnitsky // Avtomatika i Telemekhanika. – 1989. – Vol. 50, No. 1. – P. 87–99. – ISSN 0005-1179.

13 **Pyatnitsky, E. S.** Controllability of classes of Lagrangian systems with bounded controls / E. S. Pyatnitsky // Avtomatika i Telemekhanika. – 1996. – Vol. 57, No. 12. – P. 29–37. – ISSN 0005-1179.

14 **Kostoglotov, A. A.** The combined maximum principle in information technologies of analysis and synthesis : a monograph / A. A. Kostoglotov, A. I. Kostoglotov, S. V. Lazarenko. – Rostov-on-Don : RTIST, 2010. – 164 p. – ISBN 978-5-91403-036-7.

15 **Pyatnitsky, E. S.** Decomposition principle in the control of mechanical systems / E. S. Pyatnitsky // Doklady of the USSR Academy of Sciences. – 1988. – Vol. 300, No. 2. – P. 300–303. – ISSN 0002-3264.

16 **Pegat, A.** Fuzzy modeling and control / A. Pegat. – Moscow : BINOM. Knowledge Laboratory, 2013. – 798 p. – ISBN 978-5-9963-1495-9.

17 **Rutkovskaya, D.** Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems / D. Rutkovskaya, M. Pilinsky, L. Rutkovsky. – Moscow : Goryachaya Liniya, 2006. – 452 p. – ISBN 5-93517-103-1.

18 **Ananievsky, I. M.** Continuous control of a mechanical system based on the decomposition method / I. M. Ananievsky, S. A. Reshmin // Izvestiya Russian Academy of Science. Theory and control systems. – 2014. – No. 4. – P. 3–17. – DOI 10.7868/S0002338814040027.

19 **Shtovba, S. D.** Designing fuzzy systems using MatLab / S. D. Shtovba. – Moscow : Goryachaya Line, 2007. – 288 p. – ISBN 5-93517-359-X.

20 **Leonenkov, A. V.** Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH / A. V. Leonenkov. – St. Petersburg : BHV-Petersburg, 2005. – 736 p. – ISBN 5-94157-087-2.

21 The minimum time control of electromechanical positional system / V. P. Kurgan, K. V. Pavlovich, A. A. Pankin, P. A. Aleksandrovich // Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. – 2016. – Vol. 24, No. 1. – P. 116–121. – DOI 10.14498/tech.2016.1.%u.

22 **Priytkin, D. E.** The method of inverse problems of dynamics for the synthesis of the speed controller of the main electric locomotive /

Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 48–54. – ISSN 0136-3360.

23 Динамика электропривода с нечётким регулятором / С. В. Ланграф, А. И. Сапожников, А. С. Глазырин [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 168–173. – ISSN 1684-8519.

D. E. Pritykin // News of Higher Educational Institutions. Electromechanics. – 2012. – No. 5. – С. 48–54. – ISSN 0136-3360.

23 Dynamics of an electric drive with a fuzzy controller / S. V. Langraf, A. I. Sapozhnikov, A. S. Glazyrin [et al.] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2010. – Vol. 316, No. 4. – P. 168–173. – ISSN 1684-8519.

A. A. Agapov, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF QUASI-OPTIMAL CONTROL LAWS USING FUZZY LOGIC APPARATUS IN TASKS OF INTELLECTUALIZATION OF TRANSPORT SYSTEMS

Abstract. The analysis of the control laws application developed on the basis of the method of quasi-optimal synthesis using the approach based on the condition of the maximum of the generalized power function using the apparatus of fuzzy logic in the problems of intellectualization of applied problems of control of transport systems on the railway is carried out. The schemes of the considered systems are constructed in the MATLAB Simulink environment, the Takagi-Sugeno fuzzy inference block is implemented in the Fuzzy Logic Designer. An analysis of the simulation results allows us to state that the proposed control law makes it possible to increase the efficiency of control in terms of speed and accuracy functional in comparison with the known solution based on the approach of differential games and the Pontryagin maximum principle in control problems for typical dynamic objects.

Keywords: control law, maximum condition for the generalized power function, fuzzy logic, Lagrange equations of the 2nd kind.

For citation: Agapov, A. A. Analysis of the efficiency of quasi-optimal control laws using fuzzy logic apparatus in tasks of intellectualization of transport systems / A. A. Agapov, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 126–135. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_126.

Сведения об авторах

Агапов Александр Андреевич
ГТРК «Дон-ТР» (Филиал ФГУП ВГТРК),
инженер 1-й категории,
e-mail: agapov2794@gmail.com

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

Лазаренко Сергей Валерьевич
Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Связь на железнодорожном транспорте»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: lazarenkosv@icloud.com

Information about the authors

Agapov Alexander Andreyevich
Don-TR (a Branch of RTR),
Engineer of 1st Category,
e-mail: agapov2794@gmail.com

Kostoglotov Andrey Alexandrovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Communication on Railway Transport»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: kostoglotov@icloud.com

Lazarenko Sergey Valerievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Communication on Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: lazarenkosv@icloud.com

Е. А. Альтман, А. В. Александров

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ОТ ОБЪЕМА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ДАННЫХ

Аннотация. Приведен краткий анализ зависимости быстродействия алгоритмов расчета быстрого преобразования Фурье от объема обрабатываемых данных. Все существующие алгоритмы в работе не учитывают аппаратные возможности вычислительных устройств в полном объеме. В результате неоптимального использования памяти процессоров для различных объемов данных количество операций может сильно возрасти. Визуальный анализ графиков зависимостей производительности быстрого преобразования Фурье (БПФ) от его размера позволяет предположить кусочно-непрерывный характер этой зависимости и причины возникновения различных непрерывных участков графика. При разработке реализаций алгоритмов, использующих БПФ, необходимо получить метод численной оценки границ участков графиков. Разрабатываемый метод позволяет с высокой степенью достоверности определить границы участков на графике зависимости производительности БПФ от его размера, на которых изменяется производная графика. Алгоритмы цифровой обработки сигналов, использующие БПФ, желательно разрабатывать таким образом, чтобы размер БПФ не превышал границу, определяемую объемом кэш-памяти первого уровня.

Ключевые слова: быстрое преобразование Фурье, кусочно-линейная аппроксимация, вычислительная эффективность, производительность, быстродействие, архитектура аппаратных средств, границы участков.

Для цитирования: Альтман, Е. А. Анализ зависимости быстродействия быстрого преобразования Фурье от объема обрабатываемых данных / Е. А. Альтман, А. В. Александров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 136–143. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_136.

Введение

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) помимо непосредственного вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ) находит применение и для быстрого вычисления других операций. Хорошо известны и широко применяются алгоритмы вычисления с помощью БПФ свертки, корреляции, перемножения матриц и других операций [1].

Обычно операции, вычисление которых ускоряется с помощью БПФ, имеют квадратичную зависимость сложности операции от объема обрабатываемых данных. Если N – это количество чисел в исходных данных, то количество требуемых для вычисления операций равно $C \cdot N^2$, где C – это некоторый коэффициент. Применение БПФ позволяет изменить формулу для количества вычислительных операций на $C' \cdot \log(N)$, при этом C' в несколько раз больше, чем C . Эффективность применения БПФ зависит от соотношения коэффициентов C , C' и N , обычно алгоритм с использованием БПФ показывает наибольшую эффективность при достаточно большом значении N .

Вопрос о целесообразности использования БПФ для быстрой реализации операций свертки осложняется еще двумя факторами.

Во-первых, часть алгоритмов позволяют использовать БПФ различной длительности. Например, для вычисления свертки через БПФ существуют различные подходы к применению БПФ (перекрывание с накоплением, перекрывание с суммированием), причем в каждом из подходов возможно применение БПФ различной длины.

Во-вторых, при практической реализации БПФ его реальное быстродействие зависит от количества требуемых вычислительных операций нелинейно. Данная зависимость носит сложный характер и зависит от ряда факторов, определяемых архитектурой системы. Прежде всего это количество регистров процессоров, объем кэш-памяти каждого уровня, объем оперативной памяти и др.

В данной статье исследуется вопрос о виде зависимости практического быстродействия БПФ от размера преобразования, в частности, вопрос нахождения границ участков этой зависимости, на которых применение БПФ наиболее эффективно.

Обзор проблемы

Теоретическое быстродействие алгоритмов БПФ принято определять по количеству арифметических операций, требуемых для выполнения преобразования. Классическому алгоритму БПФ Кули – Тьюки требовалось выполнить примерно $5N \log(N)$ вещественных арифметических операций. Предложенный в 1968 году алгоритм Split Radix FFT снизил это число до $4N \log(N)$. В 2007 году это число удалось снизить до $(\frac{34}{9} \approx 3,78)N \log(N)$ [2].

Практическое быстродействие реализаций алгоритмов БПФ в некоторой степени коррелирует с теоретическим, однако не в меньшей степени зависит от архитектуры вычислительного устройства, качества реализации и степени оптимизации программного обеспечения. Хотя зависимость времени выполнения БПФ от его размера носит такой же характер ($C'' \cdot N \log(N)$), коэффициент C'' может быть определен только экспериментально.

В [3] для определения практического быстродействия БПФ используется величина, названная *производительность БПФ* (FFT performance). Данная величина измеряется в мегафлопсах (mflops, flops – Floating-point OPERations per Second, количество операций с плавающей точкой в секунду). Численно эта величина для комплексного преобразования определяется как

$$mflops = \frac{5N \log(N)}{t},$$

а для вещественного как

$$mflops = \frac{2.5N \log(N)}{t},$$

где t – время выполнения одного преобразования БПФ в микросекундах.

Физический смысл производительности БПФ заключается в том, что эта величина показывает количество вычислительных операций алгоритма БПФ, выполняемых вычислительным устройством за одну секунду.

В идеальном вычислительном устройстве, в котором нет задержек в доставке операндов к арифметико-логическому устройству (АЛУ), производительность БПФ была бы константой, определяемой количеством и быстродействием АЛУ. В реальном устройстве из-за ограничений в количестве регистров процессора, пропускной способности шины, объема кэш-памяти и др. АЛУ не загружается полностью и производительность падает.

Рассмотрим примеры зависимостей быстродействия БПФ от объема данных, представленные на рис. 1. Расчет проводился с помощью ЭВМ на базе процессора Intel i3 10105 3,7 ГГц. На этом рисунке по оси абсцисс в логарифмическом масштабе отложен размер БПФ, по оси ординат – производительность БПФ в mflops. На рисунке показаны производительность прямого БПФ для комплексных вещественных чисел с двойной точностью.

Обе зависимости имеют явно выраженные участки с различными наклонами графика. На первом участке производительность быстро нарастает, на втором не изменяется или медленно падает, на третьем падает быстро.

Можно предположить, что такой вид зависимости связан с архитектурой памяти устройства. На первом участке ограничения производительности связаны с недостаточным объемом операндов, чтобы загрузить все АЛУ вычислительного устройства. На втором участке вступает ограничение, связанное с объемом одного из уровней кэш-памяти, на третьем – аналогичное ограничение на другом уровне архитектуры памяти. Из этого предположения следует, что точность определения изломов на границах участков играет существенную роль в корректном определении зависимости быстродействия БПФ от его размеров.

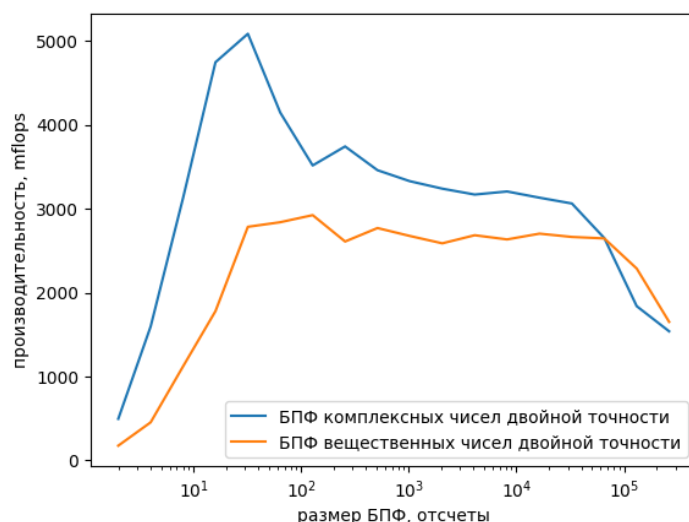


Рис. 1. Сравнение производительности БПФ для комплексных и вещественных чисел с двойной точностью

Для проверки нашего предположения рассмотрим еще одну пару графиков зависимости производительности от размера БПФ, представленную на рис. 2, где показаны зависимости БПФ для чисел с одинарной и двойной точностью.

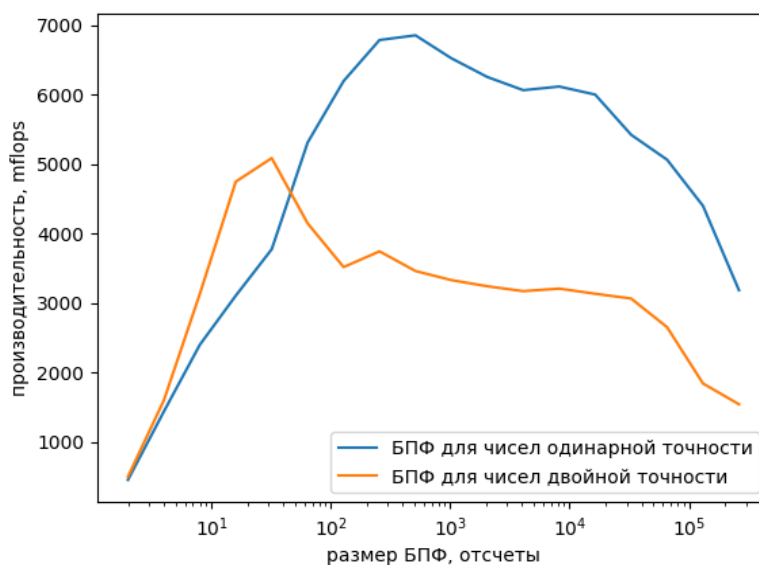


Рис. 2. Смещение границ участков в зависимости от типа данных

Данное предположение согласуется с тем, что границы участков графика зависимости БПФ для вещественных чисел сдвинуты в большую область относительно границ участков БПФ для комплексных чисел (из-за этого в конце мы наблюдаем пересечение графиков). Очевидно, это происходит вследствие того, что комплексные числа занимают в два раза больше места в памяти, чем вещественные.

На рис. 2 мы опять наблюдаем, что границы участков для БПФ, работающего с меньшими объемами данных (с одинарной точностью), смещены вправо относительно границ участков для БПФ, работающего с большими объемами данных (с двойной точностью).

Предлагаемый метод

Визуальный анализ графиков зависимостей производительности БПФ от его размера позволяет предположить кусочно-непрерывный характер этой зависимости и причины наличия различных непрерывных участков графика. Для получения научно-обоснованных выводов и практического их применения при разработке реализаций алгоритмов, использующих БПФ, необходимо получить метод

численной оценки границ участков графиков (далее по тексту – метод) и определить достоверность этой оценки.

В открытом доступе имеется достаточно большая база результатов измерений производительности БПФ [4]. Хотя ее размер недостаточен для использования методов машинного обучения, данных достаточно для статистической проверки разрабатываемого нами метода.

Критерием достоверности метода будет минимальное значение среднеквадратического отклонения получаемых им оценок границ участков для разных алгоритмов БПФ при заданном вычислительном устройстве и типе преобразования БПФ (далее для краткости под термином «отклонения» будем подразумевать такого рода отклонения). Алгоритм применялся для расчетов свертки с использованием различных методов БПФ и аппаратных электронно-вычислительных устройств различных архитектур (одно и многоядерных).

В качестве базового варианта получения численных оценок границ участков графиков было рассмотрено применение известных алгоритмов аппроксимации кусочно-непрерывных функций. В качестве реализации таких алгоритмов выбрана библиотека для кусочно-линейной аппроксимации `pwlt` (piecewise linear functions) языка Python.

В результатах оценки границ на графиках производительности БПФ с помощью кусочно-линейной аппроксимации наблюдались существенные отклонения. Анализ показал, что они возникают из-за особенностей кусочно-линейной аппроксимации, которые можно увидеть на примере графика производительности комплексного преобразования Фурье библиотекой `fftw3` (рис. 3).

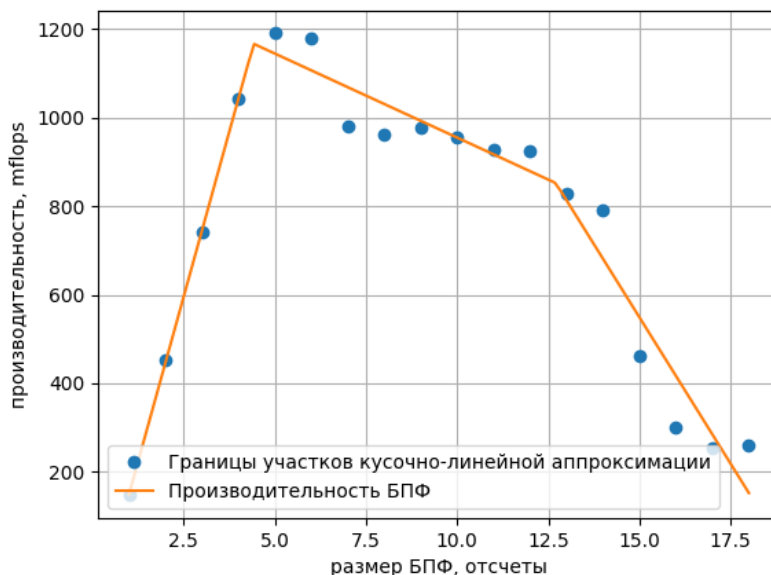


Рис. 3. Ошибка определения границ участков алгоритмов кусочно-линейной аппроксимации

Очевидно, что в данном случае кусочно-линейная аппроксимация ошибочно определила, как первую, так и вторую границы участка графика.

Подобные ошибки при определении границ встречались при различных настройках алгоритма аппроксимации. В частности, увеличение количества линейных участков приводило к увеличению отклонений.

Улучшить качество аппроксимации можно с помощью перехода к кусочно-нелинейной аппроксимации. Ввиду отсутствия в свободном доступе реализаций универсальных алгоритмов для кусочно-нелинейной аппроксимации была реализована собственная функция, использующая полный перебор границ.

Результаты оценки границ графиков производительности БПФ с помощью кусочно-нелинейной аппроксимации также содержат большое количество отклонений. Например, на рис. 4 приведена кусочно-квадратичная аппроксимация графика производительности комплексного преобразования Фурье библиотекой `fftw3`.

Анализ результатов первых двух вариантов метода показывает, что алгоритмы кусочной аппроксимации в общем виде не позволяют достаточно точно оценить границы участков. Поэтому было решено разработать метод, учитывающий особенности исследуемых зависимостей.

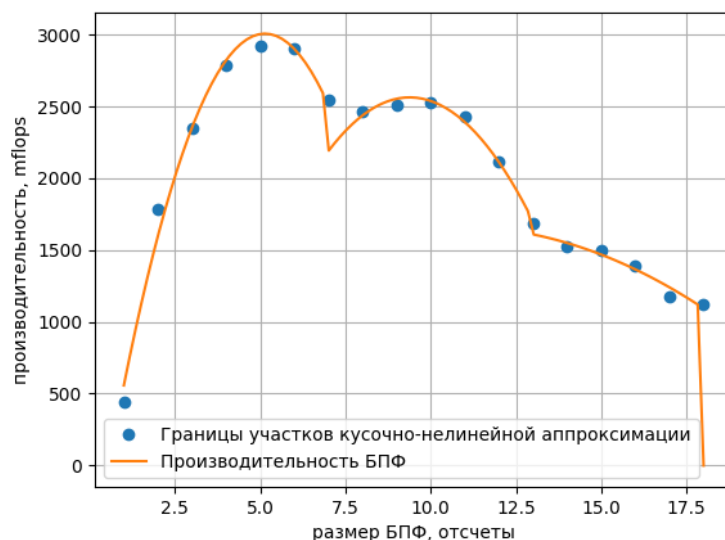


Рис. 4. Границы участков БПФ для кусочно-нелинейного алгоритма

Первой особенностью зависимости является рост графика до определенной границы, после которой начинается медленный спад. Определить такую границу можно несколькими способами (по двум, трем, четырем точкам, с использованием различных коэффициентов). По результатам проведенных расчетов наилучшие результаты показало следующее условие для границы:

$$y_i < y_{i-1} \cdot th, \quad (1)$$

где y – производительность БПФ с индексом i ;

i – граничный индекс отсчета;

th – экспериментально определяемый пороговый коэффициент.

В результате экспериментов наименьшее отклонение было при $th = 0,95$.

Второй особенностью зависимости является существенный спад производительности в конце графика. Для определения границы этого спада предлагается использовать следующую экспериментально подобранную формулу для оценки изменения производной графика:

$$(y_{i-2} - y_{i-1}) < (y_i - y_{i+1}) \cdot th. \quad (2)$$

В окончательном виде предлагаемый метод формулируется следующим образом:

- с начала последовательности отсчетов сигнала производится поиск отсчета, который удовлетворяет условию (1); индекс этого отсчета будет являться границей первого участка графика;
- поиск второй границы участка будет начинаться со следующего отсчета за найденным на первом этапе и продолжаться до тех пор, пока не будет выполняться условие (2); это будет вторая граница.

Экспериментальное исследование

Основные результаты исследований представлены в табл. 1 (первая граница) и табл. 2 (вторая граница). Исследования проводились с применением библиотек: Intel Integrated Performance Primitives (IPPS) [5], FFTW 3 [6], Spiral [7], Ooura [8] и оптимизированной библиотеки БПФ для RISC процессоров 2.0. Значения в табл. 1 и 2 соответствуют размеру БПФ.

В строках указаны различные процессоры ЭВМ, для которых производились вычисления. В столбцах указаны методы, применяемые для реализации БПФ.

Таблица 1

Первая граница

| Тип процессора | IPPS | FFTW3 | Spiral | Ooura | FFTs for RISC 2.0 |
|------------------------------------------|------|-------|--------|-------|-------------------|
| 1.266 GHz Intel Pentium 3 | 512 | 128 | 64 | 32 | 16 |
| 1.6 GHz Intel Pentium M (Banias) | 64 | 128 | 64 | 32 | 16 |
| 3.0 GHz Intel Xeon Core Duo (Woodcrest) | 1024 | 128 | 32 | 32 | 16 |
| 3.60 GHz Intel Xeon Pentium 4 (Prescott) | 1024 | 64 | 32 | 32 | 16 |

Таблица 2

Вторая граница

| Тип процессора | IPPS | FFTW3 | Spiral | Ooura | FFTs for RISC 2.0 |
|------------------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------------------|
| 1.266 GHz Intel Pentium 3 | 8192 | 1024 | 512 | 256 | 128 |
| 1.6 GHz Intel Pentium M (Banias) | 512 | 1024 | 512 | 256 | 128 |
| 3.0 GHz Intel Xeon Core Duo (Woodcrest) | 16384 | 1024 | 512 | 256 | 256 |
| 3.60 GHz Intel Xeon Pentium 4 (Prescott) | 8192 | 512 | 1024 | 256 | 128 |

В экспериментах использовались наиболее быстродействующие реализации БПФ, они приведены в порядке убывания быстродействия.

Результаты и выводы

Стабильность представленных результатов позволяет с высокой степенью достоверности утверждать, что предлагаемый метод определяет границы участков на графике зависимости производительности БПФ от его размера, на которых происходит значительное изменение скорости обработки сигнала.

Вторая граница находится на уровне, порядок которого соответствует размеру кэша данных первого уровня, равного 32 кбайт для всех рассматриваемых процессоров. Это вполне согласуется с тем фактом, что после второй границы начинается быстрое падение производительности БПФ, и дополнительно подтверждает правильность предлагаемого метода.

По поводу первой границы можно высказать предположение, что из-за небольшого объема данных на первом участке графика происходит неполная загрузка вычислительных элементов процессора.

Положение первой и второй границ коррелирует с общим быстродействием реализаций БПФ: чем дальше граница, тем более быстродействующей оказывается реализация. Данный факт подчеркивает важность эффективной работы с архитектурой памяти вычислительного устройства при разработке вычислительных алгоритмов, работающих с большими объемами данных.

Реализация IPPS заметно отличается от остальных, и определенные для нее границы не вполне соответствуют приведенным выше выводам. Данная реализация от фирмы Intel разработана для процессоров Intel с учетом особенностей их архитектуры. Очевидно, что разработчики этой реализации предприняли специальные меры, чтобы сгладить ограничения архитектуры памяти этих процессоров.

Алгоритмы цифровой обработки сигналов, использующие БПФ, желательно разрабатывать таким образом, чтобы размер БПФ не превышал границу, определяемую доступным объемом данных кэш-памяти первого уровня.

Список литературы

1 Система скрытой передачи информации на базе квазиортогональных сигналов / Е. А. Альтман, А. Г. Малютин, Ю. В. Романов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 11. – С. 26–31. – ISSN 2070–0784.

2 **Steven, G. J.** A modified split–radix FFT with fewer arithmetic operations / G. J. Steven, M. Frigo // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2007. – No. 55(1). – P. 111–119.

3 FFT Benchmark Methodology // FFTW : [website]. – URL: <https://fftw.org/speed/method.html> (date of access: 12/23/2022).

4 FFT Benchmark Results // FFTW : [website]. – URL: <https://fftw.org/speed/> (date of access: 12/23/2022).

5 Intel Integrated Performance Primitives Reference Manual // NACAD. – URL: http://www.nacad.ufjr.br/online/intel/Documentation/en_US/ipp/ippman.pdf (date of access: 12/23/2022).

6 **Frigo, M.** FFTW / M. Frigo // FFTW – URL: <https://www.fftw.org/fftw3.pdf> (date of access: 12/23/2022).

7 SPIRAL User Manual. // SPIRAL Team : [website]. – URL: <https://spiral-software.github.io/spiral-software/> (date of access: 12/23/2022).

8 General Purpose FFT (Fast Fourier/Cosine/Sine Transform) Package // Research Institute for Mathematical Sciences (RIMS) : [website]. – URL: <https://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~ooura/fft.html> (date of access: 12/23/2022).

References

1 System of hidden information transmission on the basis of quasi-orthogonal signals / E. A. Altman, A. G. Malyutin, Y. V. Romanov [et al.] // Advances of modern radioelectronics. – 2012. – No. 11. – P. 26–31. – ISSN 2070–0784.

2 **Steven, G. J.** A modified split–radix FFT with fewer arithmetic operations / G. J. Steven, M. Frigo // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2007. – No. 55(1). – P. 111–119.

3 FFT Benchmark Methodology // FFTW : [website]. – URL: <https://fftw.org/speed/method.html> (date of access: 12/23/2022).

4 FFT Benchmark Results // FFTW : [website]. – URL: <https://fftw.org/speed/> (date of access: 12/23/2022).

5 Intel Integrated Performance Primitives Reference Manual // NACAD. – URL: http://www.nacad.ufjr.br/online/intel/Documentation/en_US/ipp/ippman.pdf (date of access: 12/23/2022).

6 **Frigo, M.** FFTW / M. Frigo // FFTW. – URL: <https://www.fftw.org/fftw3.pdf> (date of access: 12/23/2022).

7 SPIRAL User Manual // SPIRAL Team : [website]. – URL: <https://spiral-software.github.io/spiral-software/> (date of access: 12/23/2022).

8 General Purpose FFT (Fast Fourier/Cosine/Sine Transform) Package // Research Institute for Mathematical Sciences (RIMS) : [website]. – URL: <https://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~ooura/fft.html> (date of access: 12/23/2022).

E. A. Altman, A. V. Aleksandrov

ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF THE FAST FOURIER TRANSFORM PERFORMANCE ON THE AMOUNT OF PROCESSED DATA

Abstract. This paper gives brief analysis the algorithms performance dependence for computing the fast Fourier transform on the volume of processed data. All existing algorithms in work do not take into account hardware capabilities of computing devices in full. As a result of non-optimal use of processor memory for different data volumes, the number of operations can greatly increase. Visual analysis of graphs dependence FFT performance on its size allows us to suggest a piecewise continuous nature of this dependence and the reasons for various noncontinuous sections of the graph. When developing implementations of algorithms that use FFT, it is necessary to obtain a method for numerical evaluation of the boundaries of the graph sections. The method under development allows to determine with a high degree of reliability the boundaries of sections on the FFT performance dependence graph, on which the derivative of the graph changes. Algorithms of digital signal processing that uses FFT, it is desirable to

develop in such a way that the FFT size does not exceed the boundary determined by the data cache size of the first level of memory cache.

Keywords: fast Fourier transform, piecewise linear approximation, computational efficiency, performance, speed, hardware architecture, area boundaries.

For citation: Altman, E. A. Analysis of the dependence of the fast Fourier transform performance on the amount of processed data / E. A. Altman, A. V. Aleksandrov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 136–143. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_1_136.

Сведения об авторах

Альтман Евгений Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Автоматика и системы управления»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: AltmanEA@gmail.com

Александров Александр Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Автоматика и системы управления»,
аспирант, старший преподаватель,
e-mail: Alexandrov_A_V@mail.ru

Information about the authors

Altman Eugeniĭ Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Automation and Control Systems»,
Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor,
e-mail: AltmanEA@gmail.com

Aleksandrov Aleksander Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Automation and Control Systems»,
Postgraduate Student, Senior Lecturer,
e-mail: Alexandrov_A_V@mail.ru

А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко, А. С. Пеньков, В. О. Зехцер, Х. Ш. Кульбикаян

СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА БАЗЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО ИДЕНТИФИКАТОРА *

Аннотация. Традиционные алгоритмы обработки измерительной информации не всегда обеспечивают необходимую точность оценки в условиях внешних воздействий и требуют больших вычислительных мощностей, которые сложно реализовать в условиях ограничений на массогабаритные характеристики транспортных БПЛА. Применение алгоритмов динамической оценки угловой ориентации БПЛА на основе адаптивной модели в совокупности с использованием многослойных нейронных сетей прямого распространения позволяет снизить ошибку оценки параметров динамической системы без существенного увеличения вычислительных затрат. В статье приводится синтез системы оценки ориентации БПЛА с многопараметрическим нейросетевым идентификатором, позволяющий повысить точность оценки в сравнении с классическим фильтром Калмана.

Ключевые слова: адаптация, динамические системы, фильтр Калмана, интеллектуализация, транспортные системы, нейросеть, беспилотные летательные аппараты.

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

Введение

Современные транспортные системы характеризуются всё большей насыщенностью своей инфраструктуры различными объектами и инженерными сооружениями, которые могут находиться в разнообразных гидро- и геологических условиях, в районах с высокой контрастностью климатических особенностей, повышенной сейсмической активностью [1]. В связи с этим наблюдается значительный рост интереса к вопросу применения беспилотных летательных аппаратов для осуществления дистанционного мониторинга объектов и территорий. Использование БПЛА позволяет проводить разведку, анализ местности и наблюдение в труднодоступных, отдаленных районах, в условиях действия опасных и вредных воздействий. Возможность получения оперативной фото- и видеоинформации в хорошем качестве значительно упрощает координирование работы наземного комплекса, а также повышает эффективность оперативных служб при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Все это делает БПЛА одним из наиболее предпочтительных средств сбора оперативной информации.

Однако применение БПЛА в вышеперечисленных задачах накладывает высокие требования на их технические характеристики. Одним из таких требований является высокая точность функционирования системы ориентации [2], которая является одним из основных элементов авионики любого БПЛА. В работе [3] показано, что адаптивная модель движения с интеллектуальной нейросетевой идентификацией [4] параметра адаптации в составе фильтра оценки ориентации беспилотных транспортных средств позволяет повысить точность оценки в сравнении с классическим фильтром Калмана.

Как показали исследования [5, 6], алгоритмы управления имеют различные режимы, что связано, например, с необходимостью парирования внешних импульсных воздействий высокой интенсивности. Оценка такого рода воздействий предполагает изменение нескольких параметров

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812/>.

фильтра [7]. Модель движения, представленная в [8, 9], предполагает адаптацию за счет параметра, характеризующего динамику объекта, что не позволяет в достаточной мере описать движение объекта в условиях высокой турбулентности и ветреной обстановке. Необходимо отметить, что качество функционирования фильтра определяется еще и интенсивностью внешних воздействий в модели динамики [7]. Это определяет необходимость многопараметрической адаптации алгоритма оценки за счет изменения величины диссипативной составляющей и интенсивности внешнего воздействия.

Целью работы является синтез интеллектуального алгоритма оценки параметров подвижных объектов транспортной инфраструктуры с адаптацией модели на базе многопараметрического нейросетевого идентификатора.

Алгоритм оценки параметров состояния на базе адаптивной модели движения

В основу алгоритма оценки может быть положена адаптивная модель движения, предложенная авторами в [8, 9]:

$$\ddot{q}(t) = -\sqrt{\lambda}\dot{q}(t) + \lambda w(t), \quad (1)$$

где $q(t)$ – угловое положение объекта,
 $w(t)$ – БГШ с известными локальными характеристиками
 $M[w(t)] = 0, \quad M[w^2(t)] = \psi\delta(t - \tau),$
 λ – параметр диссипативной составляющей,
 ψ – интенсивность шума состояния.

Использование процедуры расширения пространства состояний и конечно-разностной аппроксимации выражения (1) позволяет записать векторно-матричное выражение для модели движения в форме Коши:

$$\mathbf{x}(i) = \Phi\mathbf{x}(i-1) + \Gamma w(i), \quad (2)$$

где $\mathbf{x} = [q, \dot{q}]^T = [x_1, x_2]^T$ – расширенный вектор состояния,
 T – знак транспонирования,
 $\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 - \sqrt{\lambda}\Delta t \end{bmatrix}$ – переходная матрица состояния,
 Δt – период дискретизации,
 $\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{\lambda^2 \Delta t^2}{2} \\ \lambda \Delta t \end{bmatrix}$ – вектор интенсивности шума состояния,

Вектор наблюдения имеет вид:

$$\mathbf{z}(i) = \mathbf{H}\mathbf{x}(i) + \mathbf{v}(i), \quad (3)$$

где $\mathbf{z} = [z_1, z_2]^T$,
 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – переходная матрица наблюдения,
 $\mathbf{v}(i) = [v_1(i), v_2(i)]^T$ – вектор интенсивности шумов наблюдения с локальными характеристиками

$M[\mathbf{v}^T(i)\mathbf{v}(j)] = \mathbf{R}$. В соответствии с [10] для непрерывного случая матрица R определяется как $M[\mathbf{v}^T(t)\mathbf{v}(\tau)] = R\delta(\tau - t)$, а ее элементы имеют размерность спектральной плотности. Полагая, что каналы наблюдения не коррелированы между собой, определим связь между соответствующими матрицами дискретной и непрерывной систем $\mathbf{R} = R\Delta t^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{v_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{v_2}^2 \end{bmatrix}$

. Важно подчеркнуть, что матрица \mathbf{R} имеет размерность дисперсии в отличие от матрицы интенсивности R для непрерывного времени.

Выражения (2) и (3) позволяют синтезировать адаптивный фильтр калмановского типа [10], алгоритм которого имеет вид:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}(i|i-1) &= \Phi \hat{\mathbf{x}}(i-1), \\ \hat{\mathbf{x}}(i) &= \hat{\mathbf{x}}(i|i-1) + \mathbf{P}_i \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \{ \mathbf{z}(i) - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}(i|i-1) \}, \\ \mathbf{P}(i|i-1) &= \Gamma \mathbf{Q} \Gamma^T + \Phi \mathbf{P}(i-1) \Phi^T,\end{aligned}\tag{4}$$

$$\mathbf{P}(i) = \mathbf{P}(i|i-1) - \mathbf{P}(i|i-1) \mathbf{H}^T \left[\mathbf{H} \mathbf{P}(i|i-1) \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \right]^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}(i|i-1),$$

где $\mathbf{P}(i|i-1)$ – априорная плотность распределения вероятности ошибки экстраполяции,

$\mathbf{P}(i)$ – апостериорная плотность распределения вероятности ошибки фильтрации,

\mathbf{Q} – ковариационная матрица шума состояния.

В классическом варианте построения фильтра Калмана матрица \mathbf{Q} определяется следующим образом [11]:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{\Psi}{\Delta t} & 0 \\ 0 & \frac{\Psi}{\Delta t} \end{bmatrix}.\tag{5}$$

Так как входной шум $w(i)$ в модели движения (2) является скалярной величиной, то его ковариационная матрица вырождается в скаляр $Q = \Psi / \Delta t$.

Определение величины интенсивности Ψ на практике представляет значительные сложности ввиду априорной неопределенности внешних воздействий [12].

Синтез нейросетевого идентификатора

При решении задач идентификации с помощью нейронных сетей приоритетными являются такие практические вопросы, как: получение репрезентативной выборки экспериментальных данных, выбор структуры нейронной сети, поиск минимума функции многих переменных при обучении нейронных сетей, проверка адекватности полученной модели нейросети, структурная оптимизация нейросетевых моделей [12]. Существует комплексный формализованный подход к реализации многоэтапной процедуры идентификации динамических объектов с использованием нейронных сетей, где в качестве основной задачи рассматривается построение логически законченной процедуры, позволяющей получить эффективные нейросетевые модели нелинейных динамических объектов [13].

Произведём сбор необходимого количества данных во всём рабочем диапазоне системы. Качество идентификации будет зависеть от полноты и достоверности данных. Также произведём рациональный выбор частоты дискретизации, синтез входного (тестового) сигнала, фильтрацию, удаление из экспериментальных данных нежелательных эффектов. Исходными данными являются усредненные на множестве реализаций с частотой дискретизации $\Delta t = 0,02$ с. переходные характеристики отклика БПЛА на возмущающее воздействие в виде прямоугольных импульсов u амплитудой $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ и 30° по оси крена, длительностью 10 с. С использованием алгоритма (4) проведен анализ результатов обработки множества реализаций исходного процесса, каждому значению амплитуды входного воздействия ставятся в соответствие значения параметров λ и ψ , обеспечивающие минимальное значение ошибки фильтрации. В результате получены зависимости $\lambda(u)$ и $\psi(u)$, которые представлены на рис. 1.

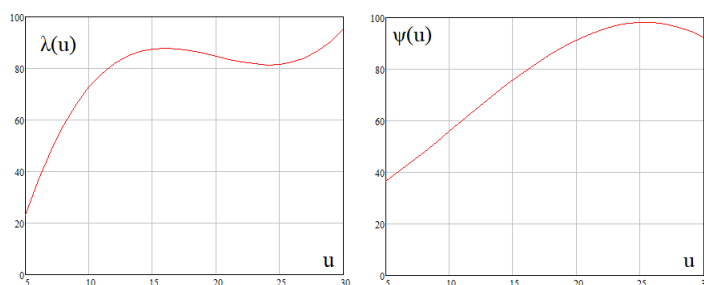


Рис. 1. Зависимость коэффициентов адаптации от амплитуды управляющего воздействия

Среди множества модельных структур, подходящих для описания исследуемой системы, выберем простую структуру прямого распространения, т.к. при простоте её реализации и высокой вычислительной скорости её будет достаточно для отражения динамики исследуемой системы. Структура нейронной сети строится следующим образом: первые 2 слоя имеют по 4 нейрона с линейной функцией активации, третий слой – 2 нейрона с линейной функцией активации, на вход подаётся N значений переходного процесса, на выходе 2 параметра адаптации λ и ψ . Схема эксперимента представлена на рис. 2.

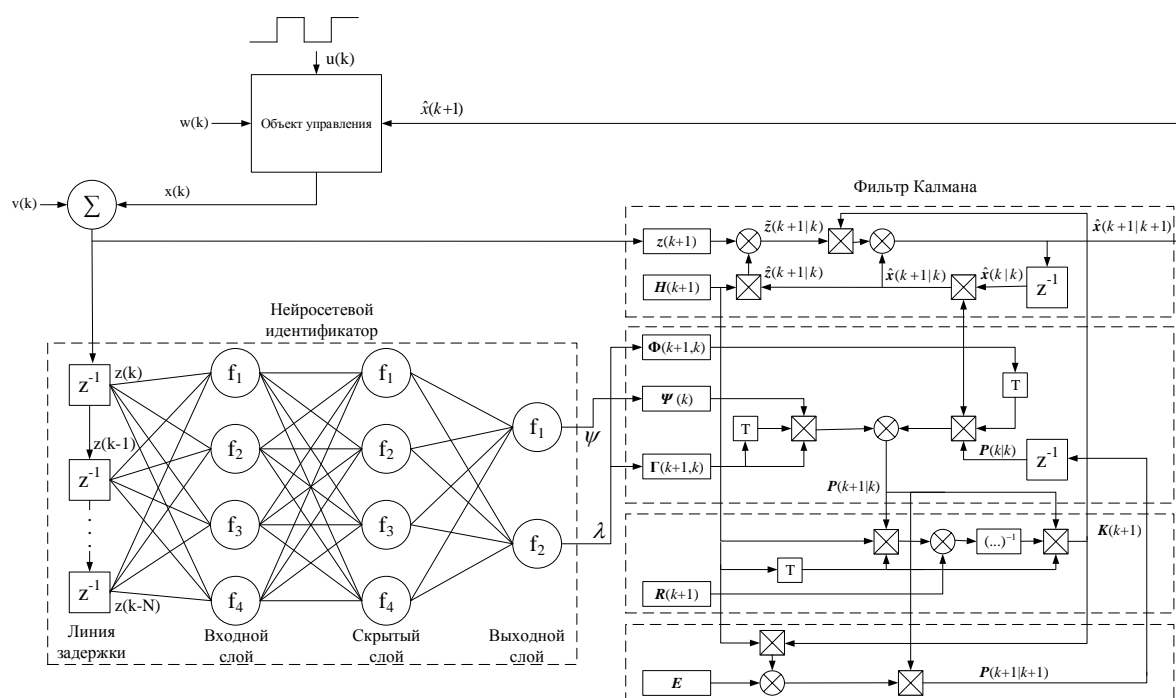


Рис. 2. Структурная схема фильтра с нейросетевым идентификатором

Далее, после выбора конкретной структуры нейросети, производится выбор параметров нейросетевой модели, наилучшим образом удовлетворяющей критерию среднеквадратичной ошибки. Обучение нейронной сети происходит с использованием алгоритма обратного распространения ошибки по заданным входным и выходным данным (обучение с учителем). Для обучения сети используются наборы значений: по M реализаций процесса угловой ориентации БПЛА из N значений для каждого из задающих воздействий.

Для проверки адекватности полученной нейросетевой модели реальной системе требуется провести анализ эффективности разработанного алгоритма.

Анализ эффективности предложенного алгоритма оценки параметров подвижных объектов транспортной инфраструктуры

Рассмотрим пример функционирования предложенного алгоритма в задачах оценки ориентации БПЛА по оси крена.

Первым этапом является обучение нейросетевой модели на множестве выборок, характеризующих поведение объекта в различных режимах движения: нейросеть обучается при $M = 100, N = 500$ и СКО шума обучающих данных $\sigma_{in} = 5^\circ$.

Вторым этапом является анализ эффективности функционирования алгоритма оценки с адаптацией параметров на базе обученного нейросетевого идентификатора. На этом этапе исходными являются данные эксперимента по изменению угла крена макета БПЛА, закрепленного в стенде для отладки алгоритмов оценки управления по оси крена. Поток данных принимается в формате:

$$[A_x, A_y, A_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z],$$

где A_x, A_y, A_z – показания акселерометра,

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – показания гироскопа.

На основании полученных данных производится расчет угла крена $\theta = f(A_x, A_y, A_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$, после чего обученная нейросеть формирует значения параметров λ и ψ , обеспечивающих минимальное значение ошибки оценки угла крена. Усредненные на 1000 реализациях ошибки оценки ориентации макета БПЛА по углу крена сведены в таблицу.

Ошибки оценки угла крена БПЛА

| Заданный угол крена | Фильтр Калмана | Ошибка фильтра с адаптацией по λ и ψ | Повышение точности |
|---------------------|----------------|---------------------------------------------------|--------------------|
| 5° | 0.95° | 0.9° | 5.3 % |
| 10° | 2.07° | 1.92° | 7.2 % |
| 15° | 2.34° | 2.13° | 9.0 % |
| 20° | 4.03° | 3.57° | 11.4 % |
| 25° | 5.38° | 4.66° | 13.4 % |
| 30° | 5.96° | 5.02° | 15.8 % |

Выводы

Функционирование современных систем управления подвижными объектами транспортной инфраструктуры подразумевает наличие достоверных данных о состоянии объекта, получаемых с помощью алгоритмов оценки.

В режимах полета БПЛА, характеризующихся внешними импульсными воздействиями высокой интенсивности, их учет возможен за счет многопараметрической адаптации параметров, связанных с диссипативной составляющей и интенсивностью предполагаемого воздействия.

Синтезирован интеллектуальный алгоритм оценки параметров подвижных объектов транспортной инфраструктуры с адаптацией параметров модели. Адаптация синтезированной модели может быть произведена с применением нейросетевого идентификатора. Обученная на множестве доступных выборок нейросеть обеспечивает некоторое приближение параметров фильтра к их оптимальным значениям.

Анализ эффективности предложенного алгоритма подтвержден полунатурным моделированием оценки ориентации макета БПЛА по углу крена. В приведенном примере использование интеллектуального алгоритма оценки с адаптацией параметров модели на базе нейросетевого идентификатора обеспечивает повышение точности оценки на 5–15 % в сравнении с классическим фильтром Калмана.

Список литературы

1 Григоренко, Н. И. Диагностика состояния автодороги с помощью беспилотного

References

1 Grigorenko, N. I. Diagnostics of the road condition using an unmanned aerial vehicle /

летательного аппарата / Н. И. Григоренко, Е. Е. Янчук // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15, № 3(70). – С. 86–92. – EDN ZTPSBB.

2 **Павлов, В. М.** Измерение углового положения транспортного средства / В. М. Павлов // Транспорт : наука, образование, производство. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – Т. 1. – С. 209–212. – EDN JLM BMP.

3 **Костоглотов, А. А.** Синтез адаптивных алгоритмов оценки ориентации беспилотных транспортных средств с использованием интеллектуального нейросетевого идентификатора / А. А. Костоглотов, А. С. Пеньков, В. О. Зехцер // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 186–194. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_186.

4 Аналитический обзор современных интеллектуальных информационных технологий в технике и на производстве / С. М. Ковалев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (73). – С. 60–75. – EDN ZBKLIL.

5 **Чулин, Н. А.** Система управления беспилотным летательным аппаратом / Н. А. Чулин, И. В. Миронова // Инженерный журнал : наука и инновации. – 2018. – № 9. – С. 1–11. – EDN VAGNVQ.

6 **Гуцевич, Д. Е.** Моделирование поведения летательного аппарата самолетного типа с автоматическим управлением в различных режимах полета / Д. Е. Гуцевич // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – № 1. – С. 12–23. – EDN XZCQWT.

7 **Коновалов, А. А.** Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Часть 2 / А. А. Коновалов. – Санкт-Петербург : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 180 с. – ISBN 978-5-7629-1544-1.

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

9 **Костоглотов, А. А.** Метод синтеза адаптивных алгоритмов оценки параметров динамических систем на основе принципа декомпозиции и методологии объединенного принципа максимума / А. А. Костоглотов, А. С. Пеньков,

N. I. Grigorenko, E. E. Yanchuk // World of Transport. – 2017. – Vol. 15, No. 3 (70). – P. 86–92. – EDN ZTPSBB.

2 **Pavlov, V. M.** Measuring the angular position of a vehicle / V. M. Pavlov // Transport : science, education, production. – Rostov-on-Don : RSTU, 2022. – Vol. 1. – P. 209–212. – EDN JLM BMP.

3 **Kostoglotov, A. A.** Synthesis of adaptive algorithms for assessing the orientation of unmanned vehicles using an intelligent neural network identifier / A. A. Kostoglotov, A. S. Penkov, V. O. Zekhtser // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya – 2022. – No. 1 (85). – P. 186–194. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_186.

4 Analytical review of modern intelligent information technologies in engineering and in production / S. M. Kovalev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 1 (73). – P. 60–75. – EDN ZBKLIL.

5 **Chulin, N. A.** Unmanned aerial vehicle control system / N. A. Chulin, I. V. Mironova // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2018. – No. 9. – P. 1–11. – EDN VAGNVQ.

6 **Gutsevich, D. E.** Modeling the behavior of an aircraft-type aircraft with automatic control in various flight modes / D. E. Gutsevich // Mathematical modeling, computer and field experiment in natural sciences. – 2018. – No. 1. – P. 12–23. – EDN XZCQWT.

7 **Konovalev, A. A.** Fundamentals of trajectory processing of radar information. Part 2 / A. A. Konovalev. – St. Petersburg : SPbSETU «LETI», 2013. – 180 p. – ISBN 978-5-7629-1544-1.

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

9 **Kostoglotov, A. A.** Method of synthesis of adaptive algorithms for estimating parameters of dynamic systems based on the principle of decomposition and methodology of the combined maximum principle / A. A. Kostoglotov,

С. В. Лазаренко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия : Естественные науки. – 2020. – № 4 (208). – С. 22–28. – EDN QOAKMD.

10 **Sokolov, S.** Adaptive stochastic filtration based on the estimation of the covariance matrix of measurement noises using irregular accurate observations / S. Sokolov, M. Polyakova, A. Novikov // Inventions. – 2021. – Т. 6. – № 1. – P. 1–12. – EDN KOPLQN.

11 **Матвеев, В. В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов // ОАО «Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"». – 2009. – 280 с. – EDN QNWJZT.

12 **Ковалев, В. С.** Адаптивные сетевые модели слияния мультисенсорных данных в гибридных диагностических системах / В. С. Ковалев, С. М. Ковалев, А. В. Суханов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (77). – С. 153–162. – EDN ROSZKE.

13 **Пупков, К. А.** Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления : Цикл учебников и учебных пособий «Методы теории автоматического управления» / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, А. И. Гаврилов // Москва : Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет). – 2001. – 744 с. – EDN WEYIDX.

14 **Егорчев, М. В.** Нейросетевой полуэмпирический подход к моделированию продольного движения и идентификации аэродинамических характеристик маневренного самолета / М. В. Егорчев, Ю. В. Тюминцев // Труды МАИ. – 2017. – 31 с. – EDN YZMBEN.

A. S. Penkov, S. V. Lazarenko // News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Series : Natural Sciences. – 2020. – No. 4 (208). – P. 22–28. – EDN QOAKMD.

10 **Sokolov, S.** Adaptive stochastic filtration based on the estimation of the covariance matrix of measurement noises using irregular accurate observations / S. Sokolov, M. Polyakova, A. Novikov // Inventions. – 2021. – Vol. 6. No. 1. – P. 1–12. – EDN KOPLQN.

11 **Matveev, V. V.** Fundamentals of construction of free-form inertial navigation systems / V. V. Matveev, V. Ya. Raspopov // JSC «Concern "Central Research Institute "Electropribor"». – 2009. – 280 p. – EDN QNWJZT.

12 **Kovalev, V. S.** Adaptive network models of multisensory data fusion in hybrid diagnostic systems / V. S. Kovalev, S. M. Kovalev, A. V. Sukhanov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 1 (77). – P. 153–162. – EDN ROSZKE.

13 **Pupkov, K. A.** Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control : A cycle of textbooks and manuals "Methods of the theory of automatic control" / K. A. Pupkov, N. D. Egupov, A. I. Gavrilov // Moscow : Bauman Moscow State Technical University (National Research University). – 2001. – 744 p. – EDN WEYIDX.

14 **Egorchev, M. V.** Neural network semi-empirical approach to modeling longitudinal motion and identification of aerodynamic characteristics of a maneuverable aircraft / M. V. Egorchev, Yu. V. Tyumintsev // Proceedings of MAI. – 2017. – 31 p. – EDN YZMBEN.

A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko, A. S. Penkov, V. O. Zekhtser, K. S. Kulbikayan

SYNTHESIS OF AN INTELLIGENT ALGORITHM FOR ASSESSING THE ORIENTATION OF MOVABLE OBJECTS OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE ON THE BASIS OF A MULTIPARAMETER NEURAL NETWORK IDENTIFIER

Abstract. General measurement informational processing algorithms do not always provide the necessary accuracy of assessment under external influences and require large computing power, which is difficult to implement under conditions of restrictions on the weight and size characteristics of UAVs transport. The use of algorithms for dynamic estimation of the UAV angular orientation based on an adaptive model in combination with the use of multilayer neural networks of direct propagation makes it possible to reduce the error in estimating the parameters of a dynamic system without a significant increase in computational costs. The paper presents the synthesis of a UAV orientation estimation system

with a multiparameter neural network identifier, which makes it possible to improve the estimation accuracy in comparison with the classical Kalman filter.

Keywords: adaptation, dynamic systems, Kalman filter, intellectualization, transport systems, neural network, unmanned aerial vehicles.

For citation: Kostoglotov, A. A. Synthesis of an intelligent algorithm for assessing the orientation of movable objects of transport infrastructure on the basis of a multiparameter neural network identifier / A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko, A. S. Penkov [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 144–151. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_1_144.

Сведения об авторах

Костоглотов Андрей Александрович

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

Лазаренко Сергей Валерьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
НИЧ, кафедра «Связь на железнодорожном транспорте»,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
e-mail: rh3311@mail.ru

Пеньков Антон Сергеевич

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

Зехцер Владимир Олегович

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

Кульбикаян Хачерес Шагенович

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

Information about the authors

Kostoglotov Andrey Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Research Department, Chair «Communication on Railway Transport»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Leading Researcher,
e-mail: kostoglotov@me.com

Lazarenko Sergey Valeryevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Research Department, Chair «Communication on Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: rh3311@mail.ru

Penkov Anton Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Research Department, Chair «Communication on Railway Transport»,
Researcher,
e-mail: penkovas@rgups.ru

Zekhtser Vladimir Olegovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Research Department, Chair «Communication on Railway Transport»,
Junior Researcher,
e-mail: vova-zehcer@yandex.ru

Kulbikayan Khacheres Shagenovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Communication on Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: bagrat@rgups.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 656. 25 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_152

*В. Д. Верескун, Д. Е. Притыкин, Б. Д. Дагльдян, Е. Д. Балашов***РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ СИГНАЛИЗАЦИИ
ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

Аннотация. Рассмотрены структура и принципы организации учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога», созданного в Ростовском государственном университете путей сообщения, а также идея и реализация моделей устройств сигнализации, централизации и блокировки, использующихся на железнодорожном транспорте Российской Федерации с целью расширения функциональных возможностей комплекса. Рассмотрен принцип работы устройств сигнализации на железной дороге на примере диаграммы классов реализации, схем, а также алгоритма работы внедряемой системы с указанием допущений, применяемых при построении программных моделей. Представлен алгоритм работы программного кода проекта с пояснениями на основе изначальной структуры реализации.

Ключевые слова: учебно-лабораторный комплекс, виртуальная железная дорога, тренажер, СЦБ, АЛСН, сигнализация, светофор, путевой трансмиттер, реле.

Для цитирования: Разработка подсистемы сигнализации для виртуальной железной дороги / В. Д. Верескун, Д. Е. Притыкин, Б. Д. Дагльдян, Е. Д. Балашов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 152–158. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_152.

Введение

Система сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) на железной дороге является совокупностью технических средств, используемых для регулирования и обеспечения безопасности движения поездов. Создание адекватных цифровых моделей устройств СЦБ необходимо для развития учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога» (ВЖД) в Ростовском государственном университете путей сообщения. Разработка полноценной модели работы СЦБ является комплексной задачей. Технические требования к моделям предусматривают реализацию достоверной модели, которая точно отвечала бы требованиям инструкции по сигнализации на железнодорожном транспорте Российской Федерации (ИСИ) [1].

1 Цели и задачи разработки

Целью разработки является создание программной имитационной модели системы сигнализации с последующей её интеграцией в комплекс ВЖД (рис. 1). Имитационная модель поезда в системе ВЖД может быть представлена следующими компонентами: учебный локомотивный тренажерный комплекс (УЛТК); универсальный программный тренажер автономного рабочего места машиниста (АРМ «Машинист»); программная модель имитации движения поездов (Поезд-Бот), являющаяся автономной программой, для работы которой необходим заранее прописанный нормативный график движения поездов по маршруту.

Данная разработка на текущем этапе развития комплекса ВЖД предусматривает решение следующих задач:

- 1) объектное моделирование структуры системы сигнализации;
- 2) программная реализация устройств сигнализации: светофоры, необходимые для адекватной работы системы, реле, путевые трансмиттеры, преобразующие сигнальные показания для внутренних устройств локомотива;
- 3) создание алгоритма изменения сигнальных показаний светофоров как от входящих от пульта ДНЦ (пульт поездного диспетчера), так и от воздействия поездов на маршруте следования (воздействие происходит за счет замыкания колесными парами поездов рельсовых цепей);

4) имитация работы путевых трансмиттеров, преобразующих ток рельсовой цепи в кодовые (импульсные) показания для локомотивного светофора, в последующем передающиеся клиенту, являющемуся участником железнодорожного движения;

5) имитация работы сигнальных реле, управляющих сигнальными показаниями светофоров, на участках железнодорожного маршрута, представленного в комплексе ВЖД.

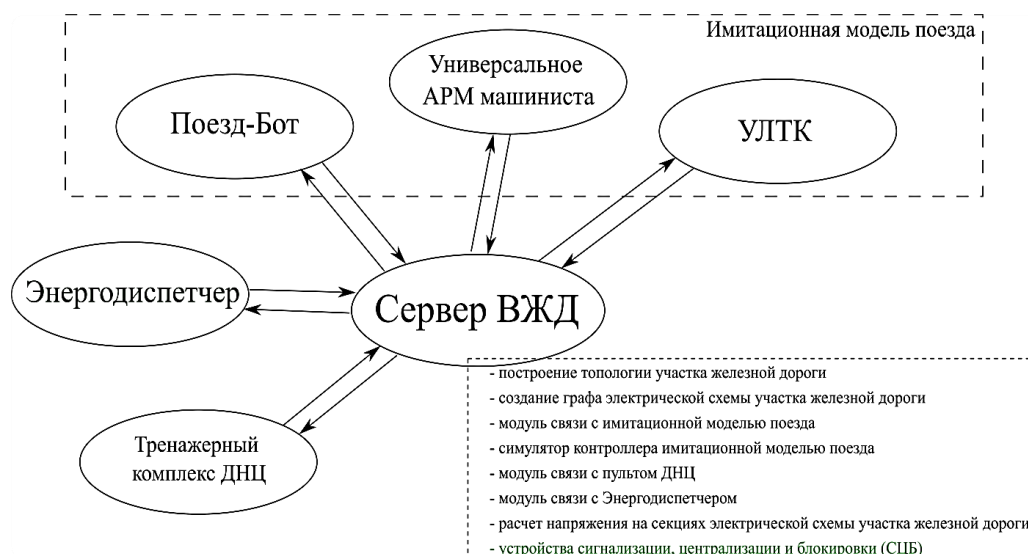


Рис. 1. Структура учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога» с внедренным модулем СЦБ

2 Архитектура классов системы сигнализации

На рис. 2 представлена UML диаграмма, демонстрирующая иерархию классов разрабатываемой системы [2, 10].

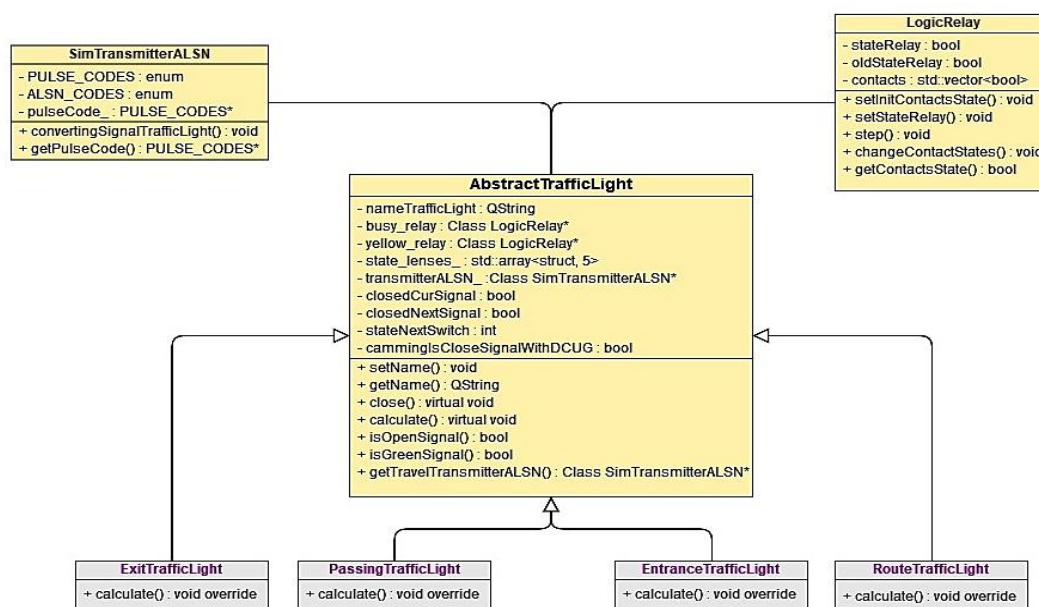


Рис. 2. Диаграмма классов системы сигнализации

Класс «AbstractTrafficLight» является абстрактным классом светофора, содержащим в себе общие атрибуты и реализующим методы, необходимые для работы дочерних классов конкретных светофоров, таких как «Exit», «Passing», «Entrance» и «Route» (выходной, проходной, входной и маршрутный соответственно). Такой подход отражает на практике один из принципов объектно-ориентированного программирования – полиморфизм, объединяя схожую реализацию потомков различной формы.

Работу реле, управляющего сигнальными показаниями светофоров, обеспечивает класс «LogicRelay». В нем реализовано обновление состояний контактов в зависимости от занятости отрезка пути поездом. На схеме (рис. 3) представлена рельсовая цепь с устройством путевого реле (K1). При занятом блок-участке последняя колесная пара состава находится между трансформатором и реле и, обладая значительно меньшим сопротивлением, шунтирует обмотку путевого реле светофора. Таким образом, контакты реле замыкаются в приводе автостопа, принимая заграждающее положение, соответствующие красному сигналу светофора [4–6].

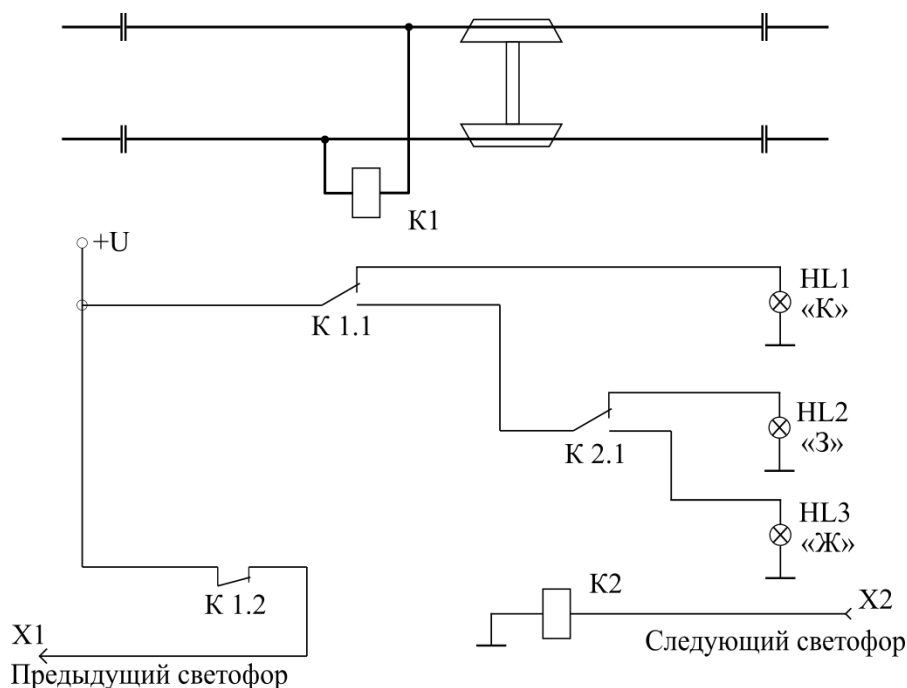


Рис. 3. Схема рельсовых цепей

В свою очередь, сигнальные показания путевых светофоров преобразуются в комбинацию числового импульсного кода за счет устройства кодового путевого трансмиттера (КПТ). Полученная комбинация с определенной частотой посылается в рельсовую цепь в виде электрических сигналов, принимаемых устройствами автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН). Данное устройство в рамках проекта реализовано в классе «SimTransmitterALSN», который имитирует работу преобразования сигнальных показаний в импульсную кодировку.

Работа самих светофоров предусматривается в виде создания экземпляра класса определенного светофора для каждой траектории маршрута, где он имеется, который реализует метод вычисления сигнальных показаний за счет состояний контактов реле, а также передачу этих показаний в класс «SimTransmitterALSN».

При разработке классовой архитектуры и проекта в целом были учтены следующие допущения, на которые необходимо обратить внимание:

- имитация работы путевого трансмиттера является лишь преобразованием данных о состоянии светофора для последующей передачи серверу, поскольку в рамках проекта на текущем этапе не рассматривается вопрос о моделировании электромеханических процессов в рельсовых цепях;

- подготовка кода, получаемого устройствами локомотивной сигнализации, осуществляется на стороне сервера ВЖД. Уже готовый код АЛСН отправляется подключенному клиенту симулятора поезда, после чего отображается сигнал светофора. Такой подход не отражает настоящую работу путевых и локомотивных устройств АЛСН. Вышеописанные допущения предусматривают создание довольно грубой модели сигнализации, однако являются не критичными и позволяют в достаточной мере продемонстрировать работу системы. В ходе дальнейшего развития учебно-лабораторного комплекса ВЖД данные особенности будут учтены.

3 Алгоритм работы системы сигнализации

На представленной ниже диаграмме (рис. 4) изображен алгоритм работы устройств сигнализации. Каждый подключившийся клиент, имитирующий модель поезда, отправляет свои данные на сервер ВЖД, где создается соответствующий ему симулятор контроллера, который реализован классом «SimController». Функционал класса отвечает за обработку данных поезда, взаимодействие с топологией, а также работу сигнализации.

Симулятор контроллера определяет параметр состояния занятости траекторий (блок-участков) топологии маршрута, которые занимает или освобождает состав. Прохождение по топологии для установки занятости траекторий обрабатывает класс «TopologyPassing». В него также входят методы поиска траекторий со светофорами, состояние которых нужно изменить.

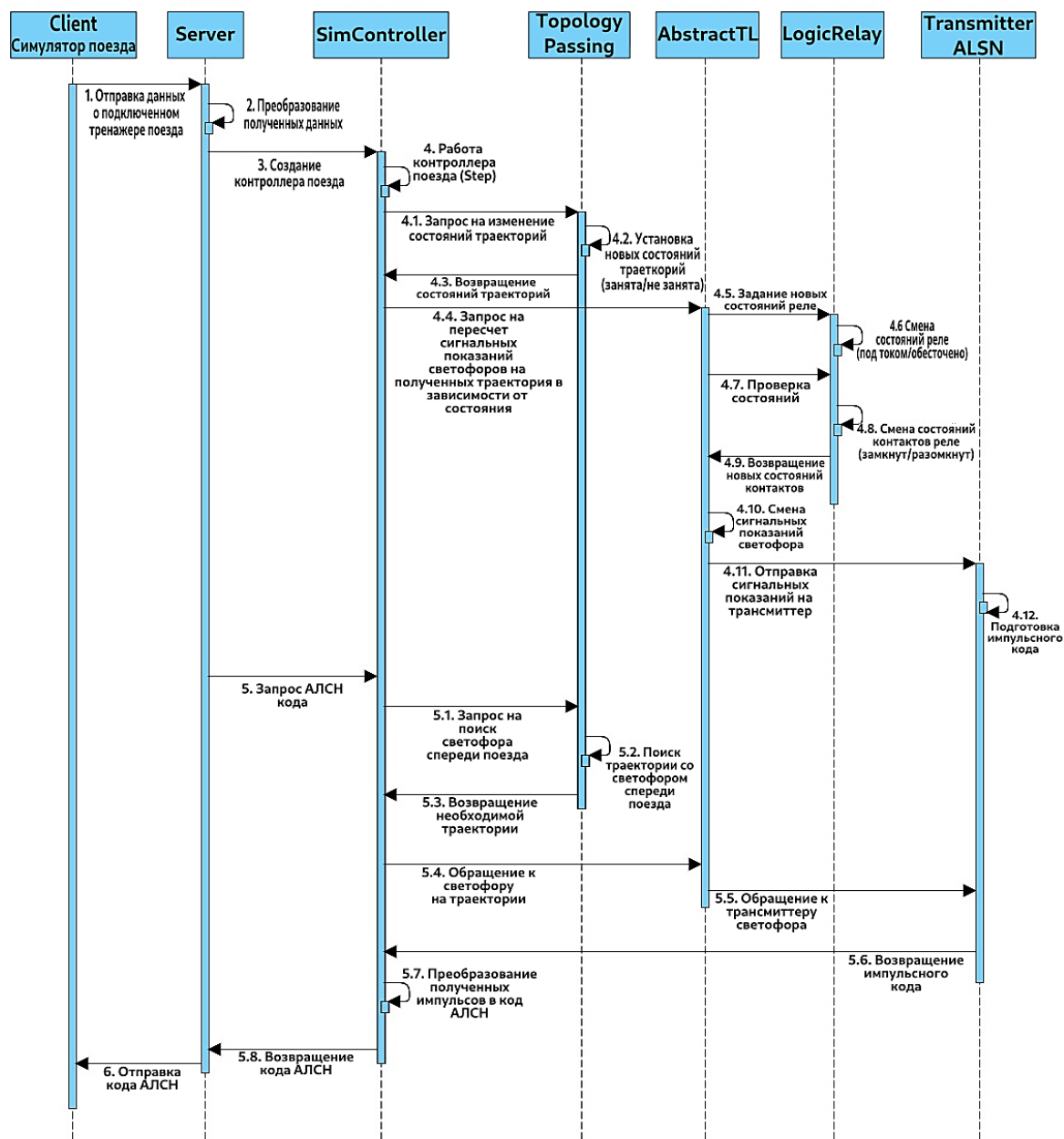


Рис. 4. Диаграмма последовательности, демонстрирующая алгоритм работы сигнализации

Как упоминалось выше, для каждой траектории используется определённый тип светофора в зависимости от того, чему он принадлежит – станции или перегону. Таким образом, пересчет сигнальных показаний реализован в каждом классе конкретного светофора. В ходе исполнения метода изменения сигнальных показаний сначала происходит смена состояния путевого реле светофора с последу-

ющей заменой состояний контактов этого реле, реализованные в классе «LogicRelay», затем в зависимости от полученных результатов заполняется массив цветowych линз светофора, следом отправляющийся классу «SimTransmitterALSN» для преобразования.

Изменения на стороне сервера ВЖД передаются соответствующим клиентам. Данные о занятости блок-участка и сигнал светофора передаются на пульт поездного диспетчера, где эти изменения графически отображаются. Показания АЛСН отображаются на дисплеях натуральных ВЛТК (рис. 5).



Рис. 5. Дисплейный модуль КЛУБ УЛТК «Сапсан» с сигнализацией АЛСН

Представленный алгоритм работает как для оператора тренажера, так и для подсистемы «Поезд-Бот», подключенных одновременно.

Заключение

После завершения текущей реализации проекта системы сигнализации были выполнены следующие разработки:

- построена модель устройств сигнализации: светофоры, реле, трансмиттеры;
- разработан алгоритм работы системы сигнализации в рамках учебно-лабораторного комплекса ВЖД.

Данный этап реализации проекта является лишь начальной стадией интеграции одной из части комплекса устройств СЦБ. В дальнейшем планируется как улучшение уже внесённых изменений, так и добавление нововведений.

Разработанная система интегрирована в систему ВЖД.

Список литературы

- 1 **Фадеев, Г. М.** Инструкция по сигнализации на железных дорогах Российской Федерации / Г. М. Фадеев. – Москва : Транспорт, 1994. – 128 с. – ISBN 5-277-01765-8.
- 2 **Фаулер, М.** UML основы. Краткое руководство по стандартному языку объектного моделирования / М. Фаулер. – Санкт-Петербург : СИМВО 2005. – 184 с. – ISBN 5-93286-060-X.
- 3 **Ковалев, С. М.** Обеспечение взаимодействия тренажеров подвижного состава с системами управления движением железнодорожного транспорта / С. М. Ковалев, Б. Д. Дагдидян //

References

- 1 **Fadeev, G. M.** Instructions for alarm on the railways of the Russian Federation / G. M. Fadeev. – Moscow : Transport, 1994. – 128 p. – ISBN 5-277-01765-8.
- 2 **Fowler, M.** Uml Fundamentals. A brief guide to the standard language modeling language / M. Fowler. – Saint-Petersburg : Symbol, 2005. – 184 p. – ISBN 5-93286-060-X.
- 3 **Kovalev, S. M.** Ensuring the interaction of rolling stock simulators with railway traffic control systems / S. M. Kovalev, B. D. Dagldiyan // The modern development of science and technology : a

Современное развитие науки и техники : сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–03 декабря 2020 года. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2020. – С. 142–146. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_90.

4 Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте : учебно-методическое пособие / Н. А. Репешко, Н. А. Мелющенко, Н. Р. Осипова [и др.]. – Ростов-на-Дону : РГУПС. – 2017. – 48 с.

5 **Кравченко, Е. И.** Кодирование рельсовых цепей : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / Е. И. Кравченко, Д. В. Швалов. – Москва : Маршрут, 2006. – 134 с. – ISBN 5-89035-242-3.

6 **Швалов, Д. В.** Приборы автоматики и рельсовые цепи : учебное пособие для профессиональной подготовки работников железнодорожного транспорта / Д. В. Швалов. – Москва : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 190 с. – ISBN 978-5-89035-492-1.

7 Разработка топологической модели системы энергоснабжения участка железной дороги для тренажера энергодиспетчера / В. Д. Верескун, Д. Е. Притыкин, Б. Д. Дагддян [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – № 3 (83). – 2021. – С. 90–97. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_90.

8 Инструменты кроссплатформенной разработки программного обеспечения : официальный сайт. – URL: <https://www.qt.io/> (дата обращения : 17.01.2023).

9 Применение фреймворка QT к разработке программного обеспечения тренажёров подвижного состава / А. Н. Гуда, Д. Е. Притыкин, С. В. Ковшиков [и др.] // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : сборник научных трудов конференции «Транспромэк-2018». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2018. – С. 40–43. – ISBN 978-5-88814-749-8.

10 **Забродин, А. В.** Основы проектирования информационных систем с помощью языка UML : учебное пособие / А. В. Забродин, В. П. Бубнов. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2018. – 46 с. – ISBN 978-5-7641-1133-9.

collection of scientific works of the All-Russian National Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, December 01–03, 2020. – Rostov-on-Don : RSTU, 2020. – P. 142–146. – DOI 10.46973/0201-727x_2021_3_90.

4 **Repeshko, N. A.** Automation, telemechanics and communication in railway transport : teaching and methodological manual / N. A. Repeshko, N. A. Melyushchenko, N. R. Osipova [et al.] ; FSBE in the. – Rostov-on-Don : RSTU. – 2017. – 48 p.

5 **Kravchenko, E. I.** Coding of rail chains : a textbook for universities of the railway transp. / E. I. Kravchenko, D. V. Shvalov. – Moscow : Route, 2006. – 134 p. – ISBN 5-89035-242-3.

6 **Shvalov, D. V.** Automation devices and rail circuits : a training manual for the vocational training of workers railway transport / D. V. Shvalov. – Moscow : SEE «Educational and methodological center by education at the railway transport», 2008. – 190 p. – ISBN 978-5-89035-492-1.

7 Development of a topological model of the energy supply system of the railway section for the energy – dispatcher simulator / V. D. Vereskun, D. E. Pritykin, B. D. Dagldyan [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – No. 3 (83). – 2021. – P. 90–97. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_90.

8 Tools of cross-platform development of software : official website. – URL: <https://www.qt.io/> (date of access: 01/17/2023).

9 **Guda, A. N.** The use of the QT framework to the development of software for rolling stock simulators / A. N. Guda, D. E. Pritykin, S. V. Kovshikov [et al.] : Actual problems and prospects for the development of transport, industry and economics of Russia : collection of scientific works of the «Transpromec-2018» conference. – Rostov-on-Don : RSTU, 2018. – P. 40–43. – ISBN 978-5-88814-749-8.

10 **Zubrodin, A. V.** Fundamentals of the design of information systems using the UML language : a textbook / A. V. Zabrodin, V. P. Bubnov. – Saint-Petersburg : PSUPS, 2018. – 46 p. – ISBN 978-5-7641-1133-9.

V. D. Vereskun, D. E. Pritikin, B. D. Dagldiyan, E. D. Balashov

DEVELOPMENT OF ALARM SUBSYSTEM FOR A VIRTUAL RAILWAY

Abstract. The paper considers the existing educational and laboratory complex «Virtual Railway» created on the basis of the Rostov State Transport University, as well as the idea and model implementation of alarming, centralization and locking devices used in the railway transport of the Russian Federation in order to improve the functional capabilities complex. The principle of operation of the signaling devices on the railway is considered on the example of a diagram of the implementation classes, schemes, as well as in detail the described algorithm for the operation of the implemented system, indicating the assumptions used in the construction of software models. The sequence of the work code of the project with explanations and the clear follow of the initial implementation structure is presented. The conclusions made reflect the essence and relevance of the task completed.

Keywords: educational and laboratory system, Virtual Railway, simulator, ALSN, alarm system, traffic light, track transmitter, relay.

For citation: Development of alarm subsystem for a virtual railway / V. D. Vereskun, D. E. Pritikin, B. D. Dagldiyan, E. D. Balashov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 152–158. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_1_152.

Сведения об авторах

Верескун Владимир Дмитриевич

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

Притыкин Дмитрий Евгеньевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Центр развития инновационных компетенций (ЦРИК),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент, директор,
e-mail: maisvendoo@gmail.com

Даглдиян Богос Дзарукович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Центр развития инновационных компетенций (ЦРИК),
кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте»,
аспирант, начальник отдела,
e-mail: bogos.dagldian@yandex.ru

Балашов Евгений Дмитриевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Центр развития инновационных компетенций (ЦРИК),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
аспирант, инженер,
e-mail: balashov.97@mail.ru

Information about the authors

Vereskun Vladimir Dmitrievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Rector of the University,
e-mail: vvd@rgups.ru

Pritikin Dmitry Evgenievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Development of Innovation Competencies Center,
Chair «Traction Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor, Director,
e-mail: maisvendoo@gmail.com

Dagldiyan Bogos Dzarukovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Development of Innovation Competencies Center,
Chair «Automation and Telemechanics on Railway Transport»,
Postgraduate Student, Head of Department,
e-mail: bogos.dagldian@yandex.ru

Balashov Evgeny Dmitrievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Development of innovation competencies Center,
Chair «Car and Car Facilities»,
Postgraduate Student, Engineer,
e-mail: balashov.97@mail.ru

С. М. Ковалев, А. Н. Гуда, А. И. Долгий

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ ПТИ'22

Аннотация. В обзорной статье дан краткий анализ работ, представленных на конференции ПТИ'22, рассмотрены основные направления как теоретических, так и прикладных исследований в области современного искусственного интеллекта (ИИ). Традиционно основной акцент в большинстве принятых к публикации материалов был сделан на применении современных информационных и интеллектуальных технологий в технике. Были выделены четыре основные направления, представленные на конференции ПТИ'21: прикладные интеллектуальные системы, машинное обучение, интеллектуализация производственных процессов, нечеткие и нетрадиционные логики. По каждому из направлений сделан анализ наиболее интересных докладов для популяризации результатов исследований в области прикладного искусственного интеллекта среди русскоязычной аудитории.

В рамках конференции был организован круглый стол, на котором также обсуждались проблемы использования ИИ в медицине, бизнесе и образовании. Лучшие работы также вошли в сборник трудов конференции «Proceedings of the Sixth International Scientific Conference „Intelligent Information Technologies for Industry” (ПТИ'22)».

Ключевые слова: интеллектуальные информационные технологии, искусственный интеллект, мягкие вычисления, интеллектуализация промышленности.

Для цитирования: Ковалев, С. М. Аналитический обзор трудов конференции ПТИ'22 / С. М. Ковалев, А. Н. Гуда, А. И. Долгий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 159–174. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_159.

Введение

В период с 31 октября по 6 ноября 2022 года в г. Стамбул (Турция) прошла Шестая Международная научная конференция «Интеллектуальные информационные технологии в технике и на производстве» (ПТИ'21), организованная Ростовским государственным университетом путей сообщения, Российской ассоциацией искусственного интеллекта, а также VSB-техническим университетом г. Остравы (Чешская Республика).

Целью данной конференции являлось:

- 1) обсуждение перспектив и тенденций развития современных информационных технологий, методов искусственного интеллекта (ИИ), прикладных и фундаментальных аспектов их применения в технике, на транспорте и производстве;
- 2) обмен международным опытом в решении вопросов, связанных с новейшими достижениями в области ИИ и его приложений в современной промышленности;
- 3) привлечение студентов, магистрантов, аспирантов к участию в перспективных научных исследованиях в области ИИ, расширение научного взаимодействия и информационного обмена между странами и вузами.

В конференции приняли участие около 70 специалистов, среди которых помимо инженерно-технических специалистов были научно-педагогические работники, ведущие ученые в области ИИ из России, Китая, Словакии, Турции и Чешской Республики.

На конференции было представлено 5 пленарных и 53 секционных докладов.

Пленарные доклады были представлены российскими и зарубежными учеными в области ИИ. Пленарные доклады затронули широкий круг проблем: обсуждались конкретные разработки прикладных интеллектуальных систем, рассматривались фундаментальные исследования в таких областях ИИ, как нейронные сети, нечетко-логические системы, машинное обучение и др.

В целом доклады были равномерно распределены по секциям, однако наиболее полно были представлены секции «Прикладные интеллектуальные системы» и «Машинное обучение».

1 Секция «Прикладные интеллектуальные системы» была представлена восемью докладами. В работе [1] авторы рассматривали современные методы управления логистическими процессами на транспорте. Реализация транспортно-логистических процессов происходит посредством создания различных транспортно-логистических цепочек (ТЛЦ). Каждое звено ТЛЦ в статье называется хозяйствующим агентом (ХА). Относительно ТЛЦ ставились следующие технико-технологические задачи: идентификация транспортно-логистического процесса (определение «физики» явления); прогноз его развития; управление им. Существующая логика исследования ТЛЦ состоит в следующем:

1 Осуществляется декомпозиция ТЛЦ на отдельные хозяйствующие агенты, имеющие собственные интересы, возможности, ограничения.

2 Для каждого ХА на основе статистического анализа производится построение зависимости критериев функционирования от управляющих и производственных параметров.

3 Полученная совокупность аналитических моделей позволяет определить оптимальные параметры функционирования всех ХА. Это их частные интересы, выраженные аналитически. Область экстремума критериального показателя моделируется параболой.

4 Согласование этих интересов осуществляется средствами теории активных систем, обеспечивающей учет как интересов ТЛЦ в целом, так и противоречивых интересов отдельных ХА.

ХА в докладе был представлен в виде трех составляющих (рис. 1):

– ТТС – технико-технологическая составляющая (оборудование, осуществляющее заявленные функции);

– НП – нейропроцессор, идентифицирующий текущее состояние ТТС;

– ПД – подсистема диалога с иными ХА.



Рис. 1. Базовые составляющие ХА

Диалог между ХА и ТЛЦ реализован в соответствии с принципом гомеостазиса Эшби (рис. 2).

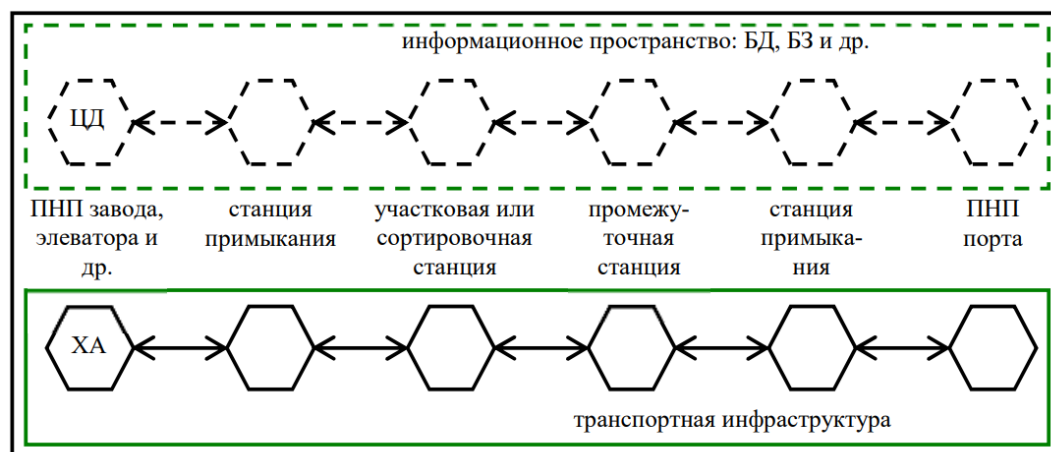


Рис. 2. Организация диалога между ХА и ТЛЦ

Результаты функционирования ХА в отдельности и всей ТЛЦ в целом заносятся в базу данных для формирования статистических отчетов и базы знаний с целью последующего совершенствования деятельности ТЛЦ, тиражирования передового опыта и т.д.

В работе [2] авторы рассматривают построение новой архитектуры распределенной системы интеллектуального анализа данных с использованием поиска решений на основе накопленного опыта

(прецедентов). Распределенную интеллектуальную систему (РИС) предлагается конструировать по принципу мультиагентных систем, состоящих из автономных узлов-агентов. Архитектура системы состоит из блоков, представляющих собой совокупность микросервисов, как показано на рис. 3:

- блок пользовательского интерфейса (User Interface Block), состоящий из компонентов взаимодействия с пользователями системы;
- блок анализа данных, который включает в себя: прецедентный блок (CBR block), содержащий компоненты для интеллектуального анализа данных (ИАД) на основе прецедентного подхода; нейросетевой блок (NN Block), включающий в себя компоненты для ИАД на основе нейросетевого подхода;
- блок хранения данных, состоящий из баз знаний для прецедентного и нейросетевого блоков, а также методов и средств для управления хранилищем.

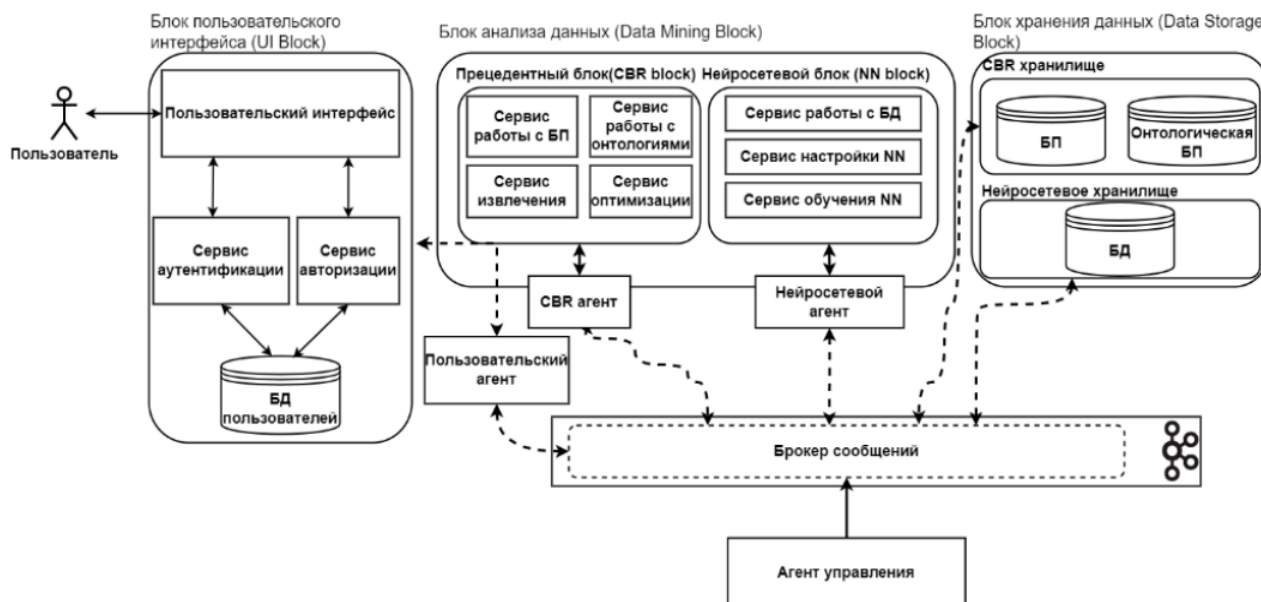


Рис. 3. Архитектура РИС

РИС позволяет работать с прецедентами, представленными в параметрическом и структурированном (на основе онтологий) виде, а также содержит ряд методов, реализующих: хранение библиотеки прецедентов (БП), её модели (в случае структурированного представления) при помощи онтологии; импорт библиотеки прецедентов (а также её модели) из внешних файлов формата Comma-Separated Values (.csv) и Obfuscated Weird Language (.owl); извлечение прецедентов из БП, наиболее соответствующих сложившейся ситуации с использованием алгоритмов k-NN, «случайного леса», метода опорных векторов и наивного байесовского классификатора.

В работах [3, 4] авторы затрагивают проблемы коммуникации в человеко-машинных системах. В статье [3] делается предположение о дуализме термина коммуникации, который имеет форму и содержание. Содержательная сторона коммуникации рассматривается как способ организации обмена информацией. Ставится и решается задача графического представления типовых форм логики коммуникации, на основе которых строится модель коммуникации. Предлагаемая модель является универсальной и может быть использована в практике различных дисциплин и предметных областей.

Разрабатывается методология формирования баз знаний для прикладных интеллектуальных систем (ИС) на основе деревьев событий. В качестве примера описывается база знаний для диагностики самолетов.

В работе [5] развиваются идеи интеграций различных интеллектуальных технологий при решении прикладных задач. В частности, описывается интеграция интеллектуальных и математических технологий для поддержки принятия решений в области обеспечения энергетической устойчивости.

В работе [6] описывается метод интеллектуального управления узлами беспроводной сенсорной сети.

Доклад [7] был посвящен развитию одного из новых направлений в области ИИ – теории категорий. Авторы предлагают использовать развиваемую ими теорию в качестве универсального инструмента для построения баз знаний прикладных ИС.

2 Секция «Машинное обучение» была представлена семью докладами. Ряд докладов был посвящен проблемам информационной безопасности и обнаружения аномальных событий в экспериментальных данных. В частности, в работе [8] рассматривается проблема создания адаптивных моделей защиты информации. Авторы предлагают новый подход к решению проблемы на основе обучения с использованием протоколов, полученных с помощью расширенного фильтра пакетов Berkley (eBPF). Фильтр eBPF является одной из новых технологий сбора данных о событиях, связанных с безопасностью информационных систем. Разработанный подход ориентирован на использование в распределенных приложениях микросервисной архитектуры и системах контейнеризации. Масштабируемость и экономичность ресурсопотребления являются основными преимуществами контейнерных технологий с точки зрения провайдера облачной услуги. Однако быстрое развитие систем контейнеризации оставляет открытым вопрос обеспечения безопасности. Авторы предлагают для решения проблемы использовать специальные системы человеко-читаемых правил, генерацию белых/черных списков, профилей поведения контейнера и адаптацию сигнатур атак. Разработанный алгоритм базируется на анализе протокола из eBPF. Для обнаружения аномалий используется набор правил, представленный в виде белого списка, который генерируется из журнала с нормальным поведением, и любое событие журнала, которое не отображается в белом списке, мы интерпретируем как аномалию. Для обнаружения атак набор правил – это черный список, который создается из журнала, содержащего атаку, и любое событие журнала, которое появляется в черном списке, мы интерпретируем как атаку. Пример правил обнаружения атак приведен на рис. 4.

| N | Based on | example of rules as elements of JSON |
|---|-------------------------------|------------------------------------------|
| 1 | event type | openat, access, ... |
| 2 | event type & argument | (openat, pathname: /etc/default/su), ... |
| 3 | event type sequence | (openat, openat, execve), ... |
| 4 | event type min/max occurrence | (openat, 0, 42), ... |

Рис. 4. Пример правил обнаружения атак

Для оценки практической полезности разработанного подхода авторами был создан программный прототип системы обнаружения аномалий и атак. Прототип был разделен на несколько программных компонентов, как показано на рис. 5.

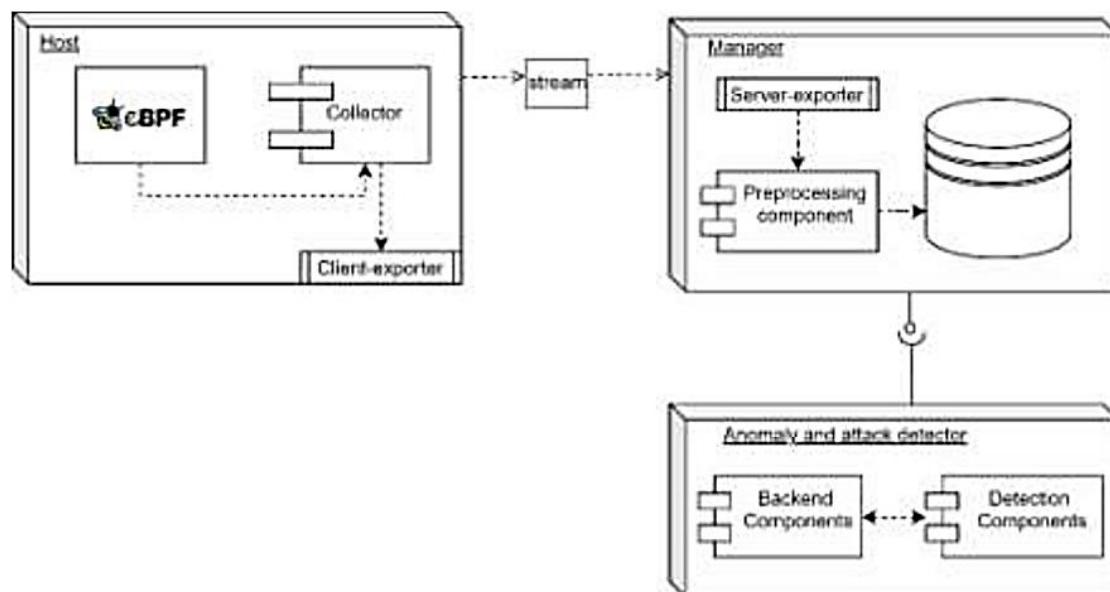


Рис. 5. Укрупненная схема программного прототипа системы обнаружения аномалий и атак

Проведенные эксперименты показали, что предложенный авторами статьи подход обеспечивает высокое качество выявления атак (т.е. выделения максимального количества событий, относящихся к атаке, и минимального количества событий, не относящихся к атаке).

В статье [9] рассматривается проблема создания адаптивных систем управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Целью исследования является построение системы ориентации БПЛА на основе алгоритма оценки с адаптивной нейросетевой идентификацией динамической модели. Основой построения адаптивного фильтра оценки состояния динамических систем является нелинейная математическая модель динамики исследуемого процесса

$$\dot{q}_s(t) = -\alpha_s q_s(t) + \alpha_s^2 (z_s(t) - q_s(t)), s = 1 \dots n, \quad (1)$$

где n – количество степеней свободы; $q_s(t)$ – обобщенная координата; $\alpha_s = \sqrt{\lambda^{-1} \alpha_{ss}^{-1} N_{ss}^{-1}}$ – параметр адаптации; λ – неопределенный множитель Лагранжа; N_{ss}^{-1} – элементы матрицы спектральных плотностей помех в канале наблюдений; $z_s(t)$ – вектор измерения.

Полученная модель требует адаптации по параметру α и может быть использована для построения адаптивного фильтра оценки состояния калмановской структуры. Адаптация модели к переходному процессу изменения ориентации БПЛА с учетом управляющего воздействия с достаточной для практики точностью может быть произведена при помощи нейронной сети. Структура нейронной сети для идентификации параметра адаптации по углу крена представлена на рис. 6 и определяется следующими параметрами: первые два слоя имеют по четыре нейрона с линейной функцией активации, третий слой – один нейрон с линейной функцией активации, на вход подается реализация переходного процесса размерности 1000 отсчетов, на выходе – значение искомого параметра.

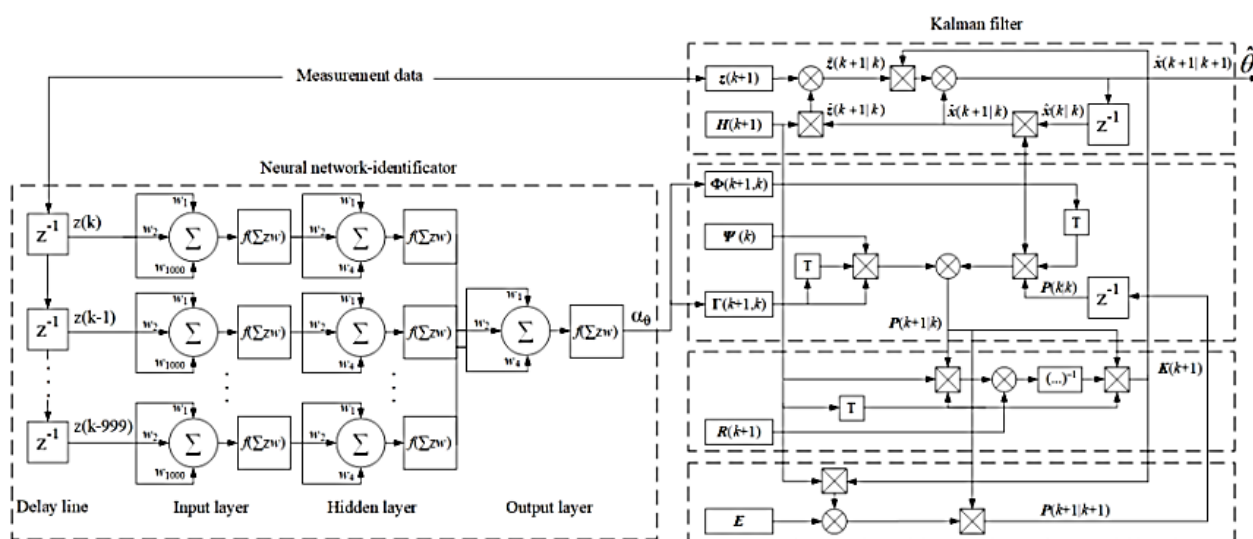


Рис. 6. Структурная схема нейронной сети в составе алгоритма оценки угла ориентации БПЛА

В результате эксперимента на основе численного моделирования можно сделать вывод о том, что применение адаптивной модели движения в составе фильтра позволяет повысить точность оценки угловой ориентации БПЛА за счет адаптации к внешним воздействиям, поскольку обеспечивает лучшее соответствие динамической модели реальному движению объекта в сравнении с кинематическими моделями классического фильтра Калмана.

В статье [10] авторы также разрабатывают проблему информационной безопасности. Предлагается новая методология обнаружения аномалий и атак на экземплярах облачной инфраструктуры. В статье [11] рассматривается гибридный подход к обнаружению аномалий во временных рядах, также предназначенный для использования в различных предметных областях, включая информационную безопасность и предикцию критических состояний динамических систем. В статье описан программный комплекс для реализации метода поиска аномалий с помощью нейронной сети. В работе [12] представлены технологии машинного обучения, которые применяются для прогнозного моделирования механических свойств покрытий материалов.

В работе [13] рассматриваются задачи машинного обучения применительно к системам информационной безопасности. Авторы предлагают общую схему процесса функционирования некоторой гипотетической системы ИИ (СИИ), которая включает в себя два этапа:

- обучение, сбор и обработка исходных данных и самообучение (задействованы участник и разработчик);
- использование и непосредственное использование СИИ в промышленной среде (участвует только пользователь).

Каждый этап имеет свой набор данных и функционал, представляющие ценность для злоумышленников (рис. 7). На основе проведенного анализа предлагается классификация атак на СИИ и формируется модель угроз СИИ, в которой последние разделяются на две группы: угрозы конфиденциальности и угрозы функционированию СИИ. В процессе разработки нового подхода к защите СИИ авторами была реализована атака на функционирование СИИ, а также была предпринята попытка ее обнаружения.

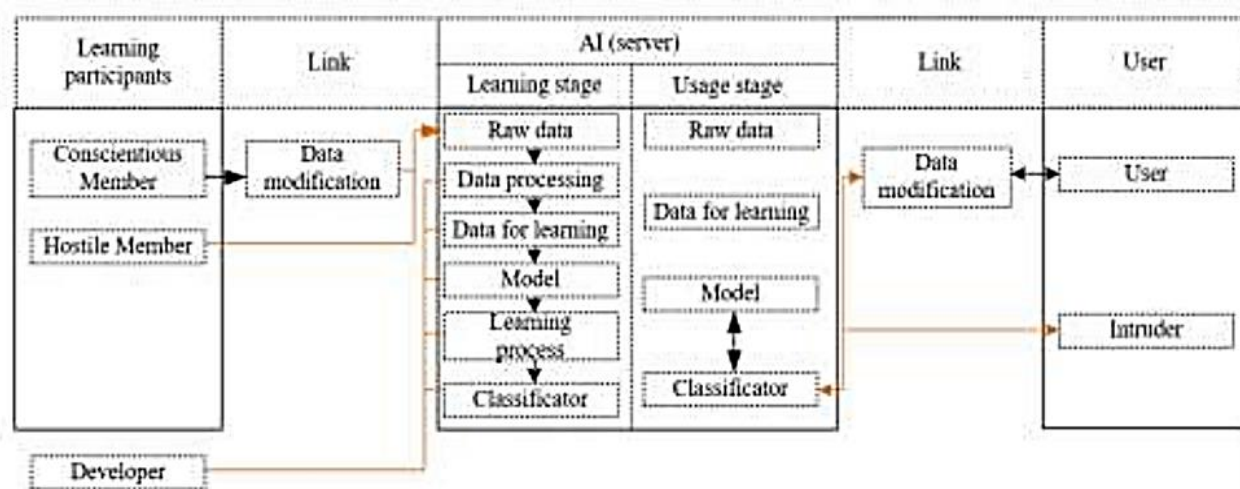


Рис. 7. Этапы работы СИИ

Используемая модель обучения представлена на рис. 8. Перед обучением данные были нормализованы.

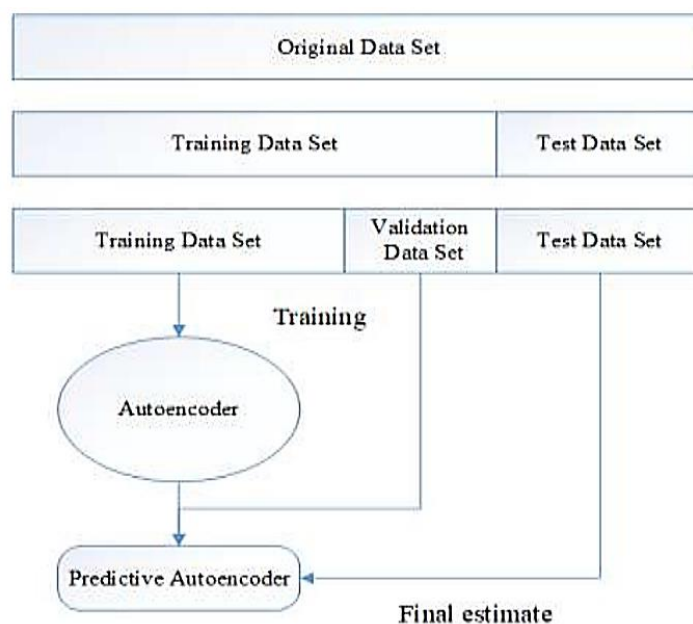


Рис. 8. Модель обучения нейронной сети

С целью повышения вероятности обнаружения атак автокодировщик обучался только на легитимных данных. Легитимные данные делились на training data set and validation data set. Test data set использовался для проверки работы модели нейронной сети. В него входили аномальные и легитимные данные. Результаты проверки точности обнаружения аномалий (атак на СИИ) приведены на рис. 9. Из рис. 9 следует, что точность выявления атак равна 88 %, а полнота выявления – 86 %, это является, по мнению авторов, хорошим результатом.

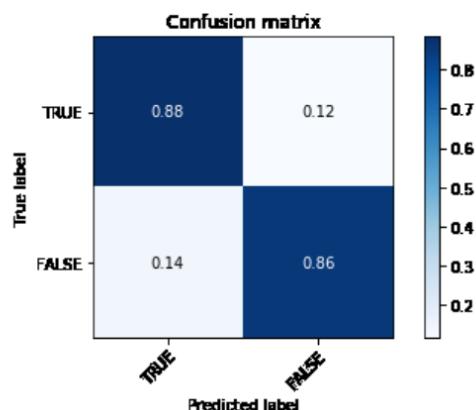


Рис. 9. Оценка точности адаптивной модели

3 Секция «Автоматизация и интеллектуализация производственных процессов» была представлена восемью докладами. Работа [14] направлена на решение транспортно-логистических задач. Основным результатом статьи является каноническая форма представления транспортных потоков, которая используется для решения задач однокритериальной и многокритериальной оптимизации. Каноническая форма позволяет быстро получить предварительные оценки для выбора оптимальных вариантов решений на основе вариации параметров, представляющих выбранные предпочтения моделирования. В основу разрабатываемого подхода положена идея представления транспортного процесса в виде системы, перерабатывающей вход в выход. Элементы данной системы связаны линейными соотношениями. Например, простейшая модель перевозки груза между пунктами имеет вид

$$\begin{cases} \dot{x} = -\alpha \cdot x + v(t), \\ w = \alpha \cdot x. \end{cases}$$

Здесь $v(t)$ и $w(t)$ – объемы входящего и выходящего грузопотоков; $x(t)$ – текущий запас груза в пункте отправления.

Допускаются и «расщепления» путей, например, на две ветви:

$$\begin{cases} \dot{x} = -(\alpha + \beta)x + v(t), \\ \dot{y} = -\gamma y + \alpha x, \\ \dot{z} = -\eta z + \beta x, \\ w_1 = \gamma y, \\ w_2 = \eta z. \end{cases}$$

Здесь $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ – константы, характеризующие скорость моделируемых процессов.

Динамику переменных с учетом нулевых начальных значений переменных x, y, z авторы предлагают представить в виде простого описания

$$w(t) = \int_0^t v(t-r) (ke^{-kr}) dr.$$

Функция ke^{-kr} называется функцией веса, характеризующей структуру графа транспортных потоков. В общем случае для каждой линейной системы существует своя функция веса $m(r)$, и тогда вход-выход связаны соотношением

$$w(t) = v(t) * m(t). \quad (2)$$

Используя операционное исчисление, с помощью линейного оператора Лапласа исследуемую функцию транслируют в другое пространство:

$$L : \xi(t) \rightarrow \bar{\xi}(s) = \int_0^{\infty} \xi(t) e^{-st} dt.$$

Поскольку L – прообраз e^{-ist_i} , переменная τ – это дельта-функция $\delta(t - \tau_i)$, следовательно, связь вход-выход на основании (2) представляется в форме

$$w(t) = \sum_i \lambda_i v(t - \tau_i). \quad (3)$$

В результате каждой транспортной системе можно просто сопоставить матрицу в качестве конечномерного аналога

$$\begin{pmatrix} \lambda_1, \dots, \lambda_n \\ \tau_1, \dots, \tau_n \end{pmatrix},$$

на основании которой строится соотношение (3). Здесь n – число путей, на которые расщепляется входной поток, λ_i – коэффициенты расщепления пути, характеризующие выбранные предпочтения, τ_i – задержки по времени на i -м пути. Из таких простых элементов можно строить сколь угодно сложные процессы, соединяя конечные вершины одного элемента с начальными вершинами другого, как показано на рис. 10, а, б.

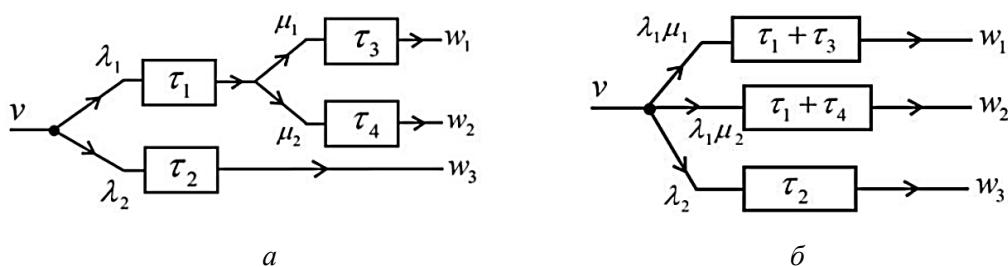


Рис. 10. Эквивалентное приведение сложной структуры к простому элементу

В конечном итоге такое представление транспортного процесса позволяет упростить решение множества оптимизационных задач.

В работе [15] рассматривается проблема интеллектуального управления динамическими объектами на примере задачи парковки беспилотного автомобиля в средах со статическими и динамическими препятствиями. За последнее десятилетие много исследований было посвящено планированию движения беспилотного автомобиля в различных типах задач. Парковка является одним из примеров таких задач, в этом случае беспилотный автомобиль совершает маневр – ход вперед, а после достижения подходящего положения совершает следующий маневр – ход назад, по окончании которого оказывается в парковочном месте. Для решения задачи авторы предлагают метод, который базируется на обучении с подкреплением. Использование этого метода позволяет учитывать, как кинематические ограничения автомобиля, так и статические и динамические препятствия в среде.

В работе используется локальный планировщик алгоритма POLAMP, который был обучен избегать динамические препятствия во время парковки. В основу разработки локального планировщика положен многоагентный подход. Рассматривается частично наблюдаемый марковский процесс принятия решений (S, A, O, T, r, γ) , где S – пространство состояний, A – пространство действий, O – пространство наблюдений, $T : S \times A \times S \rightarrow R$ модель перехода, r – функция вознаграждения, и $\gamma \in [0, 1)$ дисконтирующий множитель. Предполагается, что агент не может на прямую иметь доступ к состояниям среды, а лишь к наблюдениям и формирует стратегию $\pi(o)$ при условии наблюдения $o \in O$. Действия агента определяются стратегией π .

Помимо процесса принятия решений авторы строят систему планирования $\Sigma = (S, A, T)$ и задачу планирования $P = (\Sigma, s_0, g)$, решением которой является последовательность действий $\{a_1, a_2, \dots\}$. Полагается, что стратегия π генерирует действия $a_i = \pi(o_0), \dots, \pi(o_{n-1})$. Так как стратегия параметризована θ , тогда алгоритм должен оптимизировать параметр θ , чтобы максимизировать ожидаемое суммарное будущее вознаграждение и минимизировать длину траектории:

$$\pi^*: \begin{cases} \pi^* = \operatorname{argmax}_{\pi(\theta)} E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r(s_t) | \pi \right] \\ \pi^* = \operatorname{argmin}_{\pi(\theta)} \| \{ \pi(o_n), \pi(o_1), \dots, \pi(o_{n-1}) \} \| \\ \text{где } g = \pi(o_{n-1}) \end{cases}$$

Предложенный метод был полностью интегрирован в платформу Apollo с использованием узлов Cyber RT, которые необходимы для передачи полученной из алгоритма траектории в симулятор. Разработанный метод демонстрирует большую гибкость в средах, которые не использовались в обучающей выборке.

Работа [16] представляет собой комплексное исследование проблем интеллектуального мониторинга перевозочных процессов на основе аналитики данных и мягких вычислений. Основная идея статьи заключается в демонстрации возможностей развития современных аналитических технологий для проектирования прикладных интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте. Центральное место в работе занимает предложенная авторами методика извлечения знаний о контролируемом процессе на основе нечетко-иерархического гранулирования многомерных временных рядов (ВР), описывающих поведение исследуемого процесса. Механизмы принятия решений реализованы на основе предиктивной модели, базовыми примитивами которой являются обобщенные оценки состояний процесса, представленные в виде лингвистических описаний мета-параметров порядка.

Состояния перевозочного процесса (ПП), наблюдаемые в текущий момент времени t , характеризуются состояниями входящих в него объектов O_1, O_2, \dots, O_n , в качестве которых обычно выступают подвижные единицы. В свою очередь, состояния объектов O_i оцениваются рядом числовых параметров X_1, X_2, \dots, X_m , характеризующих технологическую ситуацию (ТС). Динамика ТС на временном интервале $T = [t_0; t_k]$ описывается последовательностью векторов $P_{n \times m}^T = P_{n \times m}(t_0), P_{n \times m}(t_1), \dots, P_{n \times m}(t_k)$, сопоставленных временным отсчетам $t_i \in T$, формальным представлением которой является ВР:

$$X_{ijt} = \{x_{ij}(t) | x_{ij}(t) \in R, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, t = 0, \dots, k\}.$$

Гранулирование МВР заключается в построении отображений пространства числовых параметров $P_{n \times m}^T$ в пространство гранулированных параметров $G = L \times M \times D$ на разных уровнях обобщения, включая уровни числовых и лингвистических обобщений для описания мгновенных состояний ТС и уровень темпоральных обобщений для описания динамики ТС. В рамках данного исследования гранулирование информации лежит в основе дескриптивного анализа ТС, модели восприятия которых представлены в виде ВР.

Авторы выделяют три основные группы гранул: группа нечетко-признаковых гранул, представленная в виде множества лингвистических оценок L ; группа мета-гранул, представленная в виде множества обобщенных мета-параметров M , имеющих конкретную технологическую интерпретацию; группа нечетко-темпоральных гранул D , характеризующих распределение во времени обобщенных параметров ТС.

Группа нечетко-признаковых гранул сжато описывают свойства ТС, распределенные по параметрам x_{ij} объектов с использованием множества лингвистических терминов L – лингвистических переменных (ЛП) и их лингвистических значений (ЛЗ). С этой целью для описания состояния ТС вводится множество ЛЗ L_* , характеризующих качественные уровни значений параметра X . Например, множество ЛЗ L_V , характеризующих параметр “Скорость” отцепа, может быть представлено $L_V = \{\text{«НИЗКАЯ»}, \text{«ТИПОВАЯ»}, \text{«ВЫСОКАЯ»}\}$, а параметр “Вес” отцепа, может быть представлен множеством ЛЗ $L_W = \{\text{«ЛЕГКИЙ»}, \text{«ТЯЖЕЛЫЙ»}\}$.

Группа нечетко-темпоральных гранул D описывает динамику ТС на временном интервале Δt с использованием протоформ вида

$$\text{“На временном интервале } \Delta t \text{ наблюдается } x = l \in L_* \text{”}.$$

Гранулирование временных интервалов осуществляется на основе отображения, осуществляющего преобразование рядов числовых параметров ($x_{ij}(t) | t \in \Delta t$), определенных на интервалах $\Delta t \subseteq T$, во множество нечетко-темпоральных гранул D . Например, для описания тренда параметра “Скорость” отцепа на временном интервале Δt может быть использована лингвистическая оценка коэффициента a

в уравнении регрессии $x = at + b$, представленная множеством нечетко-темпоральных гранул $D_t = \{\text{“Увеличение”}, \text{“Падение”}, \text{“Незначительные колебания”}\}$.

Верхний уровень гранулирования осуществляется с использованием множества мета-гранул M , характеризующих наиболее общие признаки ТС, представленные в виде лингвистических мета-параметров. Примерами мета-параметров являются лингвистические оценки таких признаков ТС, как СЛОЖНОСТЬ (технологической ситуации), КРИТИЧНОСТЬ (технического состояния), ИНТЕНСИВНОСТЬ (движения), НАПРЯЖЕННОСТЬ (поездной обстановки) и т.п. Мета-параметры формируются на основе обобщения лингвистических параметров, полученных на нижнем уровне гранулирования, с использованием специального класса нечетких классификационных моделей.

Модель нечеткого адаптивного классификатора (АФК) устанавливает связь между мгновенными состояниями ТС, представленными в виде числовых или лингвистических параметров МВР, и обобщенными мета-параметрами ТС. Свойство адаптивности АФК позволяет использовать данную модель в изменяющихся условиях функционирования объекта исследования. Нечеткие правила АФК представлены в виде протоформ, имеющих смысл описаний:

Если ТС= “Описание”, То Мета-параметр =” Оценка”

Предусловие правила содержит описание ТС в виде набора лингвистических параметров, а заключение – оценку мета-параметра, соответствующего данной ТС. Лингвистическим представлением пропозиции является нечеткое правило вида

$$R_i: \text{ Если } x_1 = l_{i1} \text{ И } x_2 = l_{i2} \text{ И } \dots \text{ И } x_n = l_{in} \text{ ТО } M = m_i . \quad (4)$$

Здесь нечеткие термы $l_{ij} \in L$ описывают лингвистические параметры ТС, а нечеткий терм $m_i \in M$ обозначает мета-параметр. Формализованным представлением нечеткого правила (4) является выражение

$$R_i: \mu_{li1}(x_1) \& \mu_{li2}(x_2) \dots \& \mu_{lin}(x_n) \rightarrow m_i.$$

μ_{lij} – ФП j -го нечеткого терма в i -м нечетком правиле.

Степень ассоциации входного вектора $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ с нечетким правилом R_i определяется через T -норму с использованием продукционного оператора:

$$T(\&_{j=1}^n \mu_{lij}(x_j)) = \mu_{li1}(x_1) \cdot \mu_{li2}(x_2) \cdot \dots \cdot \mu_{lin}(x_n).$$

В контексте решаемой задачи левые и правые части нечетких правил АФК имеют следующую интерпретацию. Антецедент нечеткого правила $\&_{j=1}^n \mu_{lij}(x_j)$ описывает в обобщенной форме один из типовых вариантов ТС, а консеквент представляет собой лингвистическую оценку m_i мета-параметра M , характеризующего обобщенные свойства ТС.

Главным преимуществом рассмотренной модели нечеткого классификатора перед другими типами моделей, например, нейросетевыми, является то, что база нечетких правил АФК, представленная с использованием интерпретируемых лингвистических описаний, допускает естественную интеграцию знаний экспертов в модель формирования мета-параметров.

В работе [17] рассматривается возможность использования технологий Semantic Web, включая графы знаний, для разработки современных интеллектуальных систем. В статье предлагается автоматизировать процесс извлечения конкретных сущностей (фактов) из табличных данных для последующего построения баз знаний. Ключевой особенностью подхода является семантическая интерпретация (аннотация) отдельных элементов таблицы. Рассматривается использование предложенного подхода в области инспектирования промышленной безопасности нефтехимического оборудования и технологических комплексов.

В работе [18] развивается теория эволюционного управления многоступенчатыми производствами на основе объединения технологий Демпстера – Шеффера и методов интервального анализа. Традиционно техническая диагностика состояния технологического процесса основана на измерении и анализе мгновенные значения контролируемых параметров. Предлагаемый подход, основанный на использовании интервального анализа в системе технической диагностики, позволяет снизить чувствительность к шумовым помехам и задержкам в динамических каналах между вводом и выводом непрерывного технологического процесса.

В работе [19] исследуется проблема оценивания случайных процессов, наблюдаемых в шумовых условиях на конечном интервале времени с привлечение интеллектуальных технологий анализа

данных. Для случайных процессов общего вида, описываемых нелинейными стохастическими дифференциальными уравнениями, разрабатывается метод терминальной фильтрации по критерию, учитывающему конечность интервала времени наблюдения и зависящему от апостериорной плотности распределения, что является наиболее информативной характеристикой наблюдаемого процесса.

В работе [20] решается задача управления инерционными аккумуляторами в электроподвижных составах. В качестве аккумулятора энергии используется маховиковый накопитель, интегрированный в базовую конструкцию. Энергоэффективность хранилища во многом определяется системой управления. В статье приводятся интеллектуальные алгоритмы управления вентильно-индукторными электрическими машинами с привлечением экспертных знаний специалистов о физике процессов.

В работе [21] исследуется проблема создания дружественных интерфейсов для операторов управления техническими объектами. Понятие интерфейса имеет множество формулировок и отражает особенности его реализации в различных условиях. В статье предлагается новая методологическая база, основанная на категориях мышления пользователя, совмещенных с логикой работы системы.

4 Секция «Нечеткие и нетрадиционные логики» была представлена семью работами. Работа [22] посвящена проблеме компьютерного моделирования индуктивных и дедуктивных рассуждений на примере автоматического решения планиметрических задач. Исследование проводилось с использованием экспериментальной системы, включающей интерфейс на естественном языке. Дедуктивный компонент системы основан на аксиоматике геометрии, индуктивный компонент основан на концепции Пойа. С использованием этого теоретического базиса выполнена компьютерная реализация системы, интегрирующей обработку ЕЯ-формулировки задачи, автоматизированное решение и интерактивную визуализацию результата. На рис. 11 отражены основные шаги, направленные на решение системой задачи: «построить равносторонний треугольник по трем заданным расстояниям от точки внутри треугольника до вершин». Далее следуют дедуктивные шаги, доказывающие, что полученный треугольник – искомым.

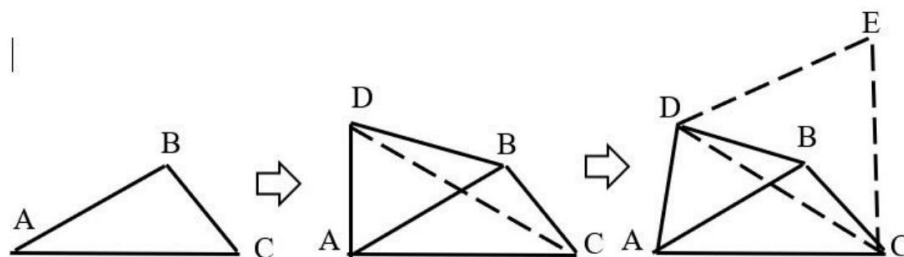


Рис. 11. Основные шаги, направленные на решение задачи

Статья содержит множество примеров работы с когнитивными шаблонами для конкретных задач, скриншоты рисунков некоторых задач и около 100 перифразов текста, описывающего равнобедренный треугольник с соответствующим когнитивным шаблоном. Проведенное исследование позволило выявить тесное взаимодействие индуктивных и дедуктивных рассуждений на уровне компьютерного моделирования в рамках автоматизированного решения планиметрических задач.

В статье [23] рассматривается использование нечеткой логики в задачах онтологического инжиниринга киберфизических систем. В качестве основы моделирования предлагается использовать темпоральную нейронечеткую разновидность сетей Петри – оригинальную модель временной нейронечеткой сети Петри (ТННСП) в виде коррежа

$$TNFPN = (P, T, I, O, F, Al, D, m0, \alpha, R),$$

где $P = \{P_1, \dots, P_{np}\}$ – конечное непустое множество вершин сети Петри, np – общее число вершин; $T = \{T_1, \dots, T_{nt}\}$ – конечное непустое множество переходов сети Петри, nt – общее число переходов; $I = \{I_1, \dots, I_{nt}\}$ – переходные функции входа; $O = \{O_1, \dots, O_{nt}\}$ – переходные функции выхода; $F = \{F_1, \dots, F_{nt}\}$ – конечное множество времен переходов сети Петри; $A = \{A_1, \dots, A_{na}\}$ – набор временных правил логики Аллена для сетевых переходов, na – общее количество правил; $D = \{D_1, \dots, D_{np}\}$ – конечный набор значений меток, указывающих срабатывания переходов, nd – общее количество дуг; $m0$ – исходный вектор разметки, каждая компонента которого определяется значением

функции принадлежности нечеткого присутствия маркера в соответствующей позиции; $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_{nt}\}$ – вектор значений срабатывания переходов, $R = \{R_1, \dots, R_{nt}\}$ – конечное множество ресурсов.

Фрагмент обобщенной структуры TNNSP представлен ниже на рис. 12.

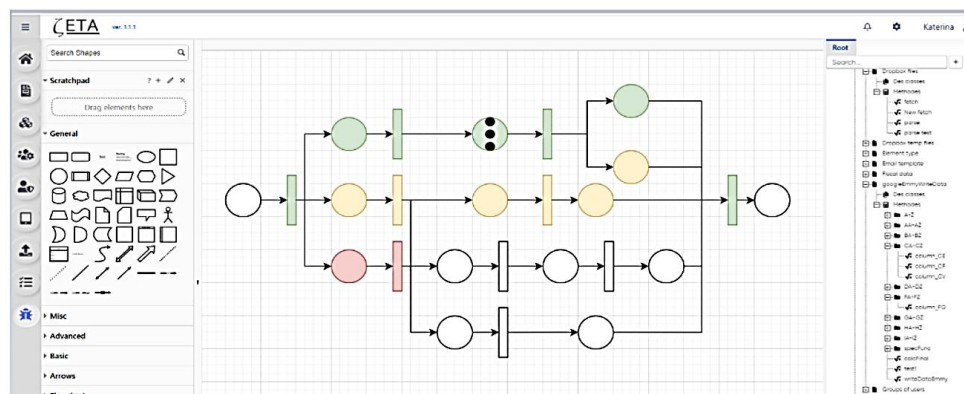


Рис. 12. Скриншот фрагмента обобщенной структуры TNNSP

В работе [24] рассматривается проблема интеллектуализации образовательных процессов с привлечением мягких технологий и нечетких множеств. Предлагаемый процесс обучения студентов осуществляется в процессе взаимодействия с электронной системой обучения, которая адаптируется к уровню знаний ученика, его психотипу и системе предпочтений. Разработанная методика основана на нечетко-множественном агрегировании результатов, полученных при выполнении обучающимся комплекса оценочных заданий, рекомендованных экспертами и отобранных преподавателем для проверки уровня сформированности выделенных компетенций.

В работах [25, 26] также разрабатываются методы решения технических задач с использованием нечеткой логики. В статье [26] исследуется проблема синтеза оптимальных систем управления динамическими объектами. Для этого предлагается использовать алгоритмы с переменной структурой, позволяющие повысить эффективность многорежимных систем. Задача перехода между структурами может быть решена на основе средств нечетко-логического вывода с построением модели нечеткого топологического пространства на множестве управлений с новыми типовыми структурами. В статье [25] описывается подход к диагностированию электрооборудования в условиях неполной и нечеткой информации. Подход основан на построении таблицы влияния показателей качества электроэнергии на оборудование, а затем на их основе строятся смешанные нечетко-продукционные правила.

В работе [27] рассматривается проблема совершенствования управления транспортно-логистическими процессами (ТЛП). В статье обосновано использование гибридного нейронечеткого моделирования ТЛП, интегрирующего естественный интеллект специалиста-эксперта и интеллект машины (искусственный интеллект, основанный на применении нейросетей). Описаны основные логико-лингвистические «высказывания» взаимодействия хозяйствующих агентов. Механизм обучения нейронечеткой сети определяет правила нечеткого вывода. Основным достоинством работы является возможность интегрировать в системе управления машинный (искусственный) и естественный интеллект.

В работе [28] развиваются идеи нечеткого гранулирования многомерных временных рядов (МВР) применительно к решению медицинских задач. Наиболее интересен в статье теоретический материал, связанный с нечетким гранулированием МВР в рамках технологий дескриптивной аналитики.

Объект дескриптивного анализа O определяется в виде совокупности элементов $G = \{g_i, i = 1, 2, \dots, gk\}$, описываемых множеством показателей $M = \{m_j, j = 1, 2, \dots, mk\}$, числовые значения которых изменяются на временном интервале $T = [1, tk]$. Тогда модель восприятия объекта O определим в виде многомерного временного ряда

$$X = \{x_{ijt}, x_{ijt} \subseteq \mathbb{R}, i = 1, 2, \dots, gk; j = 1, 2, \dots, mk; t = 1, 2, \dots, tk\}.$$

Задача дескриптивного анализа объекта заключается в том, чтобы получить знания о состоянии и поведении объекта исследования в виде информационных гранул (ИГ). Вводится два класса ИГ: expert-defined гранулы и data-extracted гранулы. Для представления свойств МВР в контексте состояния и поведения объекта в лингвистической форме используют пропозиции, формально задаваемые в виде протоформ вида

$$m \text{ is } Z,$$

$$Qx's \text{ are } Z,$$

где m представляет собой показатель объекта, x обозначает некоторую сущность объекта, Z определяет data-extracted гранулу, описывающую состояние или поведение объекта, Q обозначает data-extracted гранулу в виде квантификатора, обобщающего сущности с одинаковыми Z .

Постановка задачи грануляции МВР в рамках дескриптивного анализа объекта O формулируется в следующем виде. Имея многомерный временной ряд X и набор expert-defined гранул E , заданных на $W \supseteq X$, требуется определить множество data-extracted гранул D , т.е. построить отображение

$$F: X \times E \rightarrow D.$$

Свойства объекта O рассматриваются как некоторые качественные характеристики, которые резюмируют его состояние и поведение по МВР в лингвистических терминах. Для этого используются лингвистические термины $Y \in Sy$, описывающие качественные уровни значений X , а для описания поведения – лингвистические термины $B \in Sb$, характеризующие тенденции изменения качественных уровней на временном интервале $T = [1, tk]$, значения которых содержатся в множестве $Sb = \{\text{«рост»}, \text{«стабильность»}, \text{«падение» и «колебание»}\}$. С каждым лингвистическим термином из множеств Sy и Sb сопоставлено обобщенное ограничение, заданное на X , в виде математического описания. Например, для термина B могут быть использованы ограничения

$$B = \begin{cases} \text{рост,} & \text{if } a > c_{\max} \\ \text{стабильность,} & \text{if } a \in [c_{\min}, c_{\max}] \\ \text{падение,} & \text{if } a < c_{\min} \end{cases},$$

где a определяет оценку коэффициента в уравнении регрессии $x_t = at + b$; интервал $[c_{\min}, c_{\max}]$ включает в себя значения a , имеющие малую вариабельность относительно некоторой константы.

Для агрегирования множеств похожих ИГ используются протоформы с квантификаторами частотности, в которых квантификатор $Q \in Sq$ резюмирует множество лингвистически эквивалентных ИГ с использованием лингвистических термов. Набор е-гранул E определяется в виде протоформ для представления экспертных знаний о состоянии и поведении объекта:

$$E1: Y \text{ is } rY, Y \in Sy, rY \in R,$$

$$E2: B \text{ is } rB, B \in Sb, rB \in R,$$

$$E3: Q \text{ is } rQ, Q \in Sq, rQ \in R,$$

где выражение ' $A \text{ is } rA$ ' обозначает, что лингвистический термин A ограничен математической конструкцией r . Введенные термины образуют терминологический словарь $S = \{Sy, Sb, Sq\}$, используемый для представления свойств в рамках дескриптивного анализа объекта. Множество математически заданных обобщенных ограничений $R = \{rY, rB, rQ\}$ является ключевым компонентом е-гранул, так как определяет способ грануляции МВР. На основе введенных обозначений определим модель expert-defined гранулы в виде

$$E = \langle Z, R, W, Ig \rangle,$$

где Z обозначает лингвистический термин для анализируемого свойства, а его семантика определяется построенными на некотором множестве значений $W \supseteq X$ обобщенными ограничениями R в рамках выбранной теории грануляции Ig .

Список литературы / References

- 1 Intelligent Support for the Interaction of Transport Process Participants Using Fuzzy Modeling / M. V. Bakalov [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 403–412.
- 2 Eremeev, A. Architecture of a Distributed Intelligence System for Data Mining Based on Case-Based Reasoning / A. Eremeev, P. Varshavskiy, S. Polyakov // Proceedings of the Sixth International Scientific

Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 13–21.

3 **Rogozov, Y. I.** Communication as a Basic Element of the Methodology for the Development of Intelligent Systems / Y. I. Rogozov, V. S. Lapshin, S. A. Kucherov // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 31–41.

4 **Rogozov, Y. I.** Approach to the Implementation of Intelligent Low-Code Platforms / Y. I. Rogozov, V. S. Lapshin, M. A. Borovskaya // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 42–50.

5 Knowledge Bases Engineering Based on Event Trees Transformations : A Case Study for Aircraft Diagnostics / A. Y. Yurin [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 3–12.

6 **Vinogradov, G. P.** Patterns in Smart Wireless Sensor Network Nodes / G. P. Vinogradov, I. A. Konjukhov // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 73–82.

7 **Zhozhikashvili, A. V.** Category Technology to Design Intelligent Systems for Complicated Decisions / A. V. Zhozhikashvili, V. L. Stefanuk // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 22–30.

8 Detection of Anomalies and Attacks in Container Systems : An Integrated Approach Based on Black and White Lists / I. Kotenko [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 107–117.

9 **Kostoglotov, A. A.** Synthesis of Estimation System for UAV Orientation with a Neural Network-Identifier / A. A. Kostoglotov, A. A. Penkov, V. O. Zekhtser // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 172–180.

10 **Pestov, I.** Methodology for Detecting Anomaly and Attack on Cloud Infrastructure Instances / I. Pestov, L. Vitkova // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 131–141.

11 Hybrid Approach to Time Series Anomaly Detection Using LSTM Networks and Ontology / V. Moshkin [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 181–191.

12 Machine Learning-Based Predictive Modeling of Mechanical Properties of Coatings / V. I. Koleznikov [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 162–171.

13 Attacks Against Artificial Intelligence Systems : Classification, The Threat Model and the Approach to Protection / I. Kotenko [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 293–302.

14 **Ilicheva, V. V.** Acyclic Structures of Transport Processes in Transportation Management Problems / V. V. Ilicheva, A. N. Guda // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 303–313.

15 **Gorbov, G.** Learning Adaptive Parking Maneuvers for Self-driving Cars / G. Gorbov, M. Jamal, A. I. Panov // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 283–292.

16 **Dolgiy, A.** Intelligent Models for State Assessment and Behavior Prediction in Railway Processes Based on Descriptive Analytics and Soft Computing / A. Dolgiy, A. Khramtsov, S. Kovalev // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 358–368.

17 **Dorodnykh, N. O.** Knowledge Graph Augmentation Based on Tabular Data : A Case Study for Industrial Safety Inspection / N. O. Dorodnykh, A. Y. Yurin // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 314–324.

18 **Paliukh, B. V.** Evolution Management of Multistage Manufacturing Based on Evidence Theory and Methods of Interval Analysis / B. V. Paliukh, A. N. Vetrov // Advances in Artificial Systems for Medicine and Education V. – Springer International Publishing, 2022. – P. 134–143.

19 Terminal Stochastic Filtering of Nonlinear Dynamic Processes : The Case of Invariant Immersion / S. Sokolov [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 369–379.

19 Control of SRM of Flywheel Energy Storage Drive / P. G. Kolpakhchyan [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 380–391.

20 Development of a Model of User Interface Logic Representation / Y. Lipko [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 392–400.

21 **Kurbatov, S. S.** Complex Modeling of Inductive and Deductive Reasoning by the Example of a Planimetric Problem Solver / S. S. Kurbatov, I. B. Fominykh // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham: Springer International Publishing, 2022. – P. 454–462.

22 **Borisov, V. V.** Ontological Engineering of Interrelated Processes in Complex Cyber-Physical Systems / V. V. Borisov, A. E. Misnik // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 413–423.

23 Mathematical Models and Algorithms of an Intelligent Platform for the Implementation of an Individual Learning Trajectory / G. I. Akperov [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 424–436.

24 Mapping Out the Measures to Prevent the Failure of Electrical Equipment / A. E. Kolodenkova [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 437–443.

25 **Kostoglotov, A.** Synthesis of a Quasi-Optimal Control System Using the Maximum Condition of Generalized Power Under Fuzziness of Operation Modes' Boundaries / A. Kostoglotov, S. Lazarenko // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 444–453.

26 Intelligent Support for the Interaction of Transport Process Participants Using Fuzzy Modeling / M. V. Bakalov [et al.] // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 403–412.

27 **Afanasieva, T.** Information Granulating and Its Use in Descriptive and Predictive Analysis of Medical Data / T. Afanasieva // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 229–238.

S. M. Kovalev, A. N. Guda, A. I. Dolgiy

ANALYTICAL REVIEW OF PROCEEDINGS OF IITI'22 CONFERENCE

Abstract. The paper provides a brief review of the proceeding analysis presented at the IITI'22 conference, and considers the main areas of both theoretical and applied research in the field of modern artificial intelligence (AI). Traditionally, the main emphasis in most of the materials accepted for publication was on the use of modern information and intellectual technologies in technology. Four main areas presented at the IITI'21 conference were identified: applied intelligent systems, machine learning, and intellectualization of production processes, fuzzy and non-traditional logics. For each of the areas, an analysis of the most interesting reports was made to popularize the results of research in the field of applied artificial intelligence among the Russian-speaking audience.

As part of the conference, a round table was organized, which also discussed the problems of using AI in medicine, business and education. The best works were also included in the proceedings of the conference "Proceedings of the Sixth International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'22)".

Keywords: intelligent information technologies, artificial intelligence, soft computing, industrial intellectualization.

For citation: Kovalev, S. M. Analytical review of proceedings of ITI'22 conference / S. M. Kovalev, A. N. Guda, A. I. Dolgiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 159–174. DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_159.

Сведения об авторах

Ковалев Сергей Михайлович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», профессор,
Ростовский филиал
АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (РостФ НИИАС),
главный научный сотрудник,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ksm@rfniias.ru

Гуда Александр Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Информатика»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, проректор по научной работе,
e-mail: guda@rgups.ru

Долгий Александр Игоревич

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

Information about the authors

Kovalev Sergey Mikhaylovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Automatics and Remote Control on Railway Transport», Professor,
JSC «NIIAS»,
Rostov Branch, Chief Scientific Researcher,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ksm@rfniias.ru

Guda Alexander Nikolayevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Informatics»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Chair, Vice Rector for Scientific Research,
e-mail: guda@rgups.ru

Dolgiy Alexander Igorevich

JSC «NIIAS»,
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, General Manager,
e-mail: info@vniias.ru

В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова, М. А. Кулагин

ПОДХОД К КЛАССИФИКАЦИИ ИМЕН СОБСТВЕННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ КОМАНД ДИСПЕТЧЕРА

Аннотация. В настоящее время распространение и актуализация использования систем машинного обучения открывают новые горизонты использования систем речевого распознавания во всех областях промышленности, в том числе в железнодорожном транспорте, где предъявляются особо повышенные требования к безопасности пассажиров. Авторами проведен обзор актуальных патентов существующих систем распознавания речи, выделены возможные связи между патентами. В работе также рассматривается возможное использование трансферного обучения для повышения производительности распознавания речи диктора. Исходя из анализа литературы, сформулирована цель исследований как разработка алгоритма распознавания команд устойчивого к шумам и независимого от диктора. В рамках данной статьи рассматривается решение задачи классификации имен собственных с использованием мел-частотных кепстральных коэффициентов и сверточной нейронной сети. Авторы приводят анализ результатов обучения нейронной сети на тестовой выборке для разного количества мел-частотных кепстральных коэффициентов.

Ключевые слова: распознавание речи, патент, машинное обучение, трансферное обучение, мел-частотные кепстральные коэффициенты, матрица ошибок.

Для цитирования: Подход к классификации имен собственных для системы распознавания команд диспетчера / В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова, М. А. Кулагин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 175–183. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_175.

Введение

Системы голосового управления, которые являются новейшими технологиями XXI века, набирают все больший оборот в развитии и распространении. Несмотря на то, что первые разработки систем голосового управления были представлены еще в 50-х годах XX века, в настоящее время в использовании находятся многочисленные системы от голосового управления телефоном до управления автомобилем. Система распознавания речи лежит в основе систем голосового управления, разработкой и адаптацией которых занимаются многие ученые в России и за рубежом. Развитие технологии искусственного интеллекта послужило причиной к совершенствованию систем распознавания речи. Реализация простейшего голосового помощника является в настоящее время довольно простой задачей, если разработчик обладает навыком программирования на одном из распространенных языков программирования.

Анализ патентов систем распознавания речи

В настоящее время в России более 100 компаний занимаются разработкой систем искусственного интеллекта (ИИ), в том числе разработкой систем распознавания речи на основе технологий ИИ. Для того, чтобы оценить современный технический уровень и устремленность развития систем распознавания речи в рамках рассматриваемой работы, авторы воспользовались изучением патентного фонда, который является хранилищем важных источников информации [1]. Анализируя названия организаций заявителей и фамилии авторов изобретений, можно выявить организации-лидеры, работающие над совершенствованием соответствующих систем распознавания речи. Обзор изобретений, проведенный авторами, представлен на рис. 1.

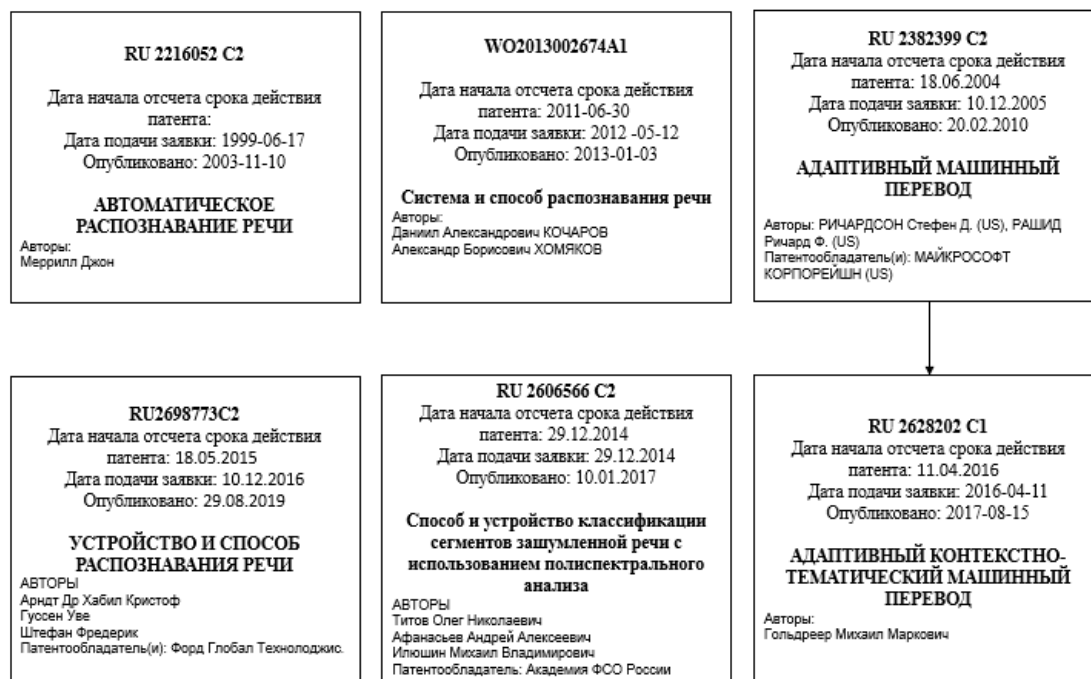


Рис. 1. Обзор патентов систем, предназначенных для распознавания речи

Стоит отметить, что присутствуют системы распознавания речи, применяемые при управлении программными средствами компьютера с помощью произносимых команд (см. рис. 1 – изобретение RU2216052C2). В соответствии с одним из аспектов данного изобретения способ распознавания речи предусматривает обеспечение речевого механизма некоторым словарем наборов команд. Разработаны системы, которые в качестве способа распознавания речи содержат операцию соотнесения речевых единиц с идентификатором (см. рис. 1 – изобретение RU2216052C2) [2].

В работе [3] проведен обзор патентов систем, посвященных разным аспектам распознавания дикторонезависимой слитной речи, систем, повышающих точность машинного перевода, и др. Так, например, изобретение WO2013002674A1 относится к распознаванию речи и обеспечивает распознавание слитной речи в режиме реального времени в сочетании с компактной системой его реализации и высокой точностью, вне зависимости от специфических особенностей разных языковых систем, независимо от особенностей речи диктора [3]. Изобретение RU2382399C2 компании Microsoft, по заявлениям авторов, повышает точность машинного перевода с помощью получения пробного перевода, принятия информации для коррекции, которая конфигурируется так, чтобы провести коррекцию хотя бы одной ошибки в пробном переводе. Конечный этап работы рассматриваемой системы предоставляет информацию для снижения вероятности того, что эта ошибка будет повторяться в последующих предоставляемых системой переводах [4].

Изобретение RU2628202C1 повышает точность перевода с языка пользователя на иностранный язык, используется для повышения его универсализации, для экономии вычислительных мощностей. Автор утверждает, что предлагаемое изобретение упрощает задачу для автоматической системы машинного перевода тем, что пользователь приспосабливается к ее ограниченным возможностям, задавая для перевода не произвольные тексты целиком, а отдельные фразы, каждая из которых представляет законченный мини-контекст для каждого своего слова и входит в группу фраз, соответствующих определенной теме, которая тоже задается в качестве команды [5].

Рассмотрены изобретения, которые обрабатывают речь в условиях зашумления (см. рис. 1 – RU2606566C2), тем самым повышают достоверность классификации сегментов зашумленной речи по типовым классификационным группам [6]. Изобретение RU2698773C2 относится к аппаратной технике, предназначенной для распознавания речи. Согласно работе [6], изобретение обрабатывает звуковые сигналы пользователя, при этом распознаются фонемы пользователя, производятся сохранение фонем во внешнем блоке памяти, предназначенном только для конкретного пользователя и расположенном вне блока обработки, и автоматическое извлечение сохраненных во внешнем блоке памяти фонем при каждом повторном включении устройства, передачи фонем в блок обработки для использования в обработке последующих звуковых сигналов от пользователя [7]. Следует отметить

наличие связи между двумя патентами RU2382399 C2 и RU2628202 C1, данная связь является следствием того, что патент RU2628202 C1 в некоторой степени основывается на патенте RU2382399 C2.

Анализируя информацию по патентам, можно сделать вывод, что система для распознавания слитной речи оперативных работников транспортной области может быть реализована, однако является сложной задачей [8], которая должна решаться системно, с опорой на существующий опыт.

Трансферное обучение

Актуальной является задача использования нейронной сети, обученной, например, на русском языке, для использования распознавания тех же названий станций метрополитена, произнесенных человеком на другом языке.

При распознавании речи на разных языках несовпадение последних, представленных в обучающем и проверочном наборах, конечно же, приводит к возрастанию частоты ошибок. В таком случае следует использовать трансферное обучение, которое рекомендуется для повышения производительности распознавания речи на разных языках [9]. Трансферное обучение (Transfer Learning) – это вид машинного обучения, при котором модель, обученная на одной задаче, повторно используется для другой, связанной с ней.

Целесообразно провести исследование и выбрать тип трансферного обучения для решения задачи идентификации речи диктора при условии, что диктором может быть носитель различных языковых систем. Рассматривались нескольких факторов, два наиболее важных из них – это размер нового набора данных (маленький или большой) и его сходство с исходным набором данных (например, сходство с архитектурой ImageNet с точки зрения содержания изображений и классов, или очень сильное отличие, например, изображения микроскопа). Принимая во внимание, что функции сверточных сетей (СС) являются более общими на ранних уровнях и более специфичными для исходного набора данных на более поздних уровнях, в работе [10] выработано несколько общих практических правил для навигации по 4 основным сценариям (таблица).

Сценарии трансферного обучения

| Новый набор данных | | Сценарий |
|------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Размер (малый/большой) | Схожесть с исходным набором данных | |
| малый | похож | обучение линейного классификатора кодам СС |
| большой | похож | тонкая настройка всей сети |
| средний | сильные отличия | обучение классификатора SVM на основе активаций нижней части сети |
| большой | сильные отличия | обучение СС с нуля или использование предварительно обученной модели |

Рассмотрим сценарии, представленные в таблице:

1 Новый набор данных мал, отличия от исходного набора данных минимальны. В этом случае не рекомендуется настраивать СС из-за проблем с перенасыщением, а так как данные аналогичны исходным данным, то следует ожидать, что функции более высокого уровня в СС также будут иметь отношение к этому набору данных. Следовательно, лучшей идеей может быть обучение линейного классификатора кодам СС.

2 Новый набор данных велик, отличия от исходного набора данных минимальны. Поскольку данных значительно много, можно быть уверенным в том, что не наступит переобучение, если будет выполнена тонкая настройка всей сети.

3 Новый набор данных мал, но сильно отличается от исходного набора данных. Поскольку данных мало, то, вероятно, лучше всего обучать только линейный классификатор. Поскольку набор данных сильно отличается, может быть не лучшим вариантом обучать классификатор из верхней части сети, которая содержит больше функций, специфичных для набора данных. Вместо этого может быть лучше обучить классификатор SVM на основе активаций нижней части сети.

4 Новый набор данных большой и очень отличается от исходного набора данных. Поскольку набор данных очень большой, следует ожидать, что следует обучить СС с нуля.

В работе [8, 11] указано, что при распознавании речи затруднения вызывает распознавание имен собственных, например, наименований станций метрополитена.

Авторами совместно с обучающимися на кафедре «Управление и защита информации» РУТ(МИИТ) из Китая и Узбекистана были проведены исследования трансферного обучения с использованием наборов данных, содержащих названия некоторых станций метрополитенов городов Москва (Россия, на русском и английском языках), Чжэнчжоу (Китай, на китайском, русском и английском языках), Ташкент (Узбекистан, на узбекском, русском и английском языках). Примеры некоторых из исследованных сигналов представлены на рис. 2.

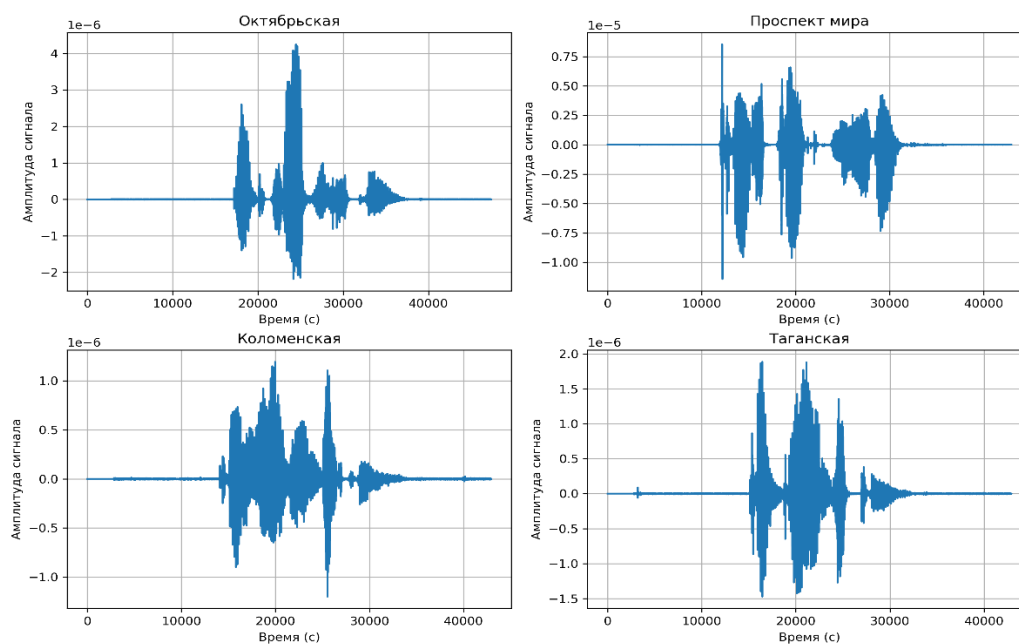


Рис. 2. Примеры аудиосигналов названий станций метрополитена

Для анализа и распознавания полученных данных было разработано программное обеспечение на языке программирования Python в среде Jupyter Notebook. Проведенные исследования показали эффективность применения трансферного обучения для решения поставленных задач.

Постановка задачи и обсуждение результатов

При построении системы распознавания команд диспетчера, представленных в работе [11], необходимо учитывать разнообразие дикторов и влияние внешних шумов на полезный сигнал. При проведении исследования авторами поставлена задача разработки алгоритма многоклассовой классификации названий станций московского метрополитена различными дикторами в условиях ограниченного объема данных.

Этапы решения задачи многоклассовой классификации аудиосигналов включают в себя: сбор и преобразование аудиосигналов, предварительная подготовка аудиозаписей, обучение и использование нейронной сети. Каждый этап стоит из различных научных и инженерных решений, которые требуются для достижения высокой точности классификации аудиосигналов. Рассмотрим каждый этап в отдельности.

Первый этап. Сбор и преобразование аудиозаписей

В рамках первого этапа анализировалась речь 15 дикторов, которые произносили 12 различных наименований станций метрополитена. Всего в обучающем и тестовом наборе использовалось 173 аудиозаписи. Примеры используемых записей представлены на рис. 3. При первичном анализе данных было выявлено наличие шумов и тишины в аудиозаписях у дикторов.

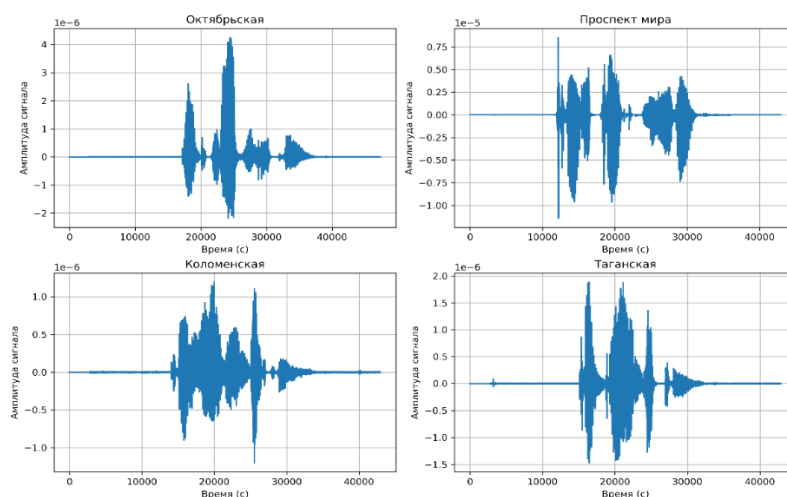


Рис. 3. Примеры аудиосигналов названий станций метрополитена

Второй этап. Предварительная подготовка аудиозаписей

Во втором этапе разработан алгоритм обработки цифрового аудиосигнала и расчета признаков, получаемых из цифрового сигнала. Первоначально для входного сигнала применяется операция «удаления тишины», т. е. зануление сигнала с уровнем менее 30дБ. Данная операция необходима для уменьшения шума в сигнале. После этого производится вычисление мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC), с помощью которых можно из речевого сигнала получить наиболее значимые речевые характеристики [12].

Процесс вычисления MFCC для входного сигнала состоит из следующих операций:

- 1 Вычисление оконного преобразования Фурье с окном Хэмминга шириной 25 мс (L) и шагом 10 мс. Для каждого окна вычисляется амплитудный спектр – $X(k)$.
 - 2 Вычисление амплитудного спектра мощности, нормированный на длину окна – $|X(k)|^2/L$.
 - 3 Формирование банка фильтров на мел-шкале для каждого окна. В исследовании используется разный размер банка фильтров (N): 10, 16, 24, 32, 64, 96.
 - 4 Вычисление для каждого окна произведения квадрата амплитудно-частотной характеристики каждого фильтра и спектра мощности, полученного на втором шаге, с последующим суммированием коэффициентов получившихся спектров и расчетом энергии внутри соответствующей полосы банка фильтров.
 - 5 Вычисление логарифма от значений энергии на предыдущем шаге.
 - 6 Вычисление дискретного косинусного преобразования от логарифмов коэффициентов.
- Результаты вычисления спектра сигнала и MFCC представлены на рис. 4.

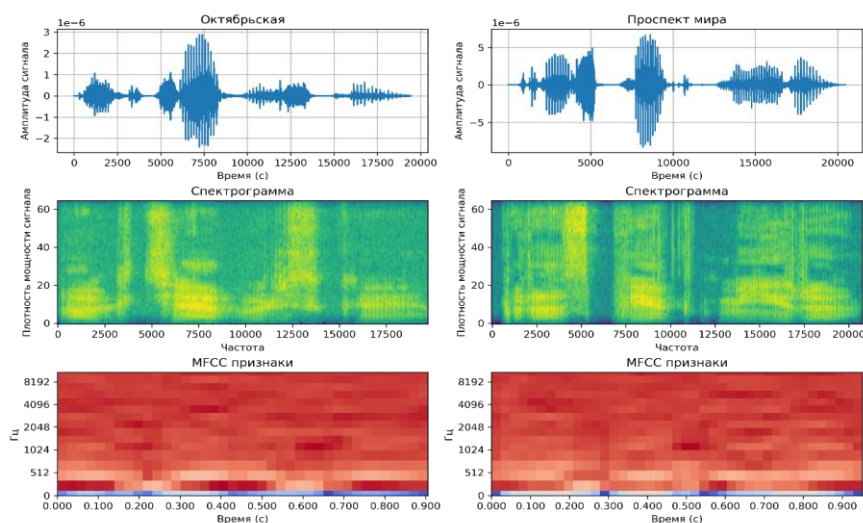


Рис. 4. Примеры спектров и MFCC-коэффициентов для аудиосигналов

В результате вычисления *MFCC* для каждой аудиозаписи формируется матрица размером $N \times M$, где N – количество *MFCC*, а M – количество окон, сформированных в результате оконного преобразования Фурье. Количество окон M для каждой аудиозаписи индивидуальное, поэтому было определен статичный размер окна, который был вычислен, как 0.9 квантиль распределения M по всем аудиозаписям. В исследовании $M = 125$.

Третий этап. Обучение и использование нейронной сети

В рамках третьего этапа была обучена сверточная нейронная сеть. Архитектура нейронной сети в себя включала: четыре сверточных слоя с функцией активации Relu, два слоя Maxpooling, три полносвязанных слоя с функцией активации Relu. Для обучения использовалось 82 940 параметра. В выходном слое было задействовано 12 нейронов и функция активации Softmax. Оптимизация логарифмической функции потерь проводилась с использованием пакетного градиентного спуска. Обучение проходило в течение 500 эпох. Результаты обучения представлены на рис. 5. В качестве метрики использовался критерий точности Accuracy [13].

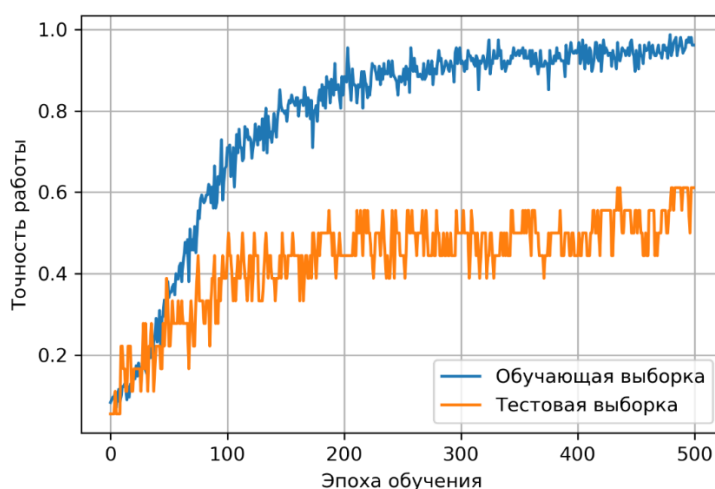


Рис. 5. Результаты обучения на обучающей и тестовой выборках

Кроме этого, был проведен анализ обучения нейронной сети для различного количества *MFCC* (N). Полученные результаты показали, что достаточно 16 или 24 *MFCC* для описания характеристик речевого сигнала.

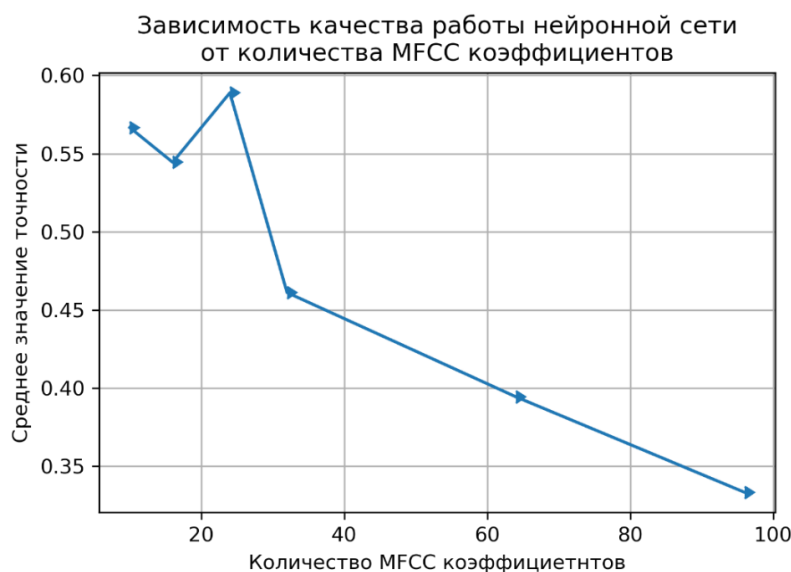


Рис. 6. Анализ обучения нейронной сети для различного количества MFCC

Выводы

Основные результаты статьи:

- представлен обзор патентов систем по распознаванию речи;
- представлены варианты использования трансферного обучения для задачи распознавания речи;
- разработан алгоритм классификации именованных сущностей для станций московского метрополитена;
- проведен анализ результатов обучения нейронной сети для разного количества MFCC;
- выявлено, что для описания речи в рамках поставленной задачи достаточно 16 или 24 MFCC коэффициента.

В качестве перспектив развития представленного исследования планируется: разработка алгоритма поиска ключевых слов и имен собственных в слитной речи; анализ эффективности разработанного алгоритма; разработка алгоритма адаптивного шумоподавления; реализация дикторонезависимых и устойчивых к шумам систем распознавания команд.

Список литературы

1 **Васильев, А. С.** Анализ патентов как фактор исследования технического уровня развития техники на примере щековых дробилок / А. С. Васильев, Н. С. Крупко // Инженерный Вестник Дона. – 2016. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-patentov-kak-faktor-issledovaniya-tehnicheskogo-urovnya-razvitiya-tehniki-na-primere-schekovyh-drobilok> (дата обращения: 27.05.2022).

2 **Патент № 2216052C2 Российская Федерация, МПК G10L 15/22, G10L 15/02(2006.01), G10L 15/26.** Автоматическое распознавание речи / Д. Меррил. – № 2001104348/09 ; заявл. 17.06.1999 ; опубл. 10.11.2003.

3 **Патент № WO2013002674A1 Международное бюро, МПК G10L 15/187 (2013.01), G10L 25/78 (2013.01).** Система и способ распознавания речи / Д. А. Кочаров, А. Б. Хомяков. – Заявл. 12.05.2012 ; опубл. 03.01.2013, Бюл. № 1. – С. 35.

4 **Патент №2382399C2 Российская федерация, МПК G06F 17/28 (2006.01).** Адаптивный машинный перевод / С. Д. Ричардсон, Р. Ф. Рашид. – № 2004118671/09 ; заявл. 18.06.2004 ; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5. – С. 36.

5 **Патент №2628202C1 Российская федерация, МПК G06F 17/28 (2006.01).** Адаптивный контекстно-тематический машинный перевод / М. М. Гольд्रेер. – № 2016113939; заявл. 11.04.2016; опубл. 15.08.2017, Бюл. № 23. – С. 13.

6 **Патент № 2606566C2 Российская федерация, МПК G10L 15/08 (2006.01), G10L 15/00 (2013.01).** Способ и устройство классификации сегментов зашумленной речи с использованием полиспектрального анализа / О. Н. Титов, А. А. Афанасьев, М. В. Илюшин. – № 2014154081 ; заявл. 29.12.2014 ; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 1. – С. 3

References

1 **Vasiliev, A. S.** Analysis of patents as a factor in the study of the technical level of development of technology on the example of jaw crushers / A. S. Vasiliev, N. S. Krupko // Engineering Bulletin of the Don. – 2016. – No. 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-patentov-kak-faktor-issledovaniya-tehnicheskogo-urovnya-razvitiya-tehniki-na-primere-schekovyh-drobilok> (date of access: 05.27.2022).

2 **Patent No. 2216052C2 Russian Federation, IPC G10L 15/22, G10L 15/02(2006.01), G10L 15/26.** Automatic speech recognition / D. Merrill. – No. 2001104348/09 ; declaration 06.17.1999 ; publ. 11.10.2003.

3 **Patent No. WO2013002674A1 International Bureau, IPC G10L 15/187 (2013.01), G10L 25/78 (2013.01).** System and method of speech recognition / D. A. Kocharov, A. B. Khomyakov. – Declaration 12.05.2012 ; publ. 03.01.2013 ; Bull. No. 1. – P. 35.

4 **Patent No. 2382399C2 Russian Federation, IPC G06F 17/28 (2006.01).** Adaptive machine translation / S. D. Richardson, R. F. Rashid. – No. 2004118671/09 ; declaration 06.18.2004 ; publ. 02/20/2010, Bull. No. 5. – P. 36.

5 **Patent No. 2628202 C1 Russian Federation, IPC G06F 17/28 (2006.01).** Adaptive context-thematic machine translation / M. M. Goldreer. – No. 2016113939 ; declaration 04.11.2016 ; publ. 08.15.2017, Bull. No. 23. – P. 13.

6 **Patent No. 2606566C2 Russian Federation, IPC G10L 15/08 (2006.01), G10L 15/00 (2013.01).** Method and device for classifying segments of noisy speech using polyspectral analysis / O. N. Titov, A. A. Afanasiev, M. V. Ilyushin. – No. 2014154081 ; declaration 12.29.2014 ; publ. 07.20.2016, Bull. No. 1. – P. 3.

7 Патент № 2698773C2 Российская федерация, МПК G10L 15/07 (2013.01), G10L 15/22 (2006.01), G10L 15/28 (2013.01). Устройство и способ распознавания речи / К. Арндт Хабил, У. Гуссен, Ф. Штефан. – № 2015118431 ; заявл. 18.05.2015 ; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – С. 2

8 Речевые технологии в обучении оперативного персонала городских рельсовых транспортных систем / Е. П. Балакина, М. А. Кулагин, В. Г. Сидоренко, Л. Н. Логинова // Качество. Инновации. Образование. – 2022. – № 3 (179). – С. 36–48. – DOI 10.31145/1999-513x-2022-3-36-48.

9 **Chu, Chzhn.** Technical description of multilingual and interlingual speech recognition / Chzhn Chu. – URL: <https://www.21ic.com/article/828871.html> (date of access: 07/29/2022).

10 Stanford Vision and Learning Lab. CS231n Convolutional Neural Networks for Visual Recognition. – URL: <https://cs231n.github.io/transfer-learning> (date of access: 07/30/2022).

11 Обеспечение безопасности применения речевых технологий в работе оперативного персонала городских рельсовых транспортных систем / Е. П. Балакина, М. А. Кулагин, Л. Н. Логинова, В. Г. Сидоренко // Проблемы управления безопасностью сложных систем : Материалы XXIX международной научно-практической конференции, Москва, 15 декабря 2021 года. – Москва : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2021. – С. 355–361. – DOI 10.25728/iccsc.2021.94.35.056.

12 **Иванов, И. И.** Анализ метода мел-частотных кепстральных коэффициентов применительно к процедуре голосовой аутентификации // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 10-1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metoda-mel-chastotnyh-kepstralnyh-koeffitsientov-primenitelno-k-protsedure-golosovoy-autentifikatsii> (дата обращения: 06.02.2023).

13 **Mitchell, T.** Machine Learning / T. Mitchell. – Redmond : McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1997. – 432 p. – ISBN 0070428077.

7 Patent No. 2698773C2 Russian Federation, IPC G10L 15/07 (2013.01), G10L 15/22 (2006.01), G10L 15/28 (2013.01). Device and method of speech recognition / K. Arndt Habil, W. Goossen, F. Stefan. – No. 2015118431 ; declaration May 18, 2015 ; publ. 12.10.2016, Bull. No. 34. – P. 2.

8 Speech technologies in training operational personnel of urban rail transport systems / Balakina, E. P., Kulagin, M. A., Sidorenko, V. G., Loginova, L. N. // Quality. Innovation. Education. – 2022. – No. 3 (179). – P. 36–48. – DOI 10.31145/1999-513x-2022-3-36-48.

9 **Chu, Chzhn.** Technical description of multilingual and interlingual speech recognition / Chzhn Chu. – URL: <https://www.21ic.com/article/828871.html> (date of access: 07.29.2022).

10 Stanford Vision and Learning Lab. CS231n Convolutional Neural Networks for Visual Recognition. – URL: <https://cs231n.github.io/transfer-learning> (date of access: 07.30.2022).

11 Security of the use of speech technologies in the work of operational personnel of urban rail transport systems / E. P. Balakina, M. A. Kulagin, L. N. Loginova, V. G. Sidorenko // Problems of managing the safety of complex systems: Proceedings of the XXIX International Scientific and practical conference, Moscow, December 15, 2021. – Moscow : Institute of Management Problems. V. A. Trapeznikova RAN, 2021. – P. 355–361. – DOI 10.25728/iccsc.2021.94.35.056.

12 **Ivanov, I. I.** Analysis of the method of chalk-frequency cepstral coefficients in relation to the procedure of voice authentication // Actual problems of the humanities and natural sciences. – 2015. – No. 10-1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metoda-mel-chastotnyh-kepstralnyh-koeffitsientov-primenitelno-k-protsedure-golosovoy-autentifikatsii> (date of access: 02.06.2023).

13 **Mitchell, T.** Machine Learning / T. Mitchell. – Redmond: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1997. – 432 p. – ISBN 0070428077.

V. G. Sidorenko, E. P. Balakina, L. N. Loginova, M. A. Kulagin

AN APPROACH TO CLASSIFYING PROPER NAMES FOR THE DISPATCHER COMMAND RECOGNITION SYSTEM

Abstract. Currently, the spread and actualization of the use of machine learning systems are opening up new horizons for the use of speech recognition systems in all areas of industry, including railway transport, where particularly high requirements for passenger safety are imposed. The authors conducted a review of current patents of existing speech recognition systems, highlighted possible links between patents. The paper also discusses the possible use of transfer learning to improve the speaker's speech recognition performance. Based on the analysis of the literature, the research goal is formulated as the development of a noise-resistant

and speaker-independent command recognition algorithm. Within the framework of this paper, the solution of the problem of classifying proper names using low-frequency kepsral coefficients and a convolutional neural network is considered. The authors present an analysis of the results of neural network training on a test sample for a different number of low-frequency kepsral coefficients.

Keywords: speech recognition, patent, machine learning, transfer learning, low-frequency kepsral coefficients, error matrix.

For citation: An approach to classifying proper names for the dispatcher command recognition system / V. G. Sidorenko, E. P. Balakina, L. N. Loginova, M. A. Kulagin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 175–183. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_1_175.

Сведения об авторах

Сидоренко Валентина Геннадьевна

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Управление и защита информации»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: valenfalk@mail.ru

Балакина Екатерина Петровна

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Управление и защита информации»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: balakina_e@list.ru

Логина Людмила Николаевна

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Управление и защита информации»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ludmilanv@mail.ru

Кулагин Максим Алексеевич

Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Управление и защита информации»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

Information about the authors

Sidorenko Valentina Gennadievna

Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Control and Information Security»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: valenfalk@mail.ru

Balakina Ekaterina Petrovna

Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Control and Information Security»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: balakina_e@list.ru

Loginova Lyudmila Nikolayevna

Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Control and Information Security»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: ludmilanv@mail.ru

Kulagin Maxim Alekseyevich

Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Control and Information Security»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.21/.8 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_184

*М. В. Окост, А. В. Морозов***ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОСТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОИЗОШЕДШИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Аннотация. Работа посвящена исследованию способов повышения оперативности восстановления мостов в результате произошедших конструктивных деформаций. Исследование выполнено на основе анализа применяемых методических и технических документов, регламентирующих вопросы оперативного восстановления объектов железнодорожного транспорта, а также современных достижений отечественной и зарубежной науки, техники и технологий, связанных со способами оперативного восстановления искусственных сооружений железнодорожного транспорта. С учетом результатов проведенных исследований предложены способы повышения оперативности аварийно-восстановительных работ, учитывающие вопросы организационного характера и конструктивно-технологические особенности современного уровня развития техники, технологий и материалов и сформулированы предложения по совершенствованию существующей практики ведения аварийно-восстановительных работ.

Ключевые слова: искусственные сооружения, конструктивные деформации, воздействия, восстановление, способы, материалы, организация работ, способы повышения оперативности.

Для цитирования: Окост, М. В. Исследование способов повышения оперативности восстановления мостов в результате произошедших конструктивных деформаций / М. В. Окост, А. В. Морозов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 184–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_184.

Введение

Восстановление искусственных сооружений железнодорожного транспорта является видом деятельности, регулирование которого осуществляется адресными нормами нескольких отраслей и институтов права, техническими нормами и методическими документами причастных органов государственной власти, а также локальными актами организаций железнодорожного транспорта.

Существующая документация, регламентирующая вопросы оперативного восстановления разрушенных (деформированных) искусственных сооружений железнодорожного транспорта вследствие наступления чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также разрушений в результате злонамеренных воздействий правонарушителями из хулиганских, экономических или политических целей, целенаправленных диверсий или применения вооруженными силами противостоящего государства боевого оружия нуждается в переработке и совершенствовании с учетом современного уровня развития техники, технологий и материалов. К проблематике рассматриваемой области исследований можно отнести:

- разнообразие внешних воздействий и их последствий на безопасность работы искусственного сооружения;
- высокую трудоемкость и ресурсоемкость работ по оперативному восстановлению движения на участке железнодорожного пути с наличием искусственного сооружения;
- несовершенство административных и технологических связей и цепочек структур на разном уровне, участвующих в оперативном восстановлении искусственных сооружений железнодорожного транспорта;
- необходимость создания и поддержания заранее подготовленной материальной базы и комплекса технических средств, необходимых для оперативного восстановления.

В данной работе выполнен анализ применяемых методических и технических документов, регламентирующих вопросы оперативного восстановления объектов железнодорожного транспорта, ведомственных приказов и документов стандартизации, требований действующих или разрабатываемых

в Российской Федерации технических регламентов, а также действующих в ОАО «РЖД» нормативных документов – инструкций, положений, методических рекомендаций и пр.

Для поиска современных достижений отечественной и зарубежной науки, техники и технологий, связанных со способами оперативного восстановления искусственных сооружений железнодорожного транспорта, выполнен анализ результатов научных исследований отечественных и зарубежных ученых, учитывающих современные теоретические и практические достижения в области оперативного восстановления искусственных сооружений железнодорожного транспорта.

С учетом результатов проведенных исследований предложены способы повышения оперативности аварийно-восстановительных работ, учитывающие вопросы организационного характера, конструктивно-технологические особенности и современный уровень развития техники, технологий и материалов и сформулированы предложения по совершенствованию существующей практики ведения аварийно-восстановительных работ на железных дорогах Российской Федерации.

Правовая и нормативно-техническая документация

Федеральный орган исполнительной власти в области предотвращения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и ликвидации последствий стихийных бедствий, органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации и органы местного самоуправления в соответствии с законодательством Российской Федерации, регулирующим защиту населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, оказывают владельцам инфраструктур и перевозчикам помощь в ликвидации последствий таких ситуаций. Федеральный орган исполнительной власти в области железнодорожного транспорта, владельцы инфраструктур и перевозчики входят в единую государственную систему предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (РСЧС).

В Федеральном законе от 21.12.1994 № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» описаны функции и структура РСЧС. Такая система объединяет органы управления, силы и средства федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, организаций, в полномочия которых входит решение вопросов по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Система функционирует на федеральном, межрегиональном, региональном, муниципальном и объектовом уровнях, а основными задачами являются обеспечение готовности к действиям органов управления, сил и средств, предназначенных и выделяемых для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, и создание резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций. В военное время необходимо привлечение дополнительных людских ресурсов на восстановление объектов инфраструктуры, в том числе и при соблюдении международных соглашений – дополнительное привлечение войсковых подразделений стран партнеров.

Министерство транспорта Российской Федерации, как и Федеральное агентство железнодорожного транспорта, входит в перечень сил постоянной готовности, что означает необходимость обеспечивать в первоочередном порядке по заявкам Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий доставку к зоне чрезвычайной ситуации и возвращение обратно сил, средств и специальных грузов, необходимых для предупреждения и ликвидации чрезвычайной ситуации. Вместе с этим в РСЧС за ведомством закреплён функционал по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте. Координация деятельности осуществляется на всех уровнях: федеральном, межрегиональном, региональном и муниципальном.

Федеральное агентство железнодорожного транспорта является федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по обеспечению транспортной безопасности: реализация комплекса мер, направленных на обеспечение защищенности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств от актов незаконного вмешательства. Агентство выполняет в том числе категорирование объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ) и ведет реестр данных объектов, а также утверждает результаты оценки их уязвимости и планы обеспечения транспортной безопасности.

В перечень мероприятий по ликвидации чрезвычайных ситуаций входит восстановление по временной схеме объектов коммунальной и инженерной инфраструктуры (при условии, что проводятся минимально необходимые работы, в результате которых объекты восстанавливают утраченную

способность к функционированию, что указанные работы осуществляются до отмены режима чрезвычайной ситуации и не потребуются изменения технических характеристик конструктивных элементов объектов после отмены режима чрезвычайной ситуации).

Владелец железнодорожной инфраструктуры и перевозчик принимают незамедлительные меры по ликвидации последствий транспортных происшествий, стихийных бедствий (заносов, наводнений, пожаров и других), вызывающих нарушение работы железнодорожного транспорта, а также должны содержать специализированные подразделения по ликвидации чрезвычайных ситуаций, иметь запас материальных и технических средств. Аварийно-восстановительные пункты, установленные владельцем инфраструктуры, должны быть в постоянной готовности.

Документы стандартизации и ведомственные распоряжения

Анализ источников показал, что достаточно широко представлены документы, регламентирующие вопросы проектирования, строительства и технического обслуживания искусственных сооружений. Например, СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» (Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*) содержит нормы по проектированию новых, реконструируемых и подвергаемых капитальному ремонту мостовых сооружений и труб под насыпями. СП 46.13330.2012 «Мосты и трубы» (актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91) содержит правила, которые необходимо соблюдать при выполнении и приемке работ при сооружении новых, реконструкции и капитальном ремонте существующих постоянных мостов (в том числе путепроводов, виадуков, транспортных эстакад, пешеходных мостов) и труб под насыпями железных дорог, линиями метрополитена и трамвая, автомобильными дорогами (включая внутрихозяйственные дороги сельскохозяйственных предприятий и организаций и дороги промышленных предприятий), на улицах и дорогах городов, поселков и сельских населенных пунктов, если иные не предусмотрены проектом. СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автодорожные» (актуализированная редакция СНиП 32-04-97) содержит правила принятия инженерных решений при проектировании новых и реконструируемых автодорожных и железнодорожных тоннелей, в том числе устройств и систем, обеспечивающих их эксплуатацию, строительство и ввод в эксплуатацию. Требования обеспечения комплексной безопасности базируются на рассмотрении тоннельных переходов как транспортных природно-технических систем.

Также широко рассмотрены вопросы обследования железнодорожных мостов и тоннелей. СП 79.13330.2012 «Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний» и ГОСТ Р 57208-2016 «Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации» содержат, помимо требований к работам по оценке технического состояния сооружений, описание способов восстановления эксплуатационных характеристик тоннельных сооружений.

Анализ источников зарубежной нормативно-технической документации показал, что зарубежная нормативная документация в полной мере регламентирует вопросы проектирования, строительства и технического обслуживания объектов транспортной инфраструктуры. Так, для проектирования зданий и строительных изделий Европейским комитетом по стандартизации (CEN) разработаны Еврокоды – набор европейских норм (EN). Еврокоды используются такими членами CEN, как Австрия, Бельгия, Кипр, Чешская Республика, Дания, Эстония, Финляндия, Франция, Германия, Греция, Венгрия, Исландия, Ирландия, Италия, Латвия, Литва, Люксембург, Мальта, Финляндия, Франция, Германия, Греция, Нидерланды, Норвегия, Польша, Португалия, Словакия, Словения, Испания, Швеция, Швейцария и Великобритания.

Необходимо отметить, что зарубежная нормативная документация регламентирует не только общие правила проектирования конструкций и их строительства, но и порядок выполнения этих работ. Кроме того, объекты строительства разделяются на капитальные (постоянные) и временные, для которых в равной мере предъявляются принципы и требования к структурной безопасности, работоспособности и долговечности. Для временных конструкций разработаны дополнительные рекомендации к основным Еврокодам. В целом они содержат упрощенные подходы к проектированию, конструкциям, строительству и эксплуатации.

При рассмотрении зарубежной нормативной документации отсутствовали требования к временным показателям и темпам строительства инженерных сооружений. Несколько детальнее описаны методики оперативного восстановления инженерных сооружений и строительства новых для организации и обеспечения транспортного потока в военных стандартах. Так, стандарт FM 3-34.343 (FM5-446) Military Nonstandard Fixed Bridging (Военные нестандартные постоянные мосты) содержит конкретные руководящие инструкции, содержащие техническую информацию о нестандартных стацио-

нарных мостах для инженерно-технических работников и офицеров штаба. В документе приведена система классификации мостов и транспортных средств, подробные технические данные по классификации и проектированию мостов. Вместе с этим содержатся методики оперативного восстановления инженерных сооружений с расчетом нагрузок и воздействий исходя из степени повреждения. Положения данного документа учитывают международные соглашения по стандартизации (STANAGs) и четырехстороннего STANAG (QSTAG), тактические доктрины и оперативные процедуры сухопутных войск. Общим документом по основным инженерным вопросам (FM 3-34), методам, материалам, технике и организации инженерных работ является FM 3-34.400 GENERAL ENGINEERING. В данных документах особое внимание обращается на высокую скорость появления и внедрения новых материалов и технологий, что требует постоянной актуализации соответствующих доктрин.

Внутренние распоряжения ОАО «РЖД» охватывают ряд вопросов, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом мостов, тоннелей и других искусственных сооружений. Так, распоряжение ОАО «РЖД» от 02.10.2020 № 2193/р «Об утверждении Инструкции по содержанию искусственных сооружений» включает разделы, связанные с текущим содержанием и капитальными видами ремонта; порядок контроля технического состояния искусственных сооружений; организацию текущего содержания искусственных сооружений; капитальные виды ремонта искусственных сооружений; конструктивные элементы искусственных сооружений и порядок их содержания. В распоряжении ОАО «РЖД» от 30.12.2010 № 2795р «О введении в действие Указаний о классификации работ по восстановлению инженерных сооружений ОАО «РЖД» определены понятия текущего содержания и текущего ремонта инженерных сооружений, капитального ремонта инженерных сооружений и реконструкции инженерных сооружений. Установлены основные технические и эксплуатационные характеристики инженерных сооружений, подлежащие анализу для классификации работ по восстановлению инженерных сооружений, а также приведена классификация основных видов работ по капитальному ремонту и реконструкции искусственных сооружений.

Распоряжение ОАО «РЖД» от 13 апреля 2016 г. № 649р об утверждении Технологических правил ремонта каменных, бетонных и железобетонных конструкций железнодорожных мостов включает разделы по материалам для ремонта искусственных сооружений; содержит требования по ремонту защитных слоев, ремонту и защите конструкций с трещинами, а также ремонту массивных опор. Также в документе приведены требования по ремонту водопропускных труб. Правила включают раздел по приспособлениям и устройствам для безопасного ведения работ.

Вопросы организации аварийно-восстановительных работ на железных дорогах ОАО «Российские железные дороги» приведены в инструктивных указаниях по организации аварийно-восстановительных работ на железных дорогах ОАО «Российские железные дороги», утвержденных и введенных в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2011 № 2792р. В документе установлены единые требования по оповещению причастных лиц, вызову, отправлению и продвижению восстановительных поездов к месту железнодорожного транспортного происшествия, порядку ведения работ по ликвидации его последствий, в том числе при аварийных ситуациях с опасными грузами в части схода подвижного состава с рельсов, разрушения элементов инфраструктуры, нарушения габарита. Однако следует отметить, что поименованные инструктивные указания описывают организацию аварийно-восстановительных работ в случае схода подвижного состава с рельсов, но не разрушения мостовых переходов и тоннелей.

Вопросы, связанные с работой железнодорожной отрасли в РСЧС, освещены в Положении о порядке функционирования органов управления, сил и средств ОАО «РЖД» в Единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 08.06.2018 № 1217р с целью предупреждения возникновения и развития чрезвычайных ситуаций; снижения размеров ущерба и потерь от чрезвычайных ситуаций; ликвидации чрезвычайных ситуаций; разграничения полномочий в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций между Центральной комиссией ОАО «РЖД» по предупреждению транспортных происшествий и чрезвычайных ситуаций, региональными, территориальными и объектовыми комиссиями по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций; организации эффективного взаимодействия органов управления и сил ОАО «РЖД» с органами управления и силами Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Определен порядок функционирования органов управления, сил и средств ОАО «РЖД» в Единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, описаны координационные органы управления на различных уровнях. Определены задачи и функции комиссий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, а также обозначены мероприятия, проводимые органами управления, силами и средствами ОАО

«РЖД» в режиме повседневной деятельности, в режиме повышенной готовности и в режиме чрезвычайной ситуации.

Регламент процесса действий работников ОАО «РЖД» при прогнозировании опасных гидрометеорологических явлений, а также при землетрясении, утвержденный Распоряжением ОАО «РЖД» от 09.08.2022 г. №2046р определяет порядок разработки и распространения штормовых предупреждений об опасных гидрометеорологических явлениях, информирования о землетрясениях, влияющих на функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования и перевозочный процесс, а также порядок действий причастных работников подразделений и филиалов ОАО «РЖД» при их получении и подтверждении. Регламент предназначен для оперативного реагирования на опасные гидрометеорологические явления и принятия решений руководителями причастных департаментов и филиалов ОАО «РЖД», направленных на предупреждение их последствий. В регламенте, в т.ч. определены виды опасных гидрометеорологических явлений, угрожающих безопасности движения поездов, и описаны мероприятия и их исполнители согласно видам работ по причастным хозяйствам функциональных филиалов. Например, при штормовом предупреждении «Продолжительные умеренные дожди» Дирекция инфраструктуры и Дирекция по энергообеспечению в лице ДИЗТЕР-ДИТЕР, ШЧ, ПЧ, ПЧИССО, ВЧДЭ, ИЧ, НТЭ, ЭЧ необходимо проверить готовность противоразмывных поездов, организовать обходы и объезды в локомотивах поездов, внеплановые осмотры водоотводных и водопропускных сооружений, особо опасных мест к пропуску ледохода и паводка для выявления возможных разрушений инженерных сооружений железнодорожного пути, выплесков на путях и оползней, предотвращение возможных размывов пути, перенасыщения водой земляного полотна, осмотры возможных мест затопления напольного оборудования устройств сигнализации, централизации и блокировки. При необходимости установить круглосуточные посты наблюдения в местах земляного полотна, состоящих на учете в ПУ-9.

С целью актуализации нормативных документов, исполнения постановлений Правительства Российской Федерации, а также распоряжений ОАО «РЖД», в границах территориальных филиалов – железных дорог ОАО «РЖД» выпускаются распоряжения и приказы, учитывающие специфику применительно к работе железной дороги и ее структурных подразделений, дирекций и их филиалов.

Приказом начальника железной дороги устанавливается Порядок оповещения при возникновении аварийных и чрезвычайных ситуаций, транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, разрабатываемый с целью принятия оперативных мер по ликвидации последствий аварийных и чрезвычайных ситуаций, вызванных стихийными бедствиями, террористическими актами и другими противоправными действиями неустановленных лиц, транспортными происшествиями и иными, связанными с нарушением правил безопасности и эксплуатации железнодорожного транспорта событиями, служебного расследования их причин и обстоятельств, в том числе порядок оповещения руководителей железной дороги, а также органов государственной власти и владельцев подвижного состава (в строгом соответствии с приказом Минтранса России от 18 декабря 2014 г. №344 «Об утверждении Положения о классификации, порядке расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта» с изменениями и дополнениями от 29 июля 2016 г., от 01 июня 2018 г. и от 19 июля 2022 г.

Кроме того, помимо распоряжений и приказов, подготавливаемых территориальными филиалами – железными дорогами, региональные дирекции также актуализируют нормативно-техническую документацию в соответствии со спецификой работы самого структурного подразделения.

В открытом доступе на сайте Российской государственной библиотеки (<https://www.rsl.ru/>) имеется ряд книг и инструкций, затрагивающих вопросы проектирования и строительства капитальных и временных мостов и труб. Например, Справочник офицера-мостовика железнодорожных войск (Ленинград: 1963) содержит указания по статическому и гидравлическому расчету железнодорожных мостов, труб и их конструированию, данные о конструкциях капитальных и временных железнодорожных мостов, и труб, организацию и способы производства работ по постройке искусственных сооружений, информацию о машинах, оборудовании и транспортных средствах для постройки искусственных сооружений, а также данные по строительным материалам. ПВКМ-79 «Инструкция по проектированию железнодорожных временных и краткосрочных мостов и труб» (Москва: Всесоюз. научно-исследовательский ин-т транспортного строительства, 1982) содержит правила проектирования временных и краткосрочных мостов на тыловых и фронтовых дорогах, включая требования к конструкции, габарит, указания по расчету, требования к материалам изготовления несущих конструкций и обустройств, а также требования к основаниям и фундаментам.

В книге «Руководство для старших рабочих по ремонту и содержанию железнодорожного пути» (А.В. Малютин, Москва: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 2-е переработанное и дополненное издание, 1943) даются сведения не только по ремонту и содержанию в исправном состоянии железнодорожного пути, но и рассмотрены вопросы восстановления железнодорожной инфраструктуры. В зависимости от характера разрушений и необходимого срока восстановления движения рассматриваются краткосрочный, временный и капитальный вариант восстановления с последующим доведением пути до нормального состояния. Руководство по военным низководным мостам (Москва: Военное издательство Минобороны СССР, 1965) содержит указания по строительству низководных и подводных мостов и путепроводов на жестких опорах, возводимых из местных материалов. Кроме того, рассмотрены вопросы рекогносцировки, проектирования, изготовления и транспортировки конструкций, строительства.

Монография А. А. Сергеева «Методика определения численности и технического оснащения воинских формирований Железнодорожных войск при возникновении чрезвычайных ситуаций на объектах железнодорожного транспорта» (2018 год) относится к работам прикладного характера. Данная монография содержит предложения по методике расчета потребности в ресурсах (численности, техническом оснащении) формирований Железнодорожных войск, необходимых для ликвидации последствий разрушений, а также организации выполнения восстановительных работ на объектах железнодорожной инфраструктуры в условиях ЧС. Предлагаемая методика разработана с учетом современных представлений о природе и анализа статистики возникновения ЧС, а также практики ликвидации последствий. Вместе с этим в работе проведены оригинальные теоретические подходы к моделированию частоты ЧС и масштабов возникающих при этом разрушений. Представленные предложения могут найти практическую реализацию в органах управления МТО МО РФ, в частности при разработке регламента привлечения соединений (частей) Железнодорожных войск в рамках функциональной подсистемы предупреждения и ликвидации ЧС Вооруженных сил РФ «Единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС» для восстановления железных дорог, разрушенных в результате стихийных бедствий и иных ЧС природного и техногенного характера.

Вопросам восстановления железнодорожных мостов по временной схеме посвящена следующая литература: Восстановление искусственных сооружений. М.: МИИТ, 1965. 288 с.; Руководство для железнодорожных войск. Восстановление железнодорожных мостов и труб. (ВМ 67). М.: Воениздат, 1969. 560 с.; Лопай С. Д. Восстановление железнодорожного пути и сооружений М., 1973. 328 с.; Восстановление мостов. Л.: ЛВКУ ЖДВ и ВОСО, 1976. 218 с.; Восстановление ИССО на железных дорогах. Машины и механизмы дня восстановления мостов. М.: Воениздат, 1977. 296 с.

Следует отметить, что большинство указанных документов были изданы сорок и более лет назад и не могут отражать вопросы современного уровня развития техники, материалов и технологий. Кроме того, эти документы не содержат информации о взаимодействии структур железнодорожной отрасли в Единой системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий выпустило ряд документов, касающихся вопросов ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Так, «Методические рекомендации по разработке положения об организации и ведении гражданской обороны в Федеральных органах исполнительной власти», утвержденные МЧС России 19.03.2021 г. № 2-4-71-5-11, содержат информацию об организации и ведении гражданской обороны для использования должностными лицами федеральных органов исполнительной власти. Или, например, «Методические рекомендации по созданию, хранению, использованию и восполнению резервов материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», утвержденные МЧС России 19.03.2021 г. № 2-4-71-2-11, содержат научно обоснованные принципы создания, хранения, использования и восполнения резервов материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также порядок отчетности об их состоянии. Согласно данным методическим рекомендациям, резервы материальных ресурсов создаются организациями для ликвидации чрезвычайных ситуаций локального характера. Порядок создания резервов материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций определяется приказом руководителя организации.

При анализе ведомственных приказов и прочих технических и технологических регламентов установлен ряд документов, выпущенных органами государственной власти и касающихся вопросов восстановления инженерных сооружений не в области железнодорожного транспорта. Вместе с этим такие документы могут быть полезны при разработке строительных правил или ведомственных нормативных документов по оперативному восстановлению деформаций и повреждений искусственных

сооружений, возникших при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера, а также вследствие военных конфликтов. Например, рекомендации «Основные направления и вопросы организационно-технической подготовки проектных и строительных организаций к ведению аварийно-восстановительных работ», введенные в действие приказом Москомархитектуры от 08.12.2003 г. № 193 содержат основные предпосылки и этапы проведения аварийно-восстановительных работ в чрезвычайных ситуациях, требования к заблаговременной подготовке объектов к проведению аварийно-восстановительных работ, организацию и основные задачи городских формирований при проведении аварийно-восстановительных работ, организацию предпроектных и проектных работ, а также особенности материально-технического обеспечения формирований служб ГО и объектов при подготовке и проведении аварийно-восстановительных работ.

Существующий порядок организации оперативного восстановления деформированных искусственных сооружений

Существующий порядок организации оперативного восстановления деформированных искусственных сооружений частично определен в нормативно-технических документах, упомянутых в начале статьи, при работе филиалов, дочерних и зависимых обществ и их структурных подразделений ОАО «РЖД» в структуре единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. В результате опроса (интервьюирования) работников структурных подразделений ОАО «РЖД», каким-либо образом задействованных при восстановлении разрушенных искусственных сооружений, а также специалистов проектно-изыскательских институтов и строительных компаний, оперативное восстановление деформированных искусственных сооружений выполняется, как правило, в следующем порядке (приведен укрупненно):

- 1 Оповещение о наступлении ЧС (о проявившейся деформации).
- 2 Формирование оперативного штаба устранения последствий. Взаимодействие членов оперативного штаба (межведомственное, межотраслевое).
- 3 Оценка разрушения (причина, характер разрушения, объемы восстановления).
- 4 Принятие решений с учетом оперативной обстановки:
 - потребности (материалы, конструкции, машины и механизмы);
 - существующие возможности (складское хозяйство, аварийно-восстановительный запас, резерв, пути подвоза конструкций и материалов, наличие машин и людей и пр.).
- 5 Выполнение работ (временное восстановление) в соответствии с оперативно разработанным проектом производства работ.
- 6 Открытие движения в кратчайшие сроки.
- 7 Капитальное восстановление в плановом порядке.

Порядок оповещения причастных работников и служб реагирования при наступлении чрезвычайной ситуации природного или техногенного характера на различных уровнях управления (старший диспетчерский аппарат, региональные центры управления содержанием инфраструктуры, линейные предприятия) приведен на рис. 1–3.



Рис. 1. Схема оповещения причастных при получении сигнала о возникновении ЧС сменным заместителем начальника оперативно-распорядительного отдела службы перевозок



Рис. 2. Схема оповещения причастных при получении сигнала о возникновении ЧС на уровне регионального Центра управления содержанием инфраструктуры



Рис. 3. Схема оповещения причастных при получении сигнала о возникновении ЧС на уровне линейного предприятия (дистанция инженерных сооружений)

На основании анализа объемов восстановительных работ, а также с учетом оперативной обстановки (наличие и объемы аварийно-восстановительного запаса, пути подвоза материалов и техники, погодноклиматические факторы и пр.) принимается решение о конструктивных особенностях и технологии ведения работ по оперативному восстановлению разрушенного сооружения. Как правило, открытие движения в кратчайшие сроки организуется по временной схеме. При этом, ограничивается скорость движения, снижается пропускная способность объекта и допускаемая поездная нагрузка.

Работы по капитальному восстановлению объекта (строительству нового сооружения) организуются на последующих этапах в плановом порядке.

Следует отметить, что план аварийно-восстановительных работ будет подготовлен на основе нескольких критериев, к которым можно отнести:

- срок восстановления (открытие движения по временной схеме и далее с учетом приведения сооружения в проектное положение по расчетной нагрузке и провозной способности);
- расчетная нагрузка на сооружение;
- затраты.

Открытие движения в кратчайшие сроки будет проведено по временной схеме, организация которой будет сопровождаться строительством краткосрочных сооружений, ограничивающих как нагрузку, так и скорость движения. Приведение сооружения в проектное положение по расчетной нагрузке и провозной способности будет проведено вне рамок работы временной схемы по отдельно разработанным проектам. При этом срок его реализации будет зависеть от имеющихся возможностей: изученность территории, материально-техническое обеспечение, логистика транспорта техники и материалов и ряд других факторов.

В качестве расчетной принимается временная нагрузка «В» при строительстве краткосрочных сооружений со скоростью движения не более 15 км/ч и для временных сооружений со скоростью движения до 80 км/ч, что будет определять план аварийно-восстановительных работ. Однако в некоторых случаях для открытия движения по временной схеме, например, через «сухие» водотоки либо при незначительном напоре воды, вообще отсутствует необходимость строительства мостовых переходов, а реализация мероприятий ограничивается укладкой и обсыпкой водопропускных труб расчетного диаметра. Поэтому такие условия производства работ будут учитывать сразу два критерия: и быстрый срок реализации и расчетную нагрузку.

Исходя из вышеуказанного, оценка эффективности плана организационных и технических решений по восстановлению ИССО в первую очередь будет зависеть от срока восстановления движения.

Анализ опубликованных отечественных и зарубежных результатов исследований

Выполненный анализ отечественного и зарубежного опыта восстановления искусственных сооружений позволил сформулировать следующие выводы относительно способов повышения оперативности восстановления разрушенных искусственных сооружений. Основная часть работ, приведенная в библиографическом списке, посвящена восстановлению мостовых сооружений. Вопросы оперативного восстановления тоннелей практически не рассматриваются. К таким выводам можно отнести следующее:

Автоматизация

- повышение автоматизации процессов проектирования восстановительных и ремонтных работ позволяет повысить оперативность восстановительных мероприятий;
- автоматизация отдельных расчетов элементов инфраструктуры или процесса проектирования в целом позволяет значительно сократить сроки восстановления при разрушении объектов инфраструктуры железных дорог;
- автоматизация ведения документооборота позволяет повысить оперативность восстановительных мероприятий;
- разработки и применение автоматизированных систем проектирования и систем помощи принятия решений – еще один из способов сокращения сроков открытия движения после восстановления.

Организация работ

- заблаговременная подготовка путей подхода к искусственным сооружениям для доставки материалов и проезда строительной техники;
- заблаговременное создание площадок и баз хранения строительных материалов, конструкций и специальной строительной техники. Правильная организация строительства подъездов, монтажных площадок и мест хранения материальных ресурсов и техники позволит сократить время на восстановление искусственных сооружений;
- заблаговременная оценка объемов необходимых ресурсов, численности и технического оснащения при восстановлении разрушенных сооружений для различных регионов страны;
- заблаговременная разработка вариантов проектных решений по восстановлению разрушенных сооружений;
- заблаговременная подготовка проектных решений под различные варианты разрушений. Первоочередность проработки таких решений определяется вероятностной оценкой по вариантам разрушений и видам объектов;
- проработка вопросов, связанных с заблаговременной подготовкой к восстановлению искусственных сооружений, имеет высокую актуальность и при правильном подходе позволяет значительно сократить срок восстановления разрушенных сооружений;
- повышение оперативности восстановления за счет использования более эффективных и производительных геофизических методов и заблаговременного получения информации о геологическом строении и свойствах подстилающих грунтов. Получение информации из архивных данных, сформированных при проектировании разрушенного сооружения и ее актуализация при отсутствии

архивов. Выполнение инженерно-геологических изысканий до разрушения моста, когда нет необходимости проведения оперативных мероприятий. Формирование базы данных изыскательской информации по важным объектам;

- развитие ресурсных материально-технических баз совместными усилиями владельцев инфраструктуры железнодорожного транспорта и соответствующими организациями Министерства обороны, а также рациональное планирование номенклатуры и мест размещения складов аварийно-восстановительного запаса;

- разделение специализированных бригад (рот) по специализации выполняемых работ;

- поддержание высокого уровня компетенций изыскателей и проектировщиков, используемых высокопроизводительных инструментов и средств автоматической обработки позволит повысить оперативность подготовки проекта восстановления и, следовательно, проведения аварийно-восстановительных работ. Следует рассмотреть целесообразность заблаговременной подготовки нескольких вариантов проектов для особо важных объектов (по существующей оси, на обходе), которые можно использовать в готовом виде или при незначительных изменениях.

Конструкции

- использование наплавных железнодорожных мостов сокращает время восстановления движения, но может рассматриваться как временная мера. Подобные способы временного и краткосрочного оперативного восстановления решают проблему начала пропуска поездов после разрушения, однако ввиду малого срока службы конструкций потребуют в дальнейшем выполнения капитального восстановления сооружения и, как следствие, дополнительных материальных затрат;

- применение деревянных облегченных конструкций позволит сократить время на восстановление разрушенного моста за счет уменьшения трудоемкости транспортировки и монтажа, однако такие конструкции следует рассматривать как решение для краткосрочного и временного восстановления малых железнодорожных мостов. Использование заранее заготовленных облегченных конструкций фундаментов поверхностного опирания (ФПО) из деревобетона позволит повысить оперативность восстановления временных и краткосрочных мостов;

- применение композитных материалов в конструкциях мостов, используемых в большей степени при изготовлении пролетных строений. По сравнению с металлическими конструкциями они имеют значительно меньшую массу, что, во-первых, облегчает транспортировку и монтаж, а во-вторых, снижает нагрузку на фундамент и основание. При этом современные композиты имеют прочность, сопоставимую с некоторыми марками стали и могут обеспечить пропуск поездов с заданными нагрузками;

- применение в качестве материала изготовления пролетных строений алюминиевых сплавов.

Технологии

- при массовом характере разрушений мостов целесообразно при расчистке завалов сохранять уцелевшие элементы конструкций для их повторного использования;

- развитие теории, позволяющей укрупненно оценить объемы работ и их трудоемкость не только в военное, но и в мирное время, является актуальным направлением и требует особого внимания, поскольку позволяет более качественно планировать работы по оперативному восстановлению, особенно в условиях масштабных разрушений;

- предварительное получение информации о разрушении объектов железнодорожной инфраструктуры с использованием БПЛА. Такой подход позволит оценить предварительный объем разрушений, в том числе труднодоступных элементов, например, промежуточных опор мостов через водные преграды, наметить проведение необходимых изыскательских мероприятий и обследований, оценить возможные подходы к объекту и спланировать оптимальный маршрут перемещения техники и материалов. Применение БПЛА с учетом современного развития технических и программных средств позволит с достаточно высокой точностью выполнять некоторые виды обследований объекта дистанционно, когда доступ к объекту ограничен или несет опасность для персонала. Так, применение БПЛА позволит при использовании метода фотограмметрии с высокой точностью оценить объемы земляных работ и необходимость в других материалах;

- использование путеукладчика УК-25/9-18 для монтажа некоторых конструкций малых и средних мостов;

- необходим пересмотр документов или разработка новых, учитывающих современные требования к провозной способности железных дорог. При этом документы должны регламентировать

восстановление мостов не только в военное, но и в мирное время на длительный срок эксплуатации после их оперативного восстановления;

- большая часть работ зарубежных авторов посвящена исследованию воздействий на важные объекты инфраструктуры и оценки рисков их повреждения;
- при оценке рисков необходим комплексный подход, сочетающий взаимный анализ различного рода воздействий на сооружения.

Анализ и обобщение информации, полученной в процессе проведения патентных исследований в соответствии с поставленными в работе задачами, показывают, что технологии и способы оперативного строительства и восстановления объектов транспортной инфраструктуры направлены прежде всего:

- на разработку «эффективных» конструкций инженерных объектов, обладающих повышенными прочностными и иными характеристиками за счет применения новых материалов и элементов;
- внедрение специальных элементов в основание, опоры и пролеты для предотвращения неравномерности осадки, повышения устойчивости и грузоподъемности;
- разработку конструкций, направленных на повышение эксплуатационной надежности, долговечности и расширение функциональных возможностей объектов инженерной инфраструктуры за счет обеспечения защиты от размыва, предотвращения деформаций, повышения прочности отдельных элементов креплений и других ключевых элементов конструкции инженерного объекта;
- сокращение времени развертывания мостовых конструкций при возникновении чрезвычайных ситуаций;
- оперативное восстановление движения;
- минимизацию материально-технических ресурсов без ухудшения эксплуатационных характеристик восстанавливаемых инженерных объектов;
- автоматизацию и оптимизацию процессов оперативного восстановления инженерных объектов.

В ходе анализа патентной информации по временным конструкциям инженерных сооружений установлено большое разнообразие конструктивных решений, которые позволяют решать широкий спектр оперативно-восстановительных задач. Вместе с этим часть конструктивных решений подходит только для временного размещения, а часть и для долгосрочной эксплуатации после восстановления и снятия режима ЧС. Последнее достигается за счет применения заранее заготовленных конструкций, облегченных конструкций из композитных материалов без потери прочности, простых контейнерных конструкций, пролетных строений из комбинированных сплавов.

Существующие технологии и способы оперативного восстановления инженерных сооружений готовы к практическому использованию, что подтверждается значительной изобретательской активностью по направлениям как разработки различных «эффективных» конструкций и механизмов, так и в развитии направлений по совершенствованию технологий и способов, сокращающих время возведения инженерных сооружений.

Факторы, влияющие на оперативность аварийно-восстановительных работ

Анализ внешней среды и внутренних преобразование и изменений служит инструментом, при помощи которого можно прогнозировать потенциальные угрозы и вновь открывающиеся возможности. Такой анализ позволяет своевременно спрогнозировать проявление угроз и возможностей, разработать ситуационные планы на случай возникновения непредвиденных обстоятельств, спланировать действия, которые позволят причастным организациям достигнуть целей повышения оперативности восстановления искусственных сооружений.

В табл. 1 приведены основные возможности и их значимость в рассматриваемой области. Внешняя и внутренняя среда в виде отдельных факторов или их совокупности может в значительной степени повлиять на повышение оперативности восстановления искусственных сооружений. Рассмотренные факторы объединены по следующим основным группам: нормативные, организационные, научно-технические, технологические и др.

Для разработки матрицы угроз (табл. 2) определены основные факторы, вероятность их появления и степень влияния на повышение оперативности восстановления искусственных сооружений.

Таблица 1

«Матрица возможностей» повышения оперативности восстановления искусственных сооружений

| Матрица возможностей | Сильное влияние | Умеренное влияние | Малое влияние |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Высокая вероятность | <ol style="list-style-type: none"> 1. Совершенствование государственной научно-технологической политики. 2. Развитие передовых технологий. 3. Использование высокопроизводительной техники. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Повышение автоматизации процессов отдельных расчетов элементов инфраструктуры или процесса проектирования в целом, восстановительных и ремонтных работ. 2. Развитие информационных технологий в сфере обучения, освоения компетенции, получения навыков и умений. 3. Применение современных методов и средств для проведения инженерных изысканий. 4. Применение БИЛА для повышения оперативности –оценки объемов и характера разрушений, в том числе и в труднодоступных местах. 5. Оборудование ИССО системами мониторинга и прогнозирования воздействий природного и техногенного характера (для повышения оперативности реагирования на ЧС). | |
| Средняя вероятность | <ol style="list-style-type: none"> 1. Поддержка стратегических исследований и разработок российских компаний. 2. Заблаговременная подготовка путей подхода к искусственным сооружениям. 3. Заблаговременная подготовка площадок и баз хранения строительных материалов. 4. Заблаговременная подготовка конструкций и специальной строительной техники. 5. Развитие ресурсных материально-технических баз совместными усилиями владельцев инфраструктуры железнодорожного транспорта и соответствующими организациями Министерства обороны. 6. Рациональное планирование номенклатуры и мест размещения складов аварийно-восстановительного запаса. 7. Использование быстровозводимых конструкций. 8. Переустройство мостов на трубы или фильтрующие насыпи. 9. Использование современных быстротвердеющих и высокопрочных составов. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Заблаговременная оценка объемов необходимых ресурсов, численности и технического оснащения. 2. Поддержание высокого уровня компетенций изыскателей и проектировщиков, используемых высокопроизводительный инструментов и средств автоматизации. 3. Использование облегченных конструкций пролетных строений (деревянные, композитные алюминиевые конструкции). 4. Использование путеукладчика УК-25/9–18 для монтажа некоторых конструкций малых и средних мостов. 5. Комбинированная схема восстановления (временное + капитальное восстановление). 6. Унификация конструкций и элементов сооружений. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Автоматизация ведения документооборота и систем помощи принятия решений. |
| Низкая вероятность | <ol style="list-style-type: none"> 1. Заблаговременная разработка вариантов проектных решений по восстановлению разрушенных сооружений. 2. Разработка типовых проектов восстановления отдельных элементов конструкций. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Заблаговременное получение информации о геологическом строении и свойствах подстилающих грунтов. | |

Таблица 2

«Матрица угроз» повышения оперативности восстановления искусственных сооружений

| Матрица угроз | Разрушение | Критическое состояние | Тяжелое состояние | Незначительное влияние |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Высокая вероятность | <p>1. Отсутствие технических документов с учетом современных условий.</p> <p>2. Разрушение ИССО в узких местах, где сочетаются сложные конструкции сооружений, их труднодоступность и отсутствие альтернативных путей обхода и подходов к ИССО.</p> | <p>1. Снижение численности квалифицированных кадров.</p> <p>2. Отставание развития нормативно-правовой базы с учетом преобразований на железнодорожном транспорте.</p> <p>3. Изменение климата.</p> <p>4. Опасные природные явления.</p> <p>5. Ограничения возможности использования материалов и конструкций, применяемых при восстановлении больших и внеклассных мостов.</p> <p>6. Ограничения возможности использования специальной техники большой грузоподъемности.</p> | <p>1. Влияние международных санкций на экономику страны и деятельность холдинга «РЖД».</p> <p>2. Ухудшение межгосударственных отношений.</p> <p>3. Отсутствие материальной базы в непосредственной близости восстанавливаемого сооружения.</p> <p>4. Изменение климата повышает количество стихийных бедствий природного характера.</p> <p>5. Повышение нагрузок и скорости движения.</p> <p>6. Большое количество искусственных сооружений с конструктивными дефектами и длительным сроком эксплуатации без капитальных ремонтов</p> | |
| Средняя вероятность | <p>1. Развитие экономического кризиса.</p> <p>2. Снижение объема государственного финансирования.</p> <p>3. Пожары, стихийные бедствия в районах деятельности холдинга «РЖД».</p> <p>4. Массовый характер разрушений искусственных сооружений.</p> <p>5. Сочетанные (комплексные) разрушения.</p> <p>6. Труднодоступность разрушенных сооружений.</p> | <p>1. Спад уровня образования и подготовки специалистов.</p> <p>2. Дефицит производственных мощностей.</p> <p>3. Существенное изменение структуры грузооборота по типам грузов и направлениям относительно прогнозируемых значений.</p> <p>4. Ухудшение качества трудовых ресурсов.</p> <p>5. Недостаточный уровень внедрения и использования современных научно-технических разработок.</p> <p>6. Отсутствие организационного нормативного документа с учетом современных условий</p> | <p>1. Рост уровня цен на материалы.</p> <p>2. Сокращение притока новых кадров начиная с 2007 года вследствие демографического кризиса начала 90-х годов.</p> <p>3. Полное или частичное отсутствие информации о реконструируемом объекте (изученность района строительства, проекты сооружения).</p> <p>4. Длительность внешних воздействий (природные, техногенные, военные действия).</p> <p>5. Погодно-климатические факторы (температура, ветер, осадки и др.).</p> | <p>1. Снижение инвестиционной активности.</p> |
| Низкая вероятность | <p>1. Локальные военные действия.</p> <p>2. Сопровождающие негативные факторы (химическое или биологическое загрязнение).</p> | <p>1. Риск нерегулируемого роста цен.</p> | <p>1. Аварии на промышленных объектах, связанных с обеспечением работы холдинга «РЖД».</p> | |

Условно приведенные факторы можно объединить по признаку оказываемого воздействия. Например, изменение климата и более частое проявление опасных природных явлений, техногенных катастроф и стихийных бедствий в районах деятельности холдинга «РЖД» потребуют дополнительных мероприятий по адаптации нормативной базы, инструментов и технологий в области оперативного восстановления искусственных сооружений. Незапланированные колебания объемов перевозок, превышающих пропускную способность отдельных участков железных дорог, существенное изменение структуры грузооборота по типам грузов и направлениям относительно прогнозируемых значений приведет к дополнительным нагрузкам на мосты, что может способствовать их более частому выходу из строя. Дефицит производственных мощностей поставщиков продукции для нужд оперативного восстановления, недостаточный уровень развития и использования инноваций в сфере строительных технологий и материалов, недостаточный уровень внедрения и использования современных научно-технических разработок, отсутствие общего развития IT (ноу-хау, сервис, проекты автоматизации) могут привести к перебоям в поставках и разработке передовых технологий. Указанные факторы, вероятность и степень их влияния сведены в матрицу угроз (табл. 2).

Сформированные матрицы позволяют выделить те возможности и риски, которые оказывают влияние на оперативность восстановления искусственных сооружений, а также оценить степень такого влияния.

В данной работе для формирования рекомендаций по совершенствованию методов повышения оперативности восстановления деформированных искусственных сооружений железнодорожного транспорта с учетом современного уровня развития техники и строительных технологий применен SWOT-анализ. Несмотря на то что SWOT-анализ – это метод стратегического планирования развития компании или бизнеса, в данной работе он применен к существующей методологии восстановления объектов инфраструктуры для того, чтобы оценить ее сильные и слабые стороны, определить возможные перспективы развития, а также угрозы, влияющие на рассматриваемую область извне. Результаты проведенного SWOT-анализа существующих процессов, влияющих на оперативность восстановления искусственных сооружений, представлены на рис. 4.

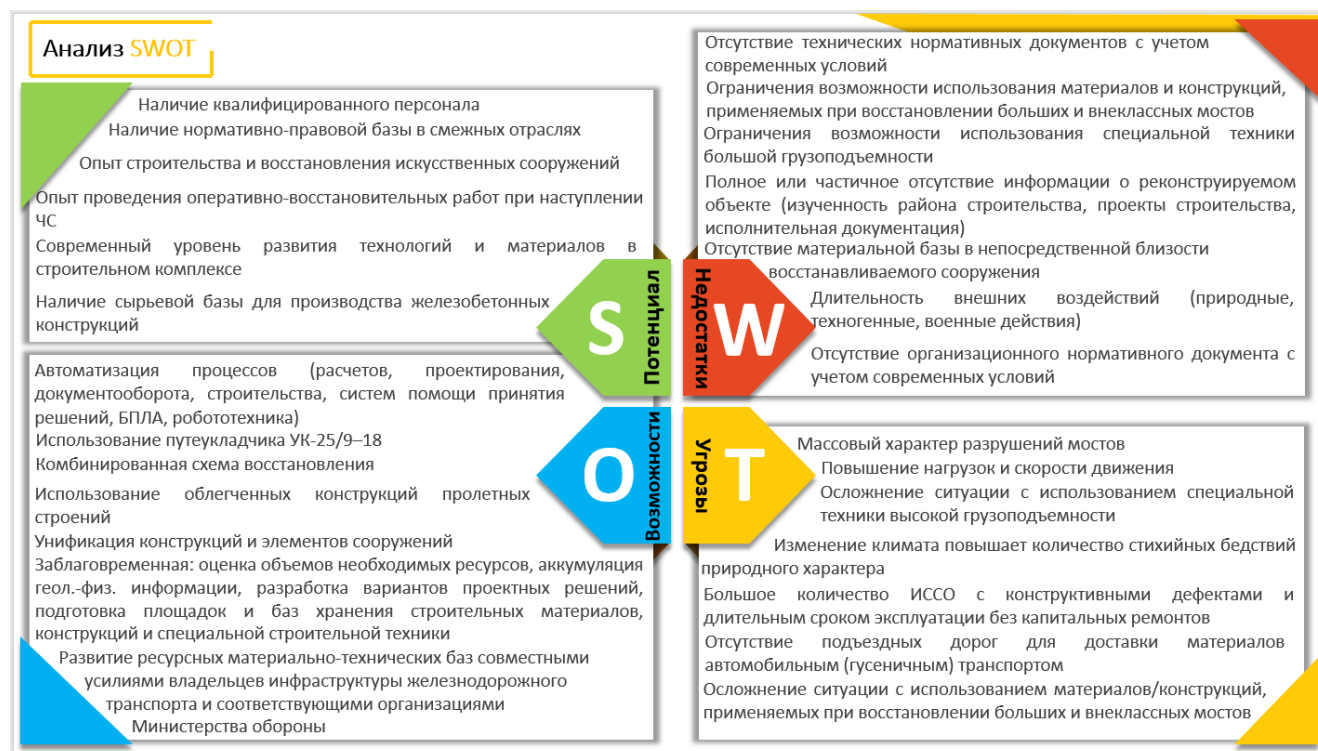


Рис. 4. SWOT-анализ существующей методологии оперативного восстановления деформированных искусственных сооружений

В результате анализа матрицы возможностей в SWOT-анализ существующей методологии оперативного восстановления деформированных искусственных сооружений включены следующие возможности:

- повышение автоматизации процессов отдельных расчетов элементов инфраструктуры или процесса проектирования в целом, восстановительных и ремонтных работ;
- автоматизация ведения документооборота и систем помощи принятия решений;
- заблаговременная подготовка путей подхода к искусственным сооружениям, площадок и баз хранения строительных материалов, конструкций и специальной строительной техники;
- заблаговременная оценка объемов необходимых ресурсов, численности и технического оснащения;
- заблаговременная разработка вариантов проектных решений по восстановлению разрушенных сооружений;
- заблаговременное получение информации о геологическом строении и свойствах подстилающих грунтов;
- поддержание высокого уровня компетенций изыскателей и проектировщиков, использование высокопроизводительного инструмента и средств автоматизации;
- развитие ресурсных материально-технических баз совместными усилиями владельцев инфраструктуры железнодорожного транспорта и соответствующими организациями Министерства обороны и рациональное планирование номенклатуры и мест размещения складов аварийно-восстановительного запаса;
- использование облегченных конструкций пролетных строений (деревянные, композитные алюминиевые конструкции);
- предварительное получение информации о разрушении объектов железнодорожной инфраструктуры с использованием БПЛА;
- использование путеукладчика УК-25/9–18 для монтажа некоторых конструкций малых и средних мостов.

Матрица внешних угроз (табл. 2) разделяет прогнозируемые угрозы на несколько категорий по вероятности проявления (высокая, средняя и низкая) и степени воздействия (разрушение, критическое состояние, тяжелое состояние и незначительное влияние). Анализ матрицы позволяет оценить опасность каждого фактора и определить наиболее значимые для рассматриваемой области. Наиболее значимыми можно считать отсутствие технических нормативных документов с учетом современных условий и разрушение ИССО в узких местах, где сочетаются сложные конструкции сооружений, их труднодоступность и отсутствие альтернативных путей обхода и подходов к ИССО. Те факторы, которые определяются как значимые, должны постоянно отслеживаться и контролироваться.

Представленные результаты в виде SWOT-матрицы получены из анализа современной научно-технической литературы, опубликованных экспертных мнений по тематике исследований, интервьюирования работников путевого хозяйства, а также результатов интеллектуальной деятельности. Кроме того, из матрицы видно, что методология оперативного восстановления объектов транспортной инфраструктуры требует значительной модернизации и стандартизации с учетом современных вызовов, и внешних угроз.

Выводы

По результатам анализа ГОСТ, ГОСТ Р, ПНСТ, требований, действующих или разрабатываемых в Российской Федерации технических регламентов, ведомственных распоряжений нормативные документы содержат в основном вопросы проектирования, строительства и технического обслуживания искусственных сооружений. Нормативные документы (ГОСТ, ГОСТ Р, ПНСТ), регламентирующие именно вопросы организации оперативного восстановления мостов, тоннелей и эстакад, отсутствуют или требуют переработки (переиздания). Вместе с тем необходимо разработать новый документ, включающий вопросы повышения оперативности восстановления разрушенных искусственных сооружений с учетом современного развития техники, технологий и строительных материалов, а также опыта проведения аварийно-восстановительных работ как на железнодорожном транспорте, так и в смежных отраслях. Например, методические рекомендации «Оперативное восстановление искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации». Вопросы взаимодействия причастных структур ОАО «РЖД» и федеральных органов исполнительной власти при наступлении деформаций и повреждений искусственных сооружений, возникших при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера, а также вследствие военных конфликтов могут войти в разрабатываемый нормативно-технический документ или же могут быть актуализированы в отдельном документе, например,

«Регламент взаимодействия ОАО «РЖД», дочерних и зависимых обществ при наступлении чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера, повлекших разрушение искусственного сооружения».

Необходимо также отметить, что требования к заблаговременной подготовке объектов к проведению аварийно-восстановительных работ, в том числе заблаговременное выполнение предпроектных изысканий и проектных работ, являются важной составляющей в вопросах повышения оперативности проведения аварийно-восстановительных работ. Поэтому необходима разработка отдельного нормативного документа или разделов в разрабатываемый (перерабатываемый) документ, регламентирующих требования к заблаговременной подготовке транспортных объектов к проведению аварийно-восстановительных работ.

Из анализа отечественных и зарубежных результатов исследований можно выделить несколько основных направлений повышения оперативности восстановления искусственных сооружений. Первое направление связано с автоматизацией различных процессов. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, автоматизация трудоемких процессов позволяет в значительной степени сократить затраты времени, например, на ведение документооборота, расчет конструкций и проектирование. Учитывая, что в некоторых случаях время на проектирование может занимать в 2–3 раза больше времени, чем сам процесс строительства, то автоматизация основных процессов позволяет сократить общее время на восстановление или строительство искусственных сооружений.

Второе направление связано с оптимизацией организационных мероприятий. Одной из важнейших составляющих повышения оперативности строительства и восстановления искусственных сооружений является наличие материальных и технических ресурсов, расположенных в непосредственной близости к объекту строительства, а также имеющиеся всевозможные пути следования от материальных баз, мест складирования, заводов по изготовлению конструкций и материалов, сборочных баз и др. к месту проведения работ. В этом отношении заблаговременная подготовка путей подхода к искусственным сооружениям, площадок и баз хранения строительных материалов, конструкций и специальной строительной техники значительно сократит затраты времени на подготовительные работы. Для снижения времени на проектно-изыскательские работы на объектах, где такая информация отсутствует, можно заблаговременно формировать базы геодезических, геологических и гидрометеорологических данных. Поскольку такие работы занимают достаточно много времени, заблаговременное их выполнение целесообразно на крупных высокоответственных сооружениях. Также одним из способов повышения оперативности будет формирование баз данных, содержащих варианты проектных решений по восстановлению частично или полностью разрушенных искусственных сооружений. Высокие темпы восстановления могут быть достигнуты только при непрерывном обеспечении материально-техническими ресурсами на всем протяжении строительных работ. Развитие ресурсных материально-технических баз может осуществляться, например, совместными усилиями владельцев инфраструктуры железнодорожного транспорта и соответствующими организациями Министерства обороны. При этом следует отметить необходимость рационального планирования номенклатуры и мест размещения складов аварийно-восстановительного запаса.

Третье направление предполагает использование различных конструкций и материалов, применение которых может повысить оперативность восстановления. Военный опыт по возведению переправ через водные преграды показывает достаточно высокие темпы и позволяет возобновить движение в зависимости от условий и имеющихся ресурсов в срок от 1 до 5 дней. Для этого используются различные конструкции инвентарных наплавных или эстакадных мостов. Данный вариант восстановления, несмотря на высокие темпы, обладает рядом недостатков, поскольку подобные сооружения являются временными и имеют ограничения по провозной способности. Однако такое восстановление можно рассматривать в виде комбинированной схемы, когда на время работ по капитальному восстановлению движение будет организовано по временному мосту. Такая схема будет более затратна, но позволит открыть движение в кратчайшие сроки, хотя и с ограничениями.

Другой подход связан с использованием облегченных материалов в конструкциях мостов. Это могут быть, например, современные многослойные деревянные конструкции, композитные материалы или конструкции из алюминиевых сплавов. Использование облегченных конструкций позволит сократить время на монтаж и транспортировку, а также снизить требования по грузоподъемности используемых строительных машин. Это направление имеет хорошие перспективы, но должны быть выработаны жесткие требования по прочности и надежности таких конструкций, которые должны обеспечить пропуск поездов с заданными скоростями и нагрузками. Также оперативность восстановления могут повысить унификация сборных конструкций опор и пролетов мостовых сооружений.

Четвертое направление связано с технологиями, применяемыми при восстановлении искусственных сооружений. Так, для экономии ресурсов, особенно если они имеют массовый характер, целесообразно при расчистке завалов сохранять уцелевшие элементы конструкций для их повторного использования. Использование БПЛА для предварительного получения информации о разрушении объектов железнодорожной инфраструктуры позволит оценить характер разрушений и предварительно оценить объем необходимых ресурсов для восстановительных мероприятий. В исследовании приведена работа, в которой для оптимизации восстановительных работ предлагается применение путеукладчика УК-25/9–18 для монтажа некоторых конструкций малых и средних мостов, что также может позволить в некоторых случаях повысить оперативность проведения восстановительных работ.

Проведенные исследования и сформулированные выводы позволяют определить направления для формирования предложений по способам повышения оперативности восстановления искусственных сооружений.

Предложения по совершенствованию существующей практики ведения аварийно-восстановительных работ

Возникновение деформаций (разрушение) объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта является чрезвычайной ситуацией, последствия которой необходимо ликвидировать в кратчайшие сроки и обеспечить движение на участке. При таком рассмотрении существующие технические документы и нормативно-правовые акты, регламентирующие вопросы оперативного реагирования, взаимодействия, планирования и организации работ при возникновении ЧС, достаточно конкретны и структурированы. Вместе с этим необходимо отметить, что значительная ответственность в принятии решений ложится на сформированный оперативный штаб. Соответственно, скорость ликвидации последствий ЧС, а также правильность принятых решений по восстановлению объекта в значительной степени зависит от человеческого фактора, имеющихся компетенций и опыта выполненных ранее работ. Учитывая результаты проведенных в данной работе исследований, предлагается разработать нормативно-методический документ, охватывающий основные вопросы ведения аварийно-восстановительных работ при разрушениях искусственных сооружений, например, методические рекомендации «Оперативное восстановление искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации».

Каждый случай повреждения искусственных сооружений в результате внешних воздействий различного характера является уникальным. Виды повреждений и разрушений будут различны и, следовательно, технические решения также будут различаться. При этом для быстрого восстановления важно оперативно определиться с техническим решением, которое будет использовано наиболее эффективно в конкретных условиях. С учетом изложенного целесообразна разработка и использование альбома типовых решений по оперативному восстановлению отдельных элементов конструкций, например, устоев, промежуточных опор, опорных частей, пролетных строений, подходов и т.д. с учетом современного состояния техники, технологий и материалов.

Проведенные исследования, выполненный SWOT-анализ и разработанные матрицы рисков и возможностей позволили сформулировать основные предложения по повышению оперативности аварийно-восстановительных работ, которые приведены ниже вместе с кратким описанием каждого способа.

Повышение автоматизации процессов отдельных расчетов элементов инфраструктуры или процесса проектирования в целом, восстановительных и ремонтных работ

Процесс автоматизации выполнения трудоемких расчетов или процесса проектирования может в значительной степени сократить время на выполнение таких операций. При этом при увеличении скорости получения конечного результата не уменьшается качество полученных результатов и проектных решений. Еще одним преимуществом использования автоматизированных систем является возможность внесение изменений в исходные данные с оперативным получением пересчитанных результатов, что дает возможность корректировать технологические и конструктивные решения и осуществлять поиск оптимальных вариантов без выполнения трудоемких расчетных операций. Такие системы могут создаваться на базе систем автоматизированного проектирования (САПР), технологических линий проектирования (ТЛП) или специального программного обеспечения для расчетов конструкций и технологических операций. Использование таких систем может снизить общие трудозатраты на 8–12 %, а в некоторых случаях применения BIM сократить срок выполнения проектных работ на 39 % (Smart Market Report McGraw Hill Construction, 2012).

Автоматизация ведения документооборота и систем помощи принятия решений

Неотъемлемой частью изыскательских, проектных и строительных работ является непрерывный процесс ведения различной документации. Перечень таких документов может превышать десятки, а то и сотни наименований. Такие документы должны формироваться в соответствующих подразделениях и храниться продолжительное время. Применение систем электронного документооборота в автоматизированных системах позволяет повысить оперативность и эффективность ведения документооборота и облегчить процедуры взаимодействия между подразделениями. Использование автоматизированных систем управления (АСУ) помимо ведения электронного документооборота представляет возможность автоматизированного анализа информации, содержащейся в электронной базе, и формирования рекомендаций, позволяющих принимать объективные организационные и управленческие решения в кратчайшие сроки.

Заблаговременная подготовка подходов к искусственным сооружениям, площадок и баз хранения строительных материалов, конструкций и специальной строительной техники

Одной из важнейших составляющих повышения оперативности строительства и восстановления искусственных сооружений является наличие материальных и технических ресурсов, расположенных в непосредственной близости к объекту строительства, а также имеющиеся все возможные пути следования от материальных баз, мест складирования, заводов по изготовлению конструкций и материалов, сборочных баз и др. к месту проведения работ. От качества дорог будет зависеть масса и грузоподъемность применяемого транспорта и машин, что будет влиять на скорость подхода техники и подвоза материалов. Приближенность баз хранения строительных материалов, конструкций и специальной строительной техники также снизит время на доставку необходимых ресурсов для восстановления искусственных сооружений. Также целесообразно вместе с подготовкой путей подхода осуществлять подготовку площадок для строительной техники непосредственно на объекте строительства (например, для кранов). Такие виды работ, относящиеся к подготовительным, приведут к сокращению общих сроков восстановления. Так, например, в среднем продолжительность подготовительных работ составляет порядка 17 % от общей продолжительности строительства. Таким образом, заблаговременное выполнение некоторых работ может повысить оперативность восстановительных работ на 5–10 %.

Заблаговременная оценка объемов необходимых ресурсов, численности работников и технического оснащения

Выбор оптимального количества необходимых ресурсов для быстрого и качественного восстановления искусственных сооружений является достаточно сложной задачей, поскольку до момента повреждения или разрушения конструкции сложно оценить масштаб необходимых восстановительных работ. Отсутствие необходимой информации может привести либо к недостатку ресурсов, что потребует дополнительного времени на их пополнение, или, наоборот, сосредоточение лишних ресурсов будет мешать правильной организации технологических операций по восстановлению и также может негативно сказаться на сроках восстановления. В такой ситуации целесообразно определить необходимые ресурсы под различные сценарии разрушения, а после натурного осмотра при необходимости выполнить корректировку укрупненных расчетов или перераспределение ресурсов. Такой подход позволит начать переброску необходимых ресурсов до проведения детального обследования разрушенного объекта.

Заблаговременная разработка вариантов проектных решений по восстановлению разрушенных сооружений

В настоящее время промежуток времени между моментом выдачи задания на проектирование строительства или ремонта объекта железнодорожной инфраструктуры и моментом начала реализации проекта, как правило, измеряется месяцами (до 6 месяцев). Также не является секретом то, что после разработки проекта тратится достаточно много времени на прохождение экспертизы, согласование и утверждение проектных решений.

Очевидно, что в момент наступления ЧС такой порядок проектирования не сможет обеспечить восстановление разрушенных объектов железнодорожной инфраструктуры в кратчайшие сроки. По этой причине заблаговременная разработка проектной документации по возможным вариантам восстановления наиболее важных объектов железнодорожной инфраструктуры является стратегически важной задачей, решение которой позволит значительно повысить оперативность восстановительных работ. Заблаговременное проектирование имеет ряд недостатков: аварийные воздействия носят вероятностный характер, поэтому вариаций (сценариев) разрушений ИССО достаточно большое количество,

что при данном подходе равно количеству проектов производства работ; заблаговременный проект не может учитывать оперативную обстановку и фактическое состояние объекта, которое может меняться с течением времени. Данные недостатки могут быть минимизированы и нивелированы, если заблаговременное проектирование будет выполняться:

- для важнейших и наиболее уязвимых объектов железнодорожной инфраструктуры;
- с учетом наиболее вероятностных сценариев разрушений;
- на основе целостной и полной информации об объекте и его окружении (планы, аэрофотоснимки, крупномасштабные карты прилегающей к объекту местности, отметки и координаты реперов и опорных пунктов триангуляционной или полигонометрической сети, инженерно-геологические и гидрологические данные, метеорологические и климатические условия);
- с учетом наличия местных строительных материалов и конструкций;
- с учетом современных конструктивных решений и строительных материалов.

Немаловажным этапом заблаговременного проектирования является имитационное моделирование, которое может позволить заблаговременно оценить масштабы возможных разрушений при наступлении ЧС, а также выполнить расчет необходимых для восстановления ресурсов.

Заблаговременное получение информации о геологическом строении и свойствах подстилающих грунтов

Заблаговременное получение информации о геологическом строении и свойствах подстилающих грунтов в зоне размещения объекта инфраструктуры позволит значительно сократить время на проведение изысканий при наступлении ЧС. Источниками геологической информации могут являться:

- изыскания прошлых лет (карточки ИССО);
- изыскания, выполненные для вновь построенных объектов;
- стационарные системы мониторинга, размещенные на локальных участках;
- геофизическая информация, полученная диагностическими комплексами (георадиолокационные данные);
- результаты исследований и испытаний грунтов, выполненные силами и средствами инженерно-геологических баз и обследовательских станций.

От полноты заблаговременно полученной геологической информации и физико-механических свойств грунтов зависит скорость проектирования и восстановления искусственных сооружений и подходов к ним.

Поддержание высокого уровня компетенций изыскателей и проектировщиков, использование высокопроизводительного инструмента и средств автоматизации

Обеспечить высокий уровень компетенций изыскателей и проектировщиков можно путем внедрения в учебный процесс дополнительных программ, позволяющих развить цифровые компетенции. Неотъемлемой частью проектирования в текущих условиях является теория управления рисками, что предполагает наличие соответствующего понятийного аппарата у специалистов. Безусловно изыскатели и проектировщики должны регулярно проходить повышение квалификации и практику на передовых предприятиях и инновационных площадках. С целью сокращения времени проведения изыскательских работ необходимо использовать наукоемкие, автоматизированные, цифровые измерительные средства и комплексы: неинвазивные геофизические методы, спутниковые геодезические комплексы, системы лазерного сканирования, пенетрацию, полевые испытательные грунтовые комплексы и т.п. Вместе с этим, необходимо на постоянной основе обеспечить процесс регулярного обновления нормативно-технической документации с учетом существующих перспективных и высокопроизводительных образцов измерительного оборудования и средств автоматизации.

Развитие ресурсных материально-технических баз совместными усилиями владельцев инфраструктуры железнодорожного транспорта и соответствующими организациями Министерства обороны

Рассматриваемое предложение предусматривает создание коллективных материально-технических баз (центров), расположенных с учетом логистики транспорта техники и материалов к критически важным объектам железнодорожной инфраструктуры. При этом следует вести рациональное планирование номенклатуры и мест размещения складов аварийно-восстановительного запаса. Подобные центры позволят аккумулировать наиболее «ресурсоемкие» конструктивные элементы объектов инфраструктуры: временные опоры, сборные элементы, пролетные строения и т.п. Вместе с этим произойдет

интеграция гражданских и военных разработок (конструктивные решения, материальная база, техника, методы), которая будет способствовать развитию методологии оперативного восстановления с учетом многовариантности событий и разрушений. Кроме того, исходя из оперативной обстановки, характера и места ЧС, может использоваться ближайший центр материально-технических ресурсов, что значительно может сократить время за счет сокращения времени доставки элементов и материалов. Однако главным преимуществом данных центров может оказаться готовность конструктивных элементов объектов инфраструктуры к установке, т.е. время на изготовления элемента не затрачивается. Последнее наиболее важно, особенно при изготовлении железобетонных конструкций и элементов, а также с учетом существующих санкций и ограничений.

Использование облегченных конструкций пролетных строений

Такие конструкции обладают высокой коррозионной и химической стойкостью, менее подвержены воздействию влаги и перепадам температур, имеют повышенный срок службы при эксплуатации и хранении. Существует опыт применения композитных и алюминиевых мостов в автодорожной отрасли. Однако, учитывая величину осевой нагрузки и динамическое поездное воздействие, применение композитных и алюминиевых пролетных строений на железнодорожном транспорте ограничено. Вместе с тем возможно применение отдельных элементов, не подверженных расчетным нагрузкам и выполненных из высокопрочных и легких композитных материалов и сплавов алюминия (настилы, тротуары, ограждающие конструкции, перила, лестничные сходы и пр.). Высокая прочность конструкций из композитных материалов при их малом весе облегчит транспортировку и монтаж, а также снизит нагрузку на фундамент и основание. Применение конструкций из композитов и алюминия позволит снизить трудоемкость работ и применять крановую технику с меньшей грузоподъемностью.

Однако применение новых композитных материалов и алюминиевых сплавов требует установления коэффициентов надежности по предельным состояниям расчетных характеристик с учетом расчетной нагрузки и срока полезного использования в условиях агрессивного воздействия окружающей среды.

Предварительное получение информации о разрушении объектов железнодорожной инфраструктуры с использованием БПЛА

Использование беспилотных летательных аппаратов (коптеров) в современном мире показывает их эффективность во многих отраслях. Их применение позволяет оперативно получать ситуационную информацию, позволяющую анализировать, принимать эффективные решения, управлять. В области повышения оперативности проведения аварийно-восстановительных работ на искусственных сооружениях применение БПЛА позволит решать ряд задач, например, таких как: получение уточняющей оперативной информации для оценки характера и степени разрушения объекта; получение уточняющей оперативной информации для организации и оперативного управления восстановительными работами (проезды для техники, развертывание вахты, места складирования материалов и пр.); изучение целостности конструкций (дефекты, сколы, трещины, арматура) и объема восстановительных работ в труднодоступных местах; построение расчетных моделей (метод фотограмметрии) для автоматизации проектных работ.

Использование путеукладчика УК-25/9–18 и/или УК 25 СП (для стрелочных переводов) для монтажа некоторых конструкций малых и средних мостов

Определенные виды технологических операций, предусмотренные проектами производства работ или технологическими картами, выполняются с использованием различной крановой техники, задействованной в одном технологическом процессе. Применение одного крана (например, УК-25/9–18 и/или УК 25 СП) в составе восстановительного поезда, используемого как для установки пролетных строений, так и для монтажа сборных бетонных блоков для опор (при использовании специальных стропильных систем), а также укладки мостового полотна, рельсов и рельсошпальной решетки на разрушенных подходах позволит сократить время, затрачиваемое на пробег техники к месту производства работ, перегруппировку восстановительных поездов, формирование нескольких строительных бригад, а также сократить потребность в крановой технике.

Унификация конструкций и элементов сооружений

Устранение излишнего многообразия элементов (унификация) мостовых переходов позволит сократить время на оперативное восстановление сооружения за счет применения разработанных технологических карт для одинаковых конструктивных элементов, наработки опыта монтажа одинаковых конструктивных элементов, применения однотипной техники и механизмов, применения заранее подготовленных заводских конструктивных элементов. Кроме того, в случае острой необходимости и при отсутствии конструктивных элементов на складах, последние могут быть демонтированы с малозатратных участков и доставлены на объекты оперативного восстановления. Также возможно провести унификацию конструктивных элементов, например, с автодорожными сооружениями, и в случае необходимости, проводить восстановление из материально-технических запасов автодорожного хозяйства.

Комбинированная схема восстановления (временное + капитальное восстановление)

Использование быстровозводимых временных (краткосрочных) железнодорожных мостов сокращает время восстановления движения, однако рассматривается как временная мера, позволяющая открыть движение, но с ограниченной скоростью и массой. Подобные способы временного и краткосрочного оперативного восстановления могут решить проблему начала пропуска поездов после разрушения моста, однако ввиду малого срока службы конструкции потребуют в дальнейшем выполнения капитального восстановления сооружения и, как следствие, приведут к дополнительным материальным затратам.

Список литературы

- 1 **Августов, Г. И.** Способы расчистки русел рек при восстановлении железнодорожных мостов на современном этапе / Г. И. Августов, А. А. Шейко // Специальная техника и технологии транспорта. – 2020. – № 8 (46). – С. 68–72. – ISSN 2712-9624.
- 2 **Афонаскин, В. Н.** Требования к системе обеспечения строительно-восстановительными материалами и конструкциями / В. Н. Афонаскин // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева. – 2018. – № 2(14). – С. 18–23. – ISSN 2413-4090.
- 3 Некоторые вопросы организации восстановления объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта / В. А. Бабошин, К. Н. Савинов, А. К. Черных, М. Г. Яшин // Автоматизация процессов управления. – 2020. – № 4. – С. 23–32. – ISSN 1991-2927.
- 4 **Бочище, Д. Н.** Этапы развития средств и способов восстановления мостовых переходов на железных дорогах / Д. Н. Бочище // Специальная техника и технологии транспорта. – 2019. – № 1(39). – С. 21–26. – ISSN 2712-9624.
- 5 **Валеев, А. В.** Анализ кранов применяемых для установки пролетных строений при строительстве (восстановлении) искусственных сооружений / А. В. Валеев // Специальная техника и технологии транспорта. – 2019. – № 1(39). – С. 128–133. – ISSN 2712-9624.
- 6 **Вороной, В. А.** Обоснование конкурентоспособности способов краткосрочного восстановления железнодорожного моста / В. А. Вороной

References

- 1 **Augustov, G. I.** Methods of clearing riverbeds during restoration of railway bridges at the present stage / G. I. Augustov, A. A. Sheiko // Special machinery and technologies of transport. – 2020. – No. 8 (46). – P. 68–72. – ISSN 2712-9624.
- 2 **Afonaskin, V. N.** Requirements for the system of providing construction and repair materials and structures / V.N. Afonaskin // Bulletin of the Military Academy of material and technical support named after Army General A. V. Khrulev. – 2018. – No. 2(14). – P. 18–23. – ISSN 2413-4090.
- 3 Some issues of organization of restoration of railway transport infrastructure facilities / V. A. Baboshin, K. N. Savinov, A. K. Chernykh, M. G. Yashin // Automation of management processes. – 2020. – No. 4. – P. 23–32. – ISSN 1991-2927.
- 4 **Bochische, D. N.** Stages of development of means and methods of reconstruction of bridge crossings on railways / D. N. Bochische // Special machinery and technologies of transport. – 2019. – No. 1(39). – P. 21–26. – ISSN 2712-9624.
- 5 **Valeev, A. V.** Analysis of cranes used for installation of span structures during construction (restoration) of artificial structures / A. V. Valeev // Special machinery and transport technologies. – 2019. – No. 1(39). – P. 128–133. – ISSN 2712-9624.
- 6 **Voronoy, V. A.** Rationale for competitiveness of methods of short-term rehabilitation of a railway bridge / V. A. Voronoy // Wayfinder. – 2022. – No. 51 (77). – P. 42–49. – ISSN 2541-9986.

// Путь навигатор. – 2022. – № 51 (77). – С. 42–49. – ISSN 2541-9986.

7 **Вороной, В. А.** Применение мостовыми частями железнодорожных войск укладочного поезда с использованием крана УК-25/9-18 (УК-25/21) для восстановления мостов на железных дорогах России / В. А. Вороной // Путь навигатор. – 2018. – № 35(61). – С. 20–27. – ISSN 2541-9986.

8 **Глазунов, В. А.** Технология выбора вариантов восстановления железнодорожных мостов через водные преграды на современном этапе / В. А. Глазунов // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-западного федерального округа России. – 2020. – №. 2. – С. 40–46. – ISSN 2686-8180.

9 **Дрещинский, В. А.** Методические подходы к обоснованию технических требований, предъявляемых к восстановлению железных дорог железнодорожными войсками / В. А. Дрещинский, Н. Д. Закутасова // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. – 2021. – № 3 (21). – С. 51–55. – ISSN 2588-0179.

10 **Жарый, Д. А.** Планирование и организация работ по восстановлению железных дорог / Д. А. Жарый // Специальная техника и технологии транспорта. – 2019. – С. 18–24. – ISSN 2712-9624.

11 **Завальнюк, С. И.** Подготовка проездов и монтажных площадок для обеспечения восстановления железнодорожного моста в кризисных ситуациях / С. И. Завальнюк, В. А. Рыбицкий // Достижения вузовской науки 2018. сборник статей III Международного научно-исследовательского конкурса : в 2 ч. – 2018. – С. 66–75. – ISBN 978-5-907103-25-2.

12 **Завальнюк, С. И.** Автоматизация разработки проектных решений на восстановление железнодорожных мостовых переходов / С. И. Завальнюк // Инновационные научные исследования : теория, методология, практика. Сборник статей XVI Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 52–54. – ISBN 978-5-907160-74-3.

13 **Завальнюк, С. И.** Совершенствование конструкции сборно-разборных пролетных строений для восстановления железнодорожных мостов / С. И. Завальнюк // Фундаментальные основы инновационного развития науки и образования / Под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. – С. 173–194. – ISBN 978-5-907068-97-1.

14 **Заец, А. А.** Методика выбора способа восстановления искусственных сооружений на железных дорогах / А. А. Заец // Научные проблемы

7 **Voronoy, V. A.** Application by bridge units of railway troops of stacking train using crane UK-25/9-18 (UK-25/21) for bridge rehabilitation on Russian railways / V. A. Voronoy // Way Navigator. – 2018. – № 35(61). – P. 20–27. – ISSN 2541-9986.

8 **Glazunov, V. A.** Technology of selecting options for rehabilitation of railway bridges over water obstacles at the present stage / V. A. Glazunov // Regional aspects of management, economics and law of the North-West Federal District of Russia. – 2020. – No. 2. – P. 40–46. – ISSN 2686-8180.

9 **Dreshchinskiy, V. A.** Methodical Approaches to Substantiation of Technical Requirements for Railway Rehabilitation by Railway Troops / V. A. Dreshchinskiy, N. D. Zakutasova // Scientific Problems of Logistical Support of the Armed Forces of the Russian Federation. – 2021. – No. 3 (21). – P. 51–55. – ISSN 2588-0179.

10 **Zharyy, D. A.** Planning and organization of work on railway rehabilitation / D. A. Zharyy // Special machinery and technologies of transport. – 2019. – P. 18–24. – ISSN 2712-9624.

11 **Zavalniuk, S. I.** Preparation of passages and installation sites to ensure the restoration of railway bridge in crisis / S. I. Zavalniuk, V. A. Rybitsky // Advances of Higher Education Science 2018. Collection of papers of III International Research Contest : in 2 parts. – 2018. – P. 66–75. – ISBN 978-5-907103-25-2.

12 **Zavalniuk, S. I.** Automation of development of design solutions for the restoration of railway bridge crossings / S. I. Zavalniuk // Innovative scientific research : theory, methodology, practice. Collection of articles of XVI International scientific-practical conference. – 2019. – P. 52–54. – ISBN 978-5-907160-74-3.

13 **Zavalnyuk, S. I.** Improvement of the design of prefabricated collapsible spans for reconstruction of railway bridges / S. I. Zavalnyuk // Fundamental bases of innovative development of science and education / Ed. by G.Yu. Gulyaev. – Penza : ICSU "Science and Education", 2018. – P. 173–194. – ISBN 978-5-907068-97-1.

14 **Zayets, A. A.** Methodology of choosing the method of restoration of artificial constructions on the railways / A. A. Zayets // Scientific problems

материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. – 2022. – № 2 (24). – С. 127–133. – ISSN 2588-0179.

15 **Калугин, Ю. Б.** Формирование структуры и состава восстановительного поезда методом ветвей и границ с учетом предельного насыщения фронта работ / Ю. Б. Калугин, Ю. А. Спильник // Специальная техника и технологии транспорта. – 2022. – № 14. – С. 101–107. – ISSN 2712-9624.

16 **Левин, М. А.** Повышение эффективности восстановления железнодорожных мостов за счет внедрения современных инвентарных конструкций / М. А. Левин // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. – 2020. – № 4(18). – С. 89–95. – ISSN 2588-0179.

17 **Матвеев, А. В.** Военные железнодорожные мосты комбинированных систем / А. В. Матвеев, О. А. Хижавский, А. А. Заец // Вестник Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева. – 2015. – № 4. – С. 23–27. – ISSN 2413-4090.

18 **Матвеев, А. В.** Методологический аспект проектирования пролетных строений комбинированного типа / А. В. Матвеев // Специальная техника и технологии транспорта. – 2019. – № 1(39). – С. 12–20. – ISSN 2712-9624.

19 **Орехов, А. В.** Композитные материалы в военном мостостроении / А. В. Орехов // Специальная техника и технологии транспорта. – 2020. – № 7(45). – С. 51–57. – ISSN 2712-9624.

20 **Петров, К. В.** Конструктивно-технологические решения мостовых конструкций из композитных материалов, повышающие темпы восстановления железнодорожных мостов / К. В. Петров // Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения : Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25–26 сентября 2019 года. – Санкт-Петербург : Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 2019. – С. 129–132.

21 Методика определения численности и технического оснащения воинских формирований Железнодорожных войск при возникновении чрезвычайных ситуаций на объектах железнодорожного транспорта / А. А. Сергеев, В. А. Рыбицкий, С. И. Завальнюк [и др.]. – Киров : Изд-во МЦИТО, 2018. – 191 с. – ISBN 978-5-907091-12-2.

22 **Тюпин, В. Н.** Определение параметров разрушающего действия точечного взрыва на скальные откосы выемок железнодорожного пути / В. Н. Тюпин // Современные технологии.

of material and technical support of the Armed Forces of the Russian Federation. – 2022. – No. 2 (24). – P. 127–133. – ISSN 2588–0179.

15 **Kalugin, Y. B.** Formation of structure and composition of reconstruction train by method of branches and borders taking into account limit saturation of work front / Y. B. Kalugin, Y. A. Spilnik // Special machinery and technologies of transport. – 2022. – No. 14. – P. 101–107. – ISSN 2712-9624.

16 **Levin, M. A.** Increase of efficiency of railway bridges rehabilitation through the introduction of modern inventory structures / M. A. Levin // Scientific problems of material and technical support of the Armed Forces of the Russian Federation. – 2020. – No. 4(18). – P. 89–95. – ISSN 2588-0179.

17 **Matveev, A. V.** Military railway bridges of combined systems / A. V. Matveev, O. A. Khizhavsky, A. A. Zayets // Bulletin of Military Academy of Material and Technical Support named after Army General A. V. Khrulev. – 2015. – No. 4. – P. 23–27. – ISSN 2413-4090.

18 **Matveev, A. V.** Methodological aspect of designing combined type spans / A. V. Matveev // Special machinery and technologies of transport. – 2019. – No. 1(39). – P. 12–20. – ISSN 2712-9624.

19 **Orekhov, A. V.** Composite materials in military bridge construction / A. V. Orekhov // Special Equipment and Technologies of Transport. – 2020. – No. 7(45). – P. 51–57. – ISSN 2712-9624.

20 **Petrov, K. V.** Structural and technological solutions of bridge structures made of composite materials, increasing the rate of reconstruction of railway bridges / K. V. Petrov // Problems of ensuring the functioning and development of ground infrastructure of weapon systems complexes : Materials of III All-Russian Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, 25–26 September 2019. – Saint-Petersburg : Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky, 2019. – P. 129–132.

21 Methodology of determining the number and technical equipment of military formations of railway troops in emergencies at railway transport facilities / A. A. Sergeev, V. A. Rybitsky, S. I. Zavalnyuk [et al.]. – Kirov : Izd vo MCITO, 2018. – 191 p. – ISBN 978-5-907091-12-2.

22 **Tyupin, V. N.** Determination of parameters of the destructive effect of a point explosion on the rock slopes of railway tracks excavations / V. N. Tyupin // Modern Technologies. System

Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 3(43). – С. 156–157. – ISSN 1813-9108.

23 **Тюпин, В. Н.** Параметры разрушения железнодорожных тоннелей и мостов при воздействии точечных взрывов / В. Н. Тюпин // Национальная Ассоциация Ученых. – 2015. – № 6(11). – С. 169–171.

24 **Фалеев, М. Д.** О возможности применения деревянных разрезных балочных пролетных строений для восстановления железнодорожных мостов / М. Д. Фалеев, Е. В. Фалеева, Е. Е. Томила // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2017. – № 4 (13). – С. 46–48. – ISSN 2415-8658.

25 **Хижавский, О. А.** О классификации пролетных строений военных железнодорожных мостов / О. А. Хижавский // Специальная техника и технологии транспорта. – 2020. – № 7(45). – С. 64–72. – ISSN 2712–9624.

26 **Шувалов, Д. В.** Заблаговременная подготовка к восстановлению искусственных сооружений путём реализации способа обособленного длительного хранения железобетонных свай / Д. В. Шувалов // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. – Санкт-Петербург, Петергоф, 2020. – С. 128–132.

27 **Шумилов, М. Н.** Методы обоснования видов и объемов восстановительных работ на участке ОЖДБР / М. Н. Шумилов, Д. И. Попов // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-Западного Федерального округа России. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 167–171. – ISSN 2686–8180.

28 **Шумилов, М. Н.** О методах прогнозирования и анализа вариантов разрушения железных дорог / М. Н. Шумилов // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-западного федерального округа России : межвузовский сборник научных трудов. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 167–171. – ISSN 2686–8180.

29 **Ярошенко, С. В.** Анализ конструктивных решений и новых материалов при применении фундаментов поверхностного опирания опор военных железнодорожных мостов / С. В. Ярошенко // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. – 2019. – № 2(12). – С. 224–236. – ISSN 2588–0179.

30 **Яшин, М. Г.** Системы поддержки принятия решений при разработке проектных соображений на восстановление железных дорог / М. Г. Яшин, Д. А. Данильченко // Проблемные вопросы и перспективы развития железнодорожных войск и органов военных сообщений,

analysis. Modeling. – 2014. – No. 3(43). – P. 156–157. – ISSN 1813-9108.

23 **Tyupin, V. N.** Parameters of railway tunnels and bridges destruction under the impact of point explosions / V. N. Tyupin // National Association of Scientists. – 2015. – No. 6(11). – P. 169–171.

24 **Faleev, M. D.** On the possibility of using wooden cut girder spans for reconstruction of railway bridges / M. D. Faleev, E. V. Faleeva, E. E. Tomilina // Transport of Asia-Pacific Region. – 2017. – No. 4 (13). – P. 46–48. – ISSN 2415-8658.

25 **Khizhavsky, O. A.** On classification of military railway bridge spans / O. A. Khizhavsky // Special Machinery and Technologies of Transport. – 2020. – No. 7(45). – P. 64–72. – ISSN 2712–9624.

26 **Shuvalov, D. V.** Advance preparation for the restoration of artificial structures by implementing the method of isolated long-term storage of reinforced concrete piles / D. V. Shuvalov // Innovative Railways. The newest and advanced systems of train traffic provision. – St. Petersburg, Peterhof, 2020. – P. 128–132.

27 **Shumilov, M. N.** Methods for substantiating the types and volumes of rehabilitation work on the section of OZhDBR / M. N. Shumilov, D. I. Popov // Regional aspects of management, economics and law of the North-West Federal District of Russia. – Saint Petersburg, 2017. – P. 167–171. – ISSN 2686–8180.

28 **Shumilov, M. N.** About methods of forecasting and analysis of variants of destruction of railways / M. N. Shumilov // Regional aspects of management, economics and law of North-Western Federal District of Russia : interuniversity collection of scientific papers. – St. Petersburg, 2017. – P. 167–171. – ISSN 2686–8180.

29 **Yaroshenko, S. V.** Analysis of design solutions and new materials in application of surface-support foundations of military railway bridge piers / S. V. Yaroshenko // Scientific problems of material and technical support of the Armed Forces of the Russian Federation. – 2019. – No. 2(12). – P. 224–236. – ISSN 2588–0179.

30 **Yashin, M. G.** Decision support systems for the development of design considerations for railway rehabilitation / M. G. Yashin, D. A. Danilchenko // Problematic issues and prospects for the development of railway troops and military communications bodies, materials of the Military Scientific

материалы Военно-научной конференции курсантов. – Санкт-Петербург, Петергоф, 2022. – С. 82–87.

Conference of Cadets. – St. Petersburg, Peterhof, 2022. – P. 82–87.

M. V. Okost, A. V. Morozov

STUDY OF WAYS TO INCREASE RECOVERY EFFICIENCY BRIDGES AS A RESULT OF OCCURRED STRUCTURAL DEFORMATIONS

Abstract. The paper is devoted to the study of methods to improve the operational restoration of bridges as a result of structural deformation. The research is conducted on the basis of the analysis of the applied methodological and technical documents regulating the issues of operational restoration of railway transport facilities, as well as modern achievements of domestic and foreign science, engineering and technology related to the ways of operational restoration of artificial structures of railway transport. Taking into account the results of the conducted research the ways of increasing the efficiency of emergency restoration works considering the issues of organizational character and constructive and technological features of the modern level of development of equipment, technologies and materials have been suggested and suggestions for improving the existing practice of emergency restoration works have been formulated.

Keywords: artificial structures, structural deformations, impacts, restoration, methods, materials, organization of work, ways to improve efficiency.

For citation: Okost, M. V. Study of ways to increase recovery efficiency bridges as a result of occurred structural deformations / M. V. Okost, A. V. Morozov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 184–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_184.

Сведения об авторах

Окост Максим Викторович

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

Морозов Андрей Владимирович

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

Information about the authors

Okost Maksim Victorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Track and Track Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Morozov Andrey Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Physics»,
Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: cpd@rgups.ru

В. Л. Шаповалов, П. В. Харламов, А. Г. Кочур

АНАЛИЗ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ИСКУССТВЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Выполнен анализ воздействий природного и техногенного характера, а также воздействий, вызванных злонамеренными и военными действиями, на искусственные сооружения железнодорожного транспорта. Одним из таких сооружений наиболее, подверженных внешним воздействиям, являются мостовые сооружения через водные преграды. Рассмотрено множество воздействий различной природы, оценены наиболее значимые с точки зрения вероятности их возникновения и способности привести к полному отказу искусственных сооружений. Определены вероятные виды разрушений и применяемые виды восстановительных работ. Предложены несколько видов сценариев развития ситуации при половодье, паводке, подтоплении, наводнении и подрыве конструкции.

Ключевые слова: искусственные сооружения, мосты, разрушения, воздействия, восстановление.

Для цитирования: Шаповалов, В. Л. Анализ сценариев развития ситуации при различных воздействиях на искусственные сооружения железных дорог / В. Л. Шаповалов, П. В. Харламов, А. Г. Кочур // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 209–223. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_209.

Введение

Железнодорожный транспорт является одним из ключевых элементов экономического развития Российской Федерации. На его долю приходится большая часть перевозки грузов (в мирное время – более 70 % грузопассажирских перевозок, в военное время – более 80 %). В современных условиях возросла его значимость по перевозке пассажиров в регионах, где ограничено действие воздушного транспорта. С точки зрения обороноспособности также ключевым видом транспорта для оперативной переброски ресурсов является железнодорожный транспорт, способный справляться с большими объемами перевозок на большие расстояния. Поскольку железнодорожный транспорт обеспечивает большие объемы перевозок на значительные расстояния, имеет достаточно протяженную и разветвленную сеть с большим количеством сложных инженерных объектов, таких как мосты и тоннели, он достаточно сильно уязвим перед стихийными внешними воздействиями природного и техногенного характера в мирное и военное время.

В мирное время основную опасность представляют воздействия природного и техногенного характера. В работах зарубежных авторов отмечается, что оползни, проливные дожди и наводнения оказывают наибольшее влияние на функционирование любой наземной транспортной инфраструктуры. При этом установлено, что наиболее вероятными потенциально критическими элементами инфраструктуры являются развязки автомагистралей, автобусные и железнодорожные станции, мосты и тоннели. Например, тоннели и мосты являются наиболее сложными элементами дорожной инфраструктуры и вывод из их строя приведет к нарушению работы всего участка дороги на длительный период времени. Техническая сложность восстановления таких объектов, временные и финансовые ограничения, намного выше, чем в случае восстановления линейных участков автомобильных и железных дорог, где нет мостов и тоннелей. Поэтому эти элементы рассматриваются в некоторых странах как потенциальные элементы критической инфраструктуры.

Зарубежные организации для исследования угроз критически важных элементов транспортной инфраструктуры и оценки рисков используют международный стандарт ISO 31000 [1], в котором содержится информация об идентификации источников риска и последующий анализ рисков. Отечественным аналогом являются национальные стандарты ГОСТ 33433-2015 и ГОСТ Р ИСО 31000-2019 [2, 3].

Последствия, возникающие на сети железных дорог Российской Федерации, вызванные такого рода воздействиями, требуют незамедлительного реагирования всех причастных служб и подразделений для организации восстановительных работ с привлечением людских, материальных и технических

ресурсов. Наибольшую проблему вызывают разрушения сложных инженерных конструкций больших и средних мостов, эстакад, тоннелей или иных объектов, расположенных в труднодоступных местах.

Обеспечение устойчивого функционирования железных дорог в мирное и военное время возлагается на Министерство транспорта, Федеральное агентство железнодорожного транспорта (Росжелдор), ОАО «РЖД» (РЖДстрой, Росжелдорпроект), Министерство обороны (Железнодорожные войска). В период проведения военных действий оборот грузов железнодорожным транспортом возрастет в значительной степени, что повышает значимость железнодорожных войск (ЖДВ) Министерства обороны в системе транспортного обеспечения государства.

Стихийные бедствия природного характера

Одним из видов воздействий, оказывающих влияние на работу искусственных сооружений, являются воздействия природного характера, которые могут стать причиной разрушения объектов транспортной инфраструктуры и привести к остановке движения. Поскольку воздействиям могут подвергаться в том числе средние, большие и внеклассные мосты и тоннели, нарушение их работы может привести к длительным перерывам движения и является негативным событием во многих сферах деятельности.

Согласно [4], опасные природные явления разделяются на метеорологические, агрометеорологические, гидрологические, морские гидрометеорологические, гелиогеофизические. В каждую группу входят различные явления, в общей сложности их насчитывается 55. Из общего перечня можно выделить те, которые могут оказывать влияние на функционирование искусственных сооружений и привести к частичному или полному отказу сооружения. В табл. 1 представлены 18 видов опасных явлений.

Таблица 1

Виды опасных явлений, способных влиять на функционирование искусственных сооружений

| № п/п | Группа опасных явлений | Опасное явление |
|-------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Метеорологические | Очень сильный ветер |
| 2 | | Ураганный ветер (ураган) |
| 3 | | Шквал |
| 4 | | Смерч |
| 5 | | Сильный ливень |
| 6 | | Очень сильный дождь (очень сильный дождь со снегом, очень сильный мокрый снег, очень сильный снег с дождем) |
| 7 | | Очень сильный снег |
| 8 | | Продолжительный сильный дождь |
| 9 | | Сильное гололедно-изморозевое отложение |
| 10 | | Сход снежных лавин |
| 11 | Гидрологические | Половодье |
| 12 | | Зажор |
| 13 | | Затор |
| 14 | | Паводок |
| 15 | | Сель |
| 16 | Морские гидрометеорологические | Цунами |
| 17 | | Очень сильный ветер |
| 18 | | Ураганный ветер (ураган) |

В этот перечень не вошли, например, сейсмические воздействия и таяние вечной мерзлоты, которые также могут стать причиной разрушения искусственных сооружений.

В приложении В (таблица В.1) [5] приведены зарегистрированные проявления опасных геологических процессов на территориях субъектов Российской Федерации. К опасным геологическим процессам в документе отнесены оползни, обвалы, сели, лавины, карст, подтопление, переработка берега, пучения, наледообразования, термокарст и затопление. Из этих процессов в качестве воздействий, приводящих к нарушению работы искусственных сооружений, можно отнести почти все явления за исключением пучения и наледообразования. В табл. 2 приведены данные о распределении зарегистрированных случаев опасных геологических процессов в регионах России.

Таблица 2

Распределение геологических опасностей по регионам

| № п/п | Вид опасного геологического процесса | Количество регионов с зарегистрированным явлением, шт. | Доля регионов из общего количества с зарегистрированным явлением, % |
|-------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1 | Оползни | 61 | 77,2 |
| 2 | Обвалы | 14 | 17,7 |
| 3 | Сели | 10 | 12,7 |
| 4 | Лавины | 4 | 8,9 |
| 5 | Карст | 63 | 79,7 |
| 6 | Подтопление | 78 | 98,7 |
| 7 | Переработка берега | 37 | 43 |
| 8 | Термокарст | 9 | 11,4 |
| 9 | Затопление | 25 | 31,6 |

Из табл. 2 видно, что наиболее распространенным геологическим процессом в территориальном плане является подтопление. Также распространены оползни и карсты, наименьшее распространение получили лавины и термокарсты.

На основе анализа литературы можно отметить, что наиболее частыми опасными явлениями природного характера являются наводнения, ураганы, бури, тайфуны, смерчи, сильные или особо длительные дожди, землетрясения, сильные снегопады и метели, оползни и обвалы. В табл. 3 приведено распределение опасных явлений в процентном соотношении.

Таблица 3

Распределение опасных природных явлений по видам

| № п/п | Виды опасных природных явлений | Количество зарегистрированных случаев по отношению к общему числу опасных природных явлений, % | | | | |
|-------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| | | Усредненные данные из интернет-источников | За 2006 г. [6] | В период с 2002 по 2007 г. [7] | Государственный доклад, 2020 г., среднее значение за 2019–2020 гг. | Среднее по рассмотренным источникам |
| 1 | Наводнения | 34 | 44 | 36 | 27 | 35 |
| 2 | Ураганы, бури, тайфуны, смерчи | 19 | – | 13 | 13 | 15 |
| 3 | Сильные или особо длительные дожди | 14 | – | – | 5 | 10 |
| 4 | Землетрясения | 8 | 6 | 13 | 1 | 7 |
| 5 | Сильные снегопады и метели | 8 | – | 13 | 5 | 9 |
| 6 | Оползни и обвалы | 5 | – | – | 1 | 3 |

Вышеприведенные данные дают возможность определить те опасности, которые имеют небольшую вероятность проявления, что позволит учитывать уязвимость инженерных сооружений перед вероятными воздействиями с учетом их повторяемости.

В табл. 4 приведены данные из ежегодных отчетов МЧС России о случаях ЧС природного характера на территории Российской Федерации [9–12], к которым отнесены землетрясения, извержения вулканов, опасные геологические явления (оползни, сели, обвалы, осыпи), бури, ураганы, смерчи,

шквалы, сильный дождь, сильный снегопад, крупный град, снежные лавины, заморозки, засуха, морские опасные гидрологические явления (сильное волнение, напор льдов, обледенение судов), отрыв прибрежных льдов, опасные гидрологические явления и крупные природные пожары.

Таблица 4

Чрезвычайные ситуации природного характера по виду источников возникновения

| Чрезвычайные ситуации природного характера по виду источников возникновения | Год | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------|------|------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|---------|
| | 2021 | 2020 | 2019 | 2018 | 2021 | 2020 | 2019 | 2018 | Среднее |
| | Количество зарегистрированных случаев, шт. | | | | Доля зарегистрированных случаев из общего количества, % | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Землетрясения, извержения вулканов | 0 | 2 | 0 | 0 | 0,0 | 1,9 | 0,0 | 0,0 | 0,5 |
| Опасные геологические явления (оползни, сели, обвалы, осыпи) | 2 | 1 | 2 | 0 | 1,8 | 1,0 | 4,1 | 0,0 | 1,7 |
| Бури, ураганы, смерчи, шквалы | 27 | 20 | 2 | 1 | 24,5 | 19,2 | 4,1 | 2,3 | 12,5 |
| Сильный дождь, сильный снегопад, крупный град | 10 | 6 | 9 | 11 | 9,1 | 5,8 | 18,4 | 25,0 | 14,6 |
| Снежные лавины | 3 | 0 | 1 | 0 | 2,7 | 0,0 | 2,0 | 0,0 | 1,2 |
| Заморозки, засуха | 14 | 13 | 12 | 14 | 12,7 | 12,5 | 24,5 | 31,8 | 20,4 |
| Морские опасные гидрологические явления (сильное волнение, напор льдов, обледенение судов) | 0 | 7 | 0 | 0 | 0,0 | 6,7 | 0,0 | 0,0 | 1,7 |
| Отрыв прибрежных льдов | 2 | 1 | 0 | 1 | 1,8 | 1,0 | 0,0 | 2,3 | 1,3 |
| Опасные гидрологические явления | 28 | 29 | 17 | 12 | 25,5 | 27,9 | 34,7 | 27,3 | 28,8 |
| Крупные природные пожары | 24 | 25 | 6 | 5 | 21,8 | 24,0 | 12,2 | 11,4 | 17,4 |
| Всего | 110 | 104 | 49 | 44 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | |

На диаграмме, приведенной на рис. 1, показано распределение зарегистрированных случаев в долях от общего количества, усредненного за четырехлетний период.

Из диаграммы видно, что наиболее часто зарегистрированным явлением за последние четыре года можно считать опасные гидрологические явления.

Результаты данного раздела использованы для формирования общей схемы, описывающей взаимосвязь воздействий и их последствий с учетом вероятности их возникновения и разрушающей способности искусственных сооружений.

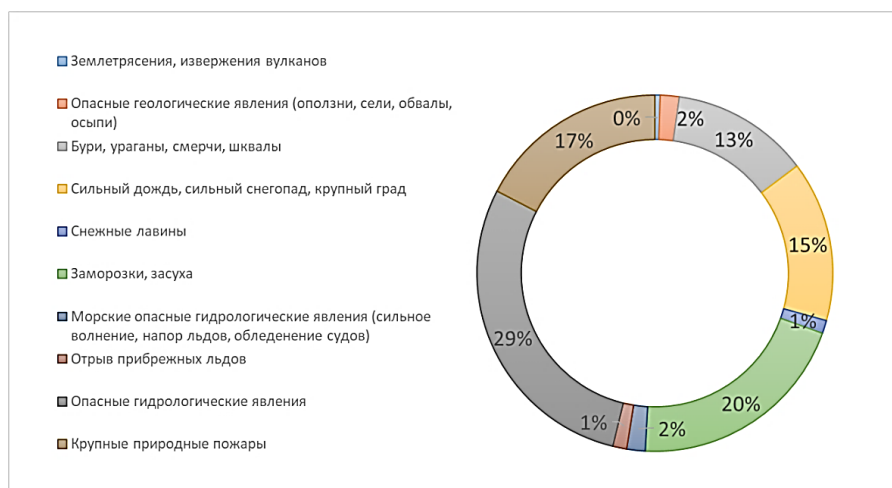


Рис. 1. Распределение зарегистрированных случаев ЧС в долях от общего количества

Стихийные бедствия техногенного характера

Еще одним из видов воздействий, оказывающих негативное влияние на безотказную работу искусственных сооружений, являются воздействия техногенного характера. К стихийным бедствиям техногенного характера можно отнести деформации, повреждения и разрушения мостовых сооружений, наступившие в результате следующих причин:

а) ошибки при разработке проектов производства работ и технологических схем – неточности в расчетах, некачественный выбор (подбор) конструктивных решений и строительных материалов, приводящий к потере несущей способности и устойчивости конструктивных элементов, недоучет ветровой нагрузки и аэродинамической устойчивости, приводящий к опрокидыванию высоких опор и т.п.;

б) отступления от проекта производства работ и грубые нарушения технологических процессов строительства – использование некачественных или не предусмотренных проектом строительных материалов, отступления от утвержденных конструктивно-технологических решений, отсутствие строительного надзора и т.п.;

в) отсутствие должного технического обслуживания и мониторинга за состоянием искусственных сооружений, приводящее к появлению и развитию дефектов в конструктивных элементах искусственных сооружений;

г) нарушение безопасности движения (халатность) – повреждения в результате схода подвижного состава, повреждения конструктивных элементов при несоблюдении установленных габаритов перевозимых грузов или транспортных средств, повреждения мостов в результате таранных воздействий (навала) речных судов на опоры, перегрузка несущих конструкций подвижной нагрузкой, повреждения в результате аварий трубопроводов, проложенных под железнодорожными путями вблизи мостовых опор, а также нецелевое использование подмостового пространства (гаражи, торговые точки, склады, автостоянки) при их расположении под мостами и путепроводами, приводящее к нарушению габарита подмостового пространства, пожарам, взрывам и пр.

Следует отметить, что статистическая информация о произошедших авариях на железнодорожных мостах в официальных источниках в открытом доступе ограничена или отсутствует. Однако некоторые интернет-издания публикуют такую информацию с указанием возможных причин наступления аварий. Например, на ресурсе LiveJournal со ссылкой на сайт <http://www.bridgeart.ru> [8] опубликована некоторая статистика аварий мостов в России и СНГ за пять лет. Указывается, что к пяти основным причинам аварий мостов относятся (терминология сохранена):

а) снижение грузоподъемности из-за отсутствия надлежащего содержания (мост может упасть как от собственного веса (15 случаев), так и после проезда большегруза (8 случаев) – 33,8 %;

б) нерасчетный паводок либо просчеты в гидрологии и геологии (14 случаев) – 20,6 %;

в) въезд тяжелых грузовиков в опоры или движение самосвалов с поднятым кузовом (в основном пешеходные мосты) 9 случаев – 13,2 %;

г) нарушение технологии производства работ или проекта производства работ (8 случаев) – 11,8 %;

д) превышение проектной грузоподъемности старых мостов и ошибки проектирования новых (по 4 случая) – 5,9 %.

Средние значения зарегистрированных случаев ЧС по федеральным округам, усредненные за 2019–2021 гг. приведены в табл. 5, где показано распределение по количеству случаев и в долях от общего количества.

Таблица 5

Распределение зарегистрированных случаев ЧС по федеральным округам

| Федеральный округ | Техногенные ЧС, ед. | Природные ЧС, ед. | Доля техногенных ЧС, % | Доля природных ЧС, % |
|-------------------|---------------------|-------------------|------------------------|----------------------|
| Дальневосточный | 22,0 | 19,3 | 11,8 | 22,1 |
| Сибирский | 25,3 | 8,0 | 13,6 | 9,1 |
| Уральский | 11,0 | 3,3 | 5,9 | 3,8 |
| Приволжский | 35,7 | 23,0 | 19,1 | 26,2 |
| Южный | 27,7 | 13,3 | 14,8 | 15,2 |
| Северо-Кавказский | 10,7 | 10,7 | 5,7 | 12,2 |
| Северо-Западный | 17,3 | 4,7 | 9,3 | 5,3 |
| Центральный | 36,7 | 5,7 | 19,7 | 6,5 |
| <i>Итого</i> | 186,3 | 87,7 | 100,0 | 100,0 |

Данные из табл. 5 представлены в виде диаграмм на рис. 2, где показано распределение зарегистрированных случаев ЧС техногенного и природного характера по федеральным округам.

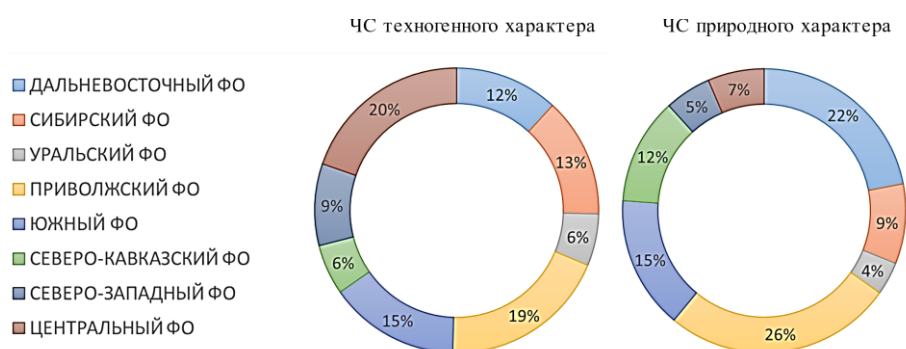


Рис. 2. Распределение зарегистрированных случаев ЧС техногенного и природного характера по федеральным округам

Основываясь на полученных данных, можно утверждать, что наиболее вероятными событиями вследствие природных ЧС будут являться события, связанные с опасными гидрологическими явлениями (29 % от общего количества зарегистрированных случаев), которые будут в большей степени оказывать воздействие на водопропускные сооружения и объекты железнодорожной инфраструктуры, находящиеся в непосредственной близости от источника опасности. При этом наибольшее количество природных ЧС регистрируется в Приволжском и Дальневосточном федеральных округах. В общей сложности на эти регионы приходится почти половина случаев ЧС природного характера (48,3 %). Таким образом, при планировании аварийно-восстановительного запаса нужно обращать внимание на распределение случаев ЧС по регионам, что позволит оптимизировать расположение баз хранения и объемы запасов средств на них, а при необходимости проведения восстановительных мероприятий сократить время на доставку элементов конструкций и необходимых материалов.

Злонамеренные действия (акт незаконного вмешательства)

В соответствии с ФЗ N16 от 09.02.2007 (подготовлена ред. от 14.03.2022) «О транспортной безопасности» акт незаконного вмешательства (АНВ) – это противоправное действие (бездействие), в том числе террористический акт, угрожающее безопасной деятельности транспортного комплекса, повлекшее за собой причинение вреда жизни и здоровью людей, материальный ущерб либо создавшее угрозу наступления таких последствий. Искусственные сооружения (железнодорожные мосты, а именно их опоры, устои, пролетные строения, материалы верхнего строения пути, здания и сооружения охраны и

обслуживающего персонала, путепроводы, эстакады, селеспуски, тоннели) относятся к третьей группе объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ), для которых выполняется оценка уязвимости и категорирование. В соответствии с Приказом Минтранса РФ N 52, ФСБ РФ N 112, МВД РФ N 134 от 05.03.2010 «Об утверждении Перечня потенциальных угроз совершения актов незаконного вмешательства в деятельность объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств» установлены следующие виды угроз: угроза захвата, угроза взрыва, угроза размещения или попытки размещения на ОТИ и/или транспортных средствах (ТС) взрывных устройств (взрывчатых веществ), угроза поражения опасными веществами, угроза захвата критического элемента ОТИ и/или ТС, угроза взрыва критического элемента ОТИ и/или ТС, угроза размещения или попытки размещения на критическом элементе ОТИ и/или ТС взрывных устройств (взрывчатых веществ), угроза блокирования, угроза хищения.

Основными нормативно-правовыми актами, регламентирующими работу в области транспортной безопасности, в настоящее время являются:

а) Федеральный закон от 09.02.2007 № 16-ФЗ «О транспортной безопасности» – устанавливает понятие транспортной безопасности, ответственность субъекта транспортной инфраструктуры за обеспечение транспортной безопасности ОТИ и ТС;

б) Указ Президента РФ от 31.03.2010 № 403 «О создании комплексной системы обеспечения безопасности населения на транспорте» – устанавливает ответственность Минтранса России за создание комплексной системы обеспечения безопасности населения на транспорте и сроки обеспечения защиты критически важных ОТИ;

в) постановление Правительства РФ от 29.12.2020 N 2344 «Об уровнях безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств и о порядке их объявления (установления)» – устанавливает три уровня безопасности ОТИ, по умолчанию всегда действует 1-й уровень, 2-й и 3-й уровни объявляются при повышенных угрозах;

г) постановление Правительства РФ от 31.03.2009 № 289 (ред. от 15.09.2020) «Об утверждении Правил аккредитации юридических лиц для проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств» – определяет, каким образом проводится оценка уязвимости ОТИ при аккредитации специализированными организациями;

д) приказ Минтранса России от 15.09.2020 N 377 «Об утверждении Порядка ведения реестра объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств» (зарегистрирован в Минюсте России 09.11.2020 N 60800) – регламентирует запись об ОТИ в реестр по указанию компетентного органа, в который направляются данные об объекте. Последний принимает решение о включении ОТИ в реестр и присваивает соответствующую категорию (по методике категорирования). Далее субъекту транспортной инфраструктуры и в Ространснадзор направляется уведомление о включении категорированного объекта или ТС в реестр;

е) приказ Минтранса России от 02.07.2021 N 225 «Об утверждении Порядка разработки планов обеспечения транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры и (или) судов ледокольного флота, используемых для проводки по морским путям, судов, в отношении которых применяются правила торгового мореплавания и требования в области охраны судов и портовых средств, установленные международными договорами Российской Федерации» (зарегистрирован в Минюсте России 11.10.2021 N 65374) – устанавливает, что план обеспечения транспортной безопасности ОТИ разрабатывается субъектом на основании результатов оценки уязвимости ОТИ. В приказе определены содержание плана обеспечения транспортной безопасности, порядок его направления в компетентный орган управления транспортной безопасности и срок ответа управления транспортной безопасности субъекту;

ж) приказ Минтранса России, ФСБ России, МВД России от 05.03.2010 № 52/112/134 «Об утверждении перечня потенциальных угроз совершения актов незаконного вмешательства в деятельность объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств» – определяет обобщенный перечень угроз для формирования модели нарушителя в концепции обеспечения транспортной безопасности;

и) приказ Минтранса России от 01.11.2021 N 370 «О Порядке проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры, судов ледокольного флота, используемых для проводки по морским путям, судов, в отношении которых применяются правила торгового мореплавания и требования в области охраны судов и портовых средств, установленные международными договорами Российской Федерации» (зарегистрирован в Минюсте России 30.11.2021 N 66134) – устанавливает порядок проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры;

к) постановление Правительства РФ от 03.10.2020 N 1595 «Об утверждении Правил категорирования и установления количества категорий объектов транспортной инфраструктуры» – устанавливает основные правила категорирования ОТИ;

л) распоряжение Минтранса России от 10.06.2005 № ИЛ-62-р «О мерах по обеспечению защищенности опасных и критически важных для национальной безопасности объектов транспортного комплекса России от террористических проявлений и угроз техногенного характера» – поручает уполномоченным организациям создание перечня критически важных ОТИ и подготовку методики категорирования и оценки уязвимости;

м) распоряжение Правительства РФ от 05.11.2009 № 1653-р (ред. от 03.02.2020) «Об утверждении перечня работ, непосредственно связанных с обеспечением транспортной безопасности» – устанавливает перечень работ по объектам транспортной безопасности и ОТИ, включая аккредитацию, категорирование, оценку уязвимости, разработку планов безопасности, контроль и надзор, формирование и введение автоматизированной централизованной базы персональных данных о пассажирах.

В соответствии с представленной нормативной документацией можно выделить угрозы, характерные для них примеры АНВ (табл. 6) и характер разрушений при совершении актов незаконного вмешательства (табл. 7).

Таблица 6

Угрозы и характерные для них примеры АНВ

| Угроза для ОТИ | Характерный пример АНВ |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Размещение или попытка размещения взрывного устройства | Размещение нарушителем взрывного устройства на верхнем строении железнодорожного пути на мосту |
| Взрыв (обстрел) критического элемента ОТИ | Обстрел из гранатомета опоры железнодорожного моста |
| Размещение или попытка размещения на критическом элементе ОТИ взрывных устройств | Размещение нарушителем взрывного устройства под опорой железнодорожного моста |

Таблица 7

Характер разрушений при совершении АНВ

| ИССО | Характер разрушений |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Верхнее строение пути | Вывод из строя верхнего строения пути путем размещения взрывного устройства. Частичная разборка верхнего строения пути |
| Деревянные низководные мосты | Разрушаются опоры (чем ниже источник взрыва, тем хуже) и пролетные строения (перебиваются, по меньшей мере в одном сечении, основные несущие элементы). Для многопролетных низководных мостов наиболее вероятные места разрушений – береговые и промежуточные опоры, а также пролетные строения |
| Деревянные высоководные мосты | Наиболее вероятным местом разрушений являются места над опорами. Характер разрушений – повреждение концевых частей пролетных строений и верхних частей опор |
| Металлические мосты с пролетом до 10 м | Наиболее вероятным местом разрушений являются опоры |
| Металлические мосты с ездой понизу (поверху) с пролетом от 10 до 25 м | Наиболее вероятные места разрушений – перебивание нижних (верхних) главных ферм в середине пролета (как наиболее доступные места для совершения АНВ) и береговые опоры. Менее вероятные места разрушения – промежуточные опоры (быки) в произвольном сечении |
| Металлические мосты (разрезной конструкции) с пролетом более 25 м | Наиболее вероятные места разрушений – перебивание нижних (верхних) главных ферм в середине пролета (как наиболее доступные места для совершения АНВ), береговые опоры и верхние части быков. Менее вероятные места разрушения – нижняя часть быков (около уровня воды или под водой) в произвольном сечении |

Окончание табл. 7

| ИССО | Характер разрушений |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Металлические мосты (неразрезной конструкции) с пролетом более 25 м | Наиболее вероятные места разрушений – перебивание поясов ферм (как наиболее доступные места для совершения АНВ), береговые опоры и верхние части быков. Менее вероятные места разрушения – нижняя часть быков (около уровня воды или под водой) в произвольном сечении |
| Висячие металлические мосты | Наиболее вероятные места разрушений – пилоны, узлы крепления (якорения) и пролетные строения с обрушением по оси моста. Менее вероятные места разрушения – подвесные пояса или ванты, состоящие из стальных тросов, цепей или полос |
| Вантовые мосты | Наиболее вероятные места разрушений – балка жесткости, узлы крепления (якорения) вант и пролетные строения с обрушением по оси моста. Менее вероятные места разрушения – подвесные пояса или ванты, состоящие из стальных тросов, цепей или полос |
| Металлический путепровод | Наиболее вероятные места разрушений – пролетные строения, устои и стойки промежуточных опор |
| Балочные железобетонные мосты разрезной и неразрезной конструкции | Наиболее вероятные места разрушений – пролетные строения, устои. Менее вероятные места разрушения – нижняя часть промежуточных опор (около уровня воды или под водой) в произвольном сечении |
| Арочные мосты | Наиболее вероятные места разрушений – пролетные строения, устои. Менее вероятные места разрушения – нижняя часть промежуточных опор (около уровня воды или под водой) |
| Железобетонный путепровод рамной конструкции | Наиболее вероятные места разрушений – пролетные строения, устои и стойки. Общий характер разрушений при неблагоприятном исходе АНВ – направленное обрушение конструкции моста |
| Виадук | Наиболее вероятные места разрушений – верхнее строение и опоры |
| Тоннель | Наиболее вероятные места разрушений – верхнее строение пути, завал входного/выходного портала, обрушения в средней части тоннеля |
| Труба | Наиболее вероятные места разрушений – входное/выходное отверстие трубы, верхний свод |

Военные действия

Во время боевых действий искусственные сооружения получают либо полные, либо частичные разрушения в зависимости от поставленных боевых задач. Данные задачи могут быть выполнены методом подрыва конструкций (в том числе и с воды), артиллерийскими ударами, ракетно-бомбовыми ударами, высокоточным оружием разного класса, ядерным оружием малой мощности. Однако, независимо от выбранного метода воздействия для выполнения поставленной задачи, в зависимости от конструктивных особенностей искусственных сооружений для целеуказаний выбираются самые уязвимые конструктивные точки.

Так, например, для разрушения металлических мостов обычно подрываются или пролетные строения, или только опоры, а иногда пролетные строения и опоры одновременно. При разрушении опор однопролетного моста возможен случай подрыва только одной опоры и обрушение пролетного строения одним концом или же подрыв обоих устоев и полное обрушение пролетного строения. В многопролетных мостах обычно подрываются быки, так как подрывание быка влечет за собой одновременно обрушение двух смежных пролетных строений.

Деревянные мосты могут разрушаться: сжиганием, подрыванием и механическими средствами (перепиливанием свай или прогонов, тракторами, танками и др., путем захвата тросом за отдельные части моста и стаскивания их).

Разрушение труб производится или под сводом (при отверстии трубы до 2 м) или над трубой (при отверстии более 2 м). Разрушение земляного полотна производится преимущественно на участках, которые являются наиболее трудными для восстановления: высокие насыпи; насыпи на подходах к искусственным сооружениям; насыпи, расположенные в болотистой местности; глубокие и сырые

выемки; земляное полотно на переездах преимущественно в разных уровнях. Основными способами разрушения земляного полотна являются подрывание, перекапывание, завал и размыв.

Воздействия и их последствия

Для определения взаимосвязи видов воздействий с вероятными разрушениями из всего многообразия рассмотренных воздействий на искусственные сооружения природного и техногенного характера среди воздействий при незаконном вмешательстве и в результате военных действий выделены те, которые представляют наибольшую опасность с точки зрения вероятности их возникновения и значимости возможных разрушений. В результате определены восемь наиболее опасных воздействий, таких как половодье, паводок, подтопление, наводнение, сель, оползни, землетрясения, перегрузка несущих конструкций подвижной нагрузкой, таранные воздействия (навал) речных судов, подрыв конструкции, появление и развитие дефектов в конструктивных элементах (прогрессирующее разрушение). Рассмотренные воздействия могут приводить к различным разрушениям. При этом разные воздействия могут приводить к сходным разрушениям. Сопоставление видов разрушений с воздействиями приведено на рис. 3.

| ВОЗДЕЙСТВИЯ | ВЕРОЯТНЫЕ РАЗРУШЕНИЯ | № ВОЗДЕЙСТВИЯ |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 1. Половодье, паводок, подтопление, наводнение | Размыв грунтов и потеря несущей способности (основание, земляное полотно) | 1, 2 |
| 2. Сель | Разрушение берегов и русла | 1-4 |
| 3. Оползни | Разрушение подходов к ИССО | 1-4, 7 |
| 4. Землетрясения | Разрушение верхнего строения пути | 3-8 |
| 5. Перегрузка несущих конструкций подвижной нагрузкой | Подмыв опор (устоя) | 1, 2 |
| 6. Таранные воздействия (навал) речных судов | Смещение или потеря устойчивости опор (устоя) | 1-4, 7-8 |
| 7. Подрыв конструкции | Разрушение опор (устоя) | 1-4, 7-8 |
| 8. Появление и развитие дефектов в конструктивных элементах (прогрессирующее разрушение) | Смещение или падение пролета | 2-4, 6-8 |
| | Падение пролета | 2-4, 6-8 |
| | Разрушение пролета | 2-5, 7-8 |
| | Обрушение породы | 4, 7 |

Рис. 3. Взаимосвязь между воздействиями и возможными разрушениями

Также различные виды разрушений могут устраняться однотипными видами работ. Такая взаимосвязь показана на рис. 4, где цифрами обозначен порядковый номер вероятного разрушения.

| ВЕРОЯТНЫЕ РАЗРУШЕНИЯ | СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ | № РАЗРУШЕНИЯ |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------|
| 1. Размыв грунтов и потеря несущей способности (основание, земляное полотно) | Отсыпка грунтов и инертных материалов | 1-5, 11 |
| 2. Разрушение берегов и русла | Выравнивание промежуточной опоры | 5, 6 |
| 3. Разрушение подходов к ИССО | Замена (восстановление) устоя | 5-7 |
| 4. Разрушение верхнего строения пути | Замена (восстановление) промежуточной опоры | 5-7 |
| 5. Подмыв опор (устоя) | Установка пролета в проектное положение | 8, 9 |
| 6. Смещение или потеря устойчивости опор (устоя) | Замена (монтаж) пролета | 9, 10 |
| 7. Разрушение опор (устоя) | | |
| 8. Смещение или падение пролета | | |
| 9. Падение пролета | | |
| 10. Разрушение пролета | | |
| 11. Обрушение породы | | |

Рис. 4. Взаимосвязь между возможными разрушениями и способом их восстановления



Рис. 6. Варианты сценариев при подарыве конструкций



Рис. 7. Разрушения и способы их восстановления

Вывод

К наиболее часто возникающим стихийным бедствиям природного характера относятся наводнения, ураганы, бури, тайфуны, смерчи, сильные или особо длительные дожди, землетрясения, сильные снегопады и метели, оползни и обвалы. При этом могут возникать несколько видов воздействий, одновременно провоцирующих сопутствующие воздействия и способствующих развитию более сильных воздействий. Их процентное соотношение по частоте проявления приведено в табл. 3 и 4.

Причинами стихийных бедствий техногенного характера являются ошибки в расчетах, грубое нарушение технологий строительства или отступление от проекта, отсутствие установленного технического обслуживания, а также несоблюдение безопасности движения при перевозке негабаритных грузов. Такие воздействия приводят к повреждению конструктивных элементов как в процессе эксплуатации сооружения, так и на стадии его строительства, например, крен или падение опоры, падение, опрокидывание или сдвигка пролета, разрушение опорных частей, трещины, коррозия, прогибы и сдвиги, приводящие к ограничению в эксплуатации (частичному отказу сооружения) или закрытию движения (полному отказу). Недопущение указанных отказов может быть достигнуто путем проведения комплекса мероприятий, включающих в себя усиление контроля качества строительства, повышение уровня знаний и совершенствование компетенций проектировщиков и строителей, тщательную экспертизу особо важных и технически сложных проектов, а также проведение технической учебы, способствующей формированию должного уровня ответственности работников, занятых в транспортной отрасли.

Из всех рассмотренных воздействий определены восемь наиболее опасных воздействий, таких как паводок, наводнение, подтопление, навал, оползни, землетрясения, перегрузка несущих конструкций подвижной нагрузкой, таранные воздействия (навал) речных судов, подрыв конструкции, появление и развитие дефектов в конструктивных элементах (прогрессирующее разрушение), которые приводят к 11 вероятным разрушениям и шести типовым способам восстановления. Такие виды воздействий, вероятных разрушений и способов восстановления приводят к возникновению 104 сценариев развития событий после возникновения различного рода воздействий, в результате которых произойдет критическое повреждение искусственного сооружения.

Список литературы

1 **Международный стандарт ISO 31000. Risk management.** – Guidelines, IDT (ISO 31000 Управление рисками). Документ разработан ISO/TC 262 Risk management и опубликован 2018-02. 2018. – 19 с.

2 **ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство :** национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 декабря 2019 г. N 1379-ст. – Москва : Стандартформ, 2020. – 14 с.

3 **ГОСТ 33433-2015. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте :** межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 декабря 2015 г. N 2108-ст : межгосударственный стандарт ГОСТ 33433-2015 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 сентября 2016 г. – Москва : Стандартформ, 2020. – 35 с.

4 **Д 52.88.699-2008. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений :** руководящий документ : введен в действие приказом

References

1 **International Standard ISO 31000. Risk management.** – Guidelines, IDT (ISO 31000 Risk Management). The document was developed by ISO/TC 262 Risk management and published 2018-02. 2018. – 19 p.

2 **GOST R ISO 31000-2019. Risk management. Principles and guidance:** national standard of the Russian Federation : official edition : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 10, 2019. No. 1379-st. – Moscow : Standartform, 2020. – 14 p.

3 **GOST 33433-2015. Functional safety. Risk management in railway transport:** interstate standard: official edition : by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 4, 2015 N 2108-st : the interstate standard GOST 33433-2015 was put into effect as the national standard of the Russian Federation from September 1, 2016. – Moscow : Standartform, 2020. – 35 p.

4 **D 52.88.699-2008. Regulation on the procedure for the actions of institutions and organizations in the event of a threat of occurrence and occurrence of hazardous natural phenomena :** a guiding document : put into effect by order of Roshydromet

Росгидромета от 16.10.2008 N 387. – Москва, 2008. – 35 с.

5 **СП 116.13330.2012.** Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения : свод правил : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. N 274 и введен в действие с 1 января 2013 г. – Москва, 2012. – 65 с.

6 **Zanetti, A.** Natural catastrophes and man-made disasters in 2006 : low insured losses / Zanetti, A., Schwarz, S., Lindemuth, A. // Sigma Insurance Research. – No. 2. – 2007. – P. 1–40.

7 **Бондур, В. Г.** Мониторинг и прогнозирование природных катастроф / В. Г. Бондур, В. Ф. Крапивин, В. П. Савиных. – Москва : Научный мир, 2009. – 629 с. – ISBN 978-5-91522-125-2.

8 Статистика аварий мостов в России и СНГ за 5 лет : сайт. – URL: <http://www.bridgeart.ru> (дата обращения: 09.03.2023).

9 Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2018. – URL: https://53.mchs.gov.ru/uploads/resource/2022-09-13/2018-god_16630798311353621584.pdf (дата обращения: 09.03.2023).

10 Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2019. – URL: <https://static.mchs.gov.ru/uploads/document/2020-05-21/e69e310b09363f0e94ca105ab2fe5c75.pdf> (дата обращения: 09.03.2023).

11 Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2020. – URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2021-05-14/61966f9e46aefc2a1cd01a1a3994a295.pdf> (дата обращения: 09.03.2023).

12 Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / Министерство Российской Федерации по

dated October 16, 2008 No. 387. – Moscow, 2008. – 35 p.

5 **SP 116.13330.2012.** Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic provisions : set of rules : approved by order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) of June 30, 2012 N 274 and put into effect on January 1, 2013. – Moscow, 2012. – 65 p.

6 **Zanetti, A.** Natural catastrophes and man-made disasters in 2006 : low insured losses / Zanetti, A., Schwarz, S., Lindemuth, A. // Sigma Insurance Research, No. 2. – 2007. – P. 1–40.

7 **Bondur, V. G.** Natural disasters / V. G. Bondur, V. F. Krapivin, V. P. Savinykh. – Moscow : Scientific world, 2009. – 629 p. – ISBN 978-5-91522-125-2.

8 Statistics of bridge accidents in Russia and the CIS for 5 years: website. – URL: <http://www.bridgeart.ru> (date of access: 03/09/2023).

9 State report on the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies / Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergency Situations and Elimination of Consequences of Natural Disasters. – 2018. – URL: https://53.mchs.gov.ru/uploads/resource/2022-09-13/2018-god_16630798311353621584.pdf (date of access: 03/09/2023).

10 State report on the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies / Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief. – 2019. – URL: <https://static.mchs.gov.ru/uploads/document/2020-05-21/e69e310b09363f0e94ca105ab2fe5c75.pdf> (date of access: 03/09/2023).

11 State report on the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies / Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief. – 2020. – URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2021-05-14/61966f9e46aefc2a1cd01a1a3994a295.pdf> (date of access: 03/09/2023).

12 State report on the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies / Ministry

делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – 2021. – URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-05-31/ee846937460fb0da28cb210725336ddf.doc> (дата обращения: 09.03.2023).

of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief. – 2021. – URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-05-31/ee846937460fb0da28cb210725336ddf.doc> (date of access: 03/09/2023).

V. L. Shapovalov, P. V. Kharlamov, A. G. Kochur

ANALYSIS OF SCENARIOS FOR THE SITUATION DEVELOPMENT UNDER DIFFERENT IMPACTS ON ARTIFICIAL RAILWAY STRUCTURES

Abstract. The work is devoted to the analysis of the impacts of natural and man-made nature as well as the impacts caused by malicious and military actions on the artificial railway structures. One of these structures most susceptible to external influences are bridge structures across water barriers. The paper considers many influences of various nature. The most significant ones are estimated evaluated in terms of probability of their occurrence and the ability to lead to a complete failure of artificial structures. It is determined that there are probable types of destruction and the applied types of restoration work. Several types of scenarios for the situation development during high water, flooding, underflooding, flood and undermining the structure are proposed.

Keywords: artificial structures, bridges, destruction, impacts, restoration.

For citation: Shapovalov, V. L. Analysis of scenarios for the situation development under different impacts on artificial railway structures / V. L. Shapovalov, P. V. Kharlamov, A. G. Kochur // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 209–223. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_1_209.

Сведения об авторах

Шаповалов Владимир Леонидович

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

Харламов Павел Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Транспортные машины и триботехника»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: kcharlamov@yandex.ru

Кочур Андрей Григорьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Физика»,
доктор физико-математических наук, профессор,
e-mail: agk2007@bk.ru

Information about the authors

Shapovalov Vladimir Leonidovich

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

Kharlamov Pavel Viktorovich

Rostov State University of Railways (RSTU),
Chair «Transport Machines and Tribotechnics»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kcharlamov@yandex.ru

Kochur Andrey Grigorievich

Rostov State University of Railways (RSTU),
Chair «Physics»,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor,
e-mail: agk2007@bk.ru

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 629.4.027.4

DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_224

*И. А. Гайшинец, С. В. Доронин, И. И. Доронина, М. В. Яранцев***БУКСОВЫЙ УЗЕЛ ЛОКОМОТИВА ДЛЯ УСТАНОВКИ ОСЕЙ
КОЛЕСНЫХ ПАР ПО РАДИУСУ КРИВОЙ**

Аннотация. При прохождении железнодорожной тележки криволинейных участков пути возникают значительные силы давления гребней колес на наружную рельсовую нить, которые приводят к повышенному сопротивлению движению и интенсивному боковому износу контактирующих поверхностей. Причиной этому является образование больших величин углов набегания колес на рельсы, поэтому для их устранения применяют управляемые устройства, обеспечивающие радиальную установку осей колесных пар в кривой. Однако недостатки, имеющиеся в известных системах управляемого разворота колесных пар, не дают возможности в полной мере использовать такие системы на тяговом подвижном составе. Для решения данной проблемы в работе представлена модернизированная конструкция буксового узла электровоза. Оценка работоспособности предложенного узла проводилась по результатам прочностного расчета с использованием метода конечных элементов в наиболее неблагоприятных режимах работы буксы. Анализ показал, что модернизированный узел соответствует требованиям к прочности конструкции.

Ключевые слова: вписывание в кривые, износ гребня, колесная пара, радиальная установка, буксовый узел, модернизация, прочностной расчет.

Для цитирования: Буксовый узел локомотива для установки осей колесных пар по радиусу кривой / И. А. Гайшинец, С. В. Доронин, И. И. Доронина, М. В. Яранцев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 224–233. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_224.

Введение

Колесная пара подвижного состава является важной составной частью рельсового транспортного средства, обеспечивающая передачу нагрузок на верхнее строение пути. Увеличение объемов перевозок привело к усложнению условий взаимодействия колеса с рельсом. Вследствие этого главными причинами для обточка колесной пары стал повышенный износ гребня, на долю которого приходится большая часть всех обточек [1, 2].

Как показывают исследования [3], при вписывании подвижного состава в кривые участки пути тележка занимает перекосное положение. Одновременно с этим явлением в каждой тележке поворачиваются оси колесных пар, образуя с поперечной осью тележки углы разворота. Перекашивание тележек и разворот осей колесных пар происходит в направлении противоположном вращению центра масс тележки вокруг центра кривой. При этом в кривых малого радиуса данные углы достигают больших значений, как следствие, гребень колеса первой по ходу колесной пары с большим усилием воздействует на наружный рельс, что ведет к интенсивному износу.

В попытке устранить причину вышеуказанной проблемы многие ученые все больше обращают внимание на создание специальных устройств, обеспечивающих радиальную установку колесных пар (РУКП) в рельсовой колее. Они позволяют расположить оси колесных пар так, чтобы угол набегания колеса на рельс был равен нулю или был близким к нулю. Испытания тележек с управляемыми системами РУКП показывают превосходные результаты в уменьшении износа гребня по сравнению с неуправляемыми и полууправляемыми механизмами [4].

Отличительной особенностью тележек данного типа является наличие привода, осуществляющего передачу разворачивающего момента на колесную пару или тележку. Такие системы можно разделить на три группы: пневматические, гидравлические и механические. Первые две группы используют рабочую жидкость или газ, которые требуют наличие трубопровода, что увеличивает сложность конструкции тележки; помимо этого, эксплуатация в суровых климатических условиях с низкими температурами понижает надежность системы из-за возможности его обрыва. В механических системах поводковая связь заменяется шарнирно-рычажной передачей, которая значительно повышает массу и требуемый разворачивающий момент. К тому же необходимо наличие свободного места, которого

практически нет в локомотивной тележке. Многими исследованиями подтверждается, что управление положением рамы тележки для уменьшения износа гребней колес менее эффективно, так как требуется большой управляющий момент в отличие от разворота колесной пары [3, 4].

Приведенные недостатки существующих устройств управляемого разворота осей колесных пар в радиальное положение не дают возможности в полной мере использовать такие системы на тяговом подвижном составе. Поэтому необходимо разработать такое устройство, которое обеспечит прямое управление колесной парой и будет достаточно компактной для его размещения в локомотиве. Для этого была осуществлена модернизация буксового узла электровоза (непосредственно связанная с колесной парой), в котором выделяются две части с возможностью поступательного смещения относительно друг друга с помощью самотормозящего винтового механизма.

Модернизированная конструкция буксы

Конструкция измененного узла (рис. 1) состоит из рамы буксы 1, связанной поводками с рамой тележки, и опирается на корпус 5 через ползун 6. «Гайка» самотормозящего винтового механизма имеет форму двух приливов на передней крышке 3; винты 2 проходят через «гайку» и двумя шарнирами присоединены к раме буксы 1 с возможностью вращения вокруг своей оси. Упорные подшипники 4, расположенные на винтах 2, передают продольные силы на поводки через раму буксы 1. При движении в кривых от приводного устройства винты 2 начинают вращаться, перемещая переднюю крышку 3 вместе с корпусом буксы 5 вдоль продольной оси рамы тележки. Противоположно направленное смещение центров букс на концах колесной пары приводит к повороту оси в радиальное положение. При движении состава по прямолинейному участку пути передняя крышка 3 вместе с корпусом 5 находится в среднем фиксированном положении.

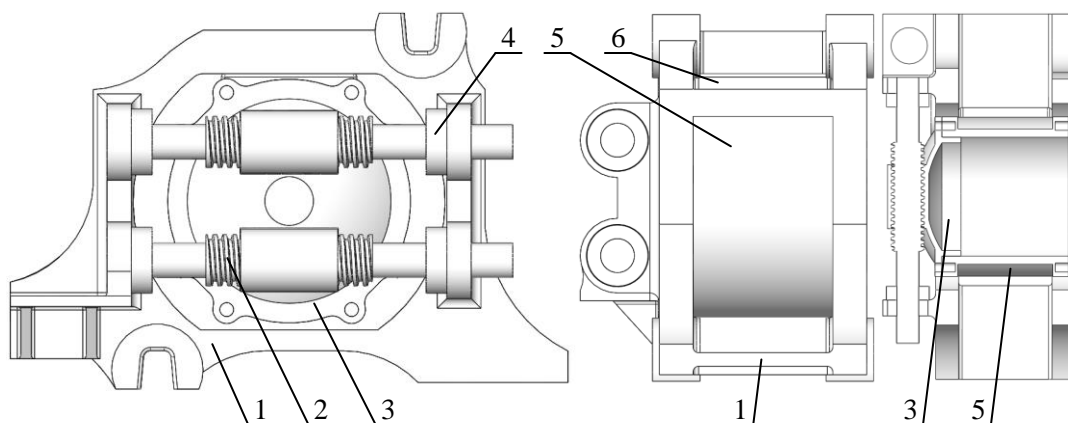


Рис. 1. Конструкция модернизированного буксового узла:

1 – рама буксы; 2 – винт; 3 – передняя крышка; 4 – упорный подшипник; 5 – корпус буксы; 6 – ползун

В предлагаемой конструкции буксового узла болтовое соединение передней крышки и корпуса буксы не воспринимает основные нагрузки. Передача сил от винтов осуществляется через эллиптическую часть передней крышки, располагающейся внутри корпуса буксы. Благодаря своей форме крышка не проворачивается вокруг своей оси.

Винтовая передача, реализуемая в данной конструкции, была выбрана по причине ее основных преимуществ: компактность, простое изготовление, высокая нагрузочная способность, поступательное перемещение «гайки» с высокой точностью. Ее использование вместе с электромеханическим приводом обеспечивает низкий расход энергии и высокую надежность при малых габаритах.

Количество мест для установки винта в новой конструкции ограничено. Другим возможным местом для его размещения является нижняя часть рамы. Однако несоосное расположение винта и продольной оси корпуса будут создавать момент, при котором корпус буксы начнет вращаться вокруг оси колесной пары при передаче тяговых сил и управляющих воздействий [5].

Использование двух винтов на боковой поверхности корпуса обуславливается несколькими преимуществами, недоступными при одновинтовом исполнении. Во-первых, увеличивается площадь контакта и равномерного распределения нагрузки по всей поверхности резьбового соединения с последующей передачей ее на приливы рамы буксы. Другим достоинством является возможность установки датчиков (кроме типовых), подводимых через технологическое отверстие в передней крышке, необходимых для оценки состояния подвижного состава и управления процессами движения [5].

Важной особенностью модернизированной конструкции буксового узла локомотива является то, что управляемый момент, передаваемый на ось колесной пары для ее установки в радиальное положение, не зависит от жесткости упругих поводков. Вследствие этого управляемое воздействие на каждую буксу становится меньше продольной нагрузки на буксу в тяговом режиме работы локомотива и уменьшает накопление повреждений от системы РУКП в традиционных тележках [3].

Со всеми перечисленными преимуществами данный буксовый узел не лишен недостатков. С введением новых элементов увеличивается неподдрессоренная масса, сложность конструкции и обслуживания. Винтовая пара нуждается в защите от пыли, снега, грязи, которые негативно влияют на ее работу. Принудительный разворот колесной пары требует применение микропроцессорной системы управления, а для связи электродвигателя с винтами необходим редуктор.

Оценка прочности новой конструкции буксы

Так как буксовый узел подвергся конструктивным изменениям, то необходимо оценить его прочность [6]. Построение трехмерной модели и выполнение прочностного расчета модернизированной буксы производилось в современной системе автоматизированного проектирования *SolidWorks*, разработанной компанией «Dassault Systemes». В данном программном комплексе интегрирован расчетный модуль *Simulation*, позволяющий решать различные инженерные задачи методом конечных элементов (МКЭ). Это дает возможность оценить работоспособность конструкции еще на стадии проектирования до момента изготовления и испытания опытных образцов.

МКЭ занял лидирующее положение благодаря возможности моделировать широкий круг объектов и явлений. Основная идея МКЭ состоит в том, что любую непрерывную величину (например, перемещение) можно представить в виде набора более простых функций, разбив область определения на конечное число элементов. При этом искомая непрерывная величина определена в точках, ограничивающих эти элементы.

Перед проведением прочностного расчета к новой конструкции прикладываются граничные условия, включающие в себя нагрузки, крепления, условия взаимодействия деталей, описывающие поведение модели в реальных условиях эксплуатации. Для определения максимальных напряжений, влияющих на работоспособность модели, были использованы три наиболее тяжелых режима работы буксы с различными сочетаниями одновременно действующих нагрузок:

1 – учет максимальных продольных ударных сил (Iб [6]);

2 – учет сил, действующих при движении в кривых участках пути с максимальным разрешенным непогашенным ускорением (IIа);

3 – учет сил, действующих при трогании с места (IIб).

Для трех рассматриваемых режимов были рассчитаны основные нагрузки, действующие на буксовый узел. В обозначениях сил нижний индекс указывает на краткое наименование, верхний – на вертикальное (в), поперечное (б) и продольное (п) направление действия.

Статическая нагрузка $P_{ст}^в$, передаваемая на один буксовый узел, определяется по формуле:

$$P_{ст}^в = \frac{(m_k + n_{тс} \cdot m_{тп}) \cdot g}{n_{бс}}, \quad (1)$$

где m_k – масса кузова секции, т;

$m_{тп}$ – масса подрессоренной части тележки, т;

$n_{бс}$ – число буксовых узлов в секции локомотива;

$n_{тс}$ – число тележек в секции локомотива;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Центробежная сила $F_{ц}^б$ образуется при движении электровоза в кривых участках пути. Величина центробежной силы, с учетом возвышения наружного рельса, на одну буксу определяется по формуле:

$$F_{ц}^б = \left(\frac{v^2}{gR} - \frac{h_p}{2s_k} \right) P_{ст}^в, \quad (2)$$

где v – максимальная допустимая скорость движения локомотива по участку кривой, м/с [7];
 R – радиус кривой, м;
 h_p – возвышение наружного рельса, м;
 s_k – половина расстояния между точками контакта колес с рельсами, м.

Под действием центробежной силы происходит перераспределение вертикальной нагрузки. Она нагружает одну и разгружает другую шейку колесной пары. Вертикальная нагрузка от центробежной силы на одну буксу определяется по формуле:

$$F_{\text{ц}}^{\text{в}} = F_{\text{ц}}^{\text{б}} \frac{h_k}{2s_{\text{б}}}, \quad (3)$$

где $s_{\text{б}}$ – половина расстояния между центрами букс одной колесной пары, м;
 h_k – расстояние от оси колесной пары до центра тяжести секции электровоза, м.

Помимо центробежной силы в горизонтальной плоскости действует сила давления ветра $F_{\text{в}}^{\text{б}}$, прикладываемая в центре боковой проекции кузова. Она определяется по формуле:

$$F_{\text{в}}^{\text{б}} = \frac{\omega S}{n_{\text{бс}}}, \quad (4)$$

где ω – давление ветра, перпендикулярное боковой стене локомотива, кН/м²;
 S – площадь боковой проекции кузова, м².

Вертикальная нагрузка на одну шейку колесной пары от давления ветра $F_{\text{в}}^{\text{б}}$ определяется по формуле (3), где $F_{\text{ц}}^{\text{б}}$ заменяется на $F_{\text{в}}^{\text{б}}$, h_k на $h_{\text{в}}$ – расстояние от оси колесной пары до равнодействующей давления ветра, м.

Вертикальные кососимметричные силы $F_{\text{кс}}^{\text{б}}$ состоят из четырех равных по абсолютной величине вертикальных сил тележки, из которых две, расположенные по диагонали, действуют вверх, а две другие – вниз. Значения кососимметричных сил принимают равными 10 % от вертикальной нагрузки на буксовый узел [6].

При работе тягового электродвигателя (ТЭД) возникают силы тяги, которые догружают или разгружают часть тележки. Максимальная сила тяги $F_{\text{т}}^{\text{п}}$, приходящаяся на один буксовый узел, образуется при трогании с места.

При работе ТЭД на маятниковую опору действует вертикальная сила, вычисляемая по формуле:

$$F_{\text{мотэд}}^{\text{в}} = \frac{M_{\text{э}} \cdot R_{\text{зк}}}{l_{\text{од}} \cdot r_{\text{ш}}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{э}}$ – электромагнитный момент ТЭД, кНм;
 $R_{\text{зк}}$ – радиус зубчатого колеса, м;
 $l_{\text{од}}$ – расстояние между точками опор двигателя, м;
 $r_{\text{ш}}$ – радиус делительной окружности шестерни, м.

В тележке электровоза оба тяговых двигателя расположены встречно друг другу. Усилия $F_{\text{мотэд}}^{\text{в}}$, возникающие при работе ТЭД, будут направлены в противоположные стороны и создадут момент, вызывающий увеличение нагрузки передней и уменьшение задней колесной пары на величину $F_{\text{тэдкп}}^{\text{в}}$, вычисляемую по формуле:

$$F_{\text{тэдкп}}^{\text{в}} = \frac{F_{\text{мотэд}}^{\text{в}} \cdot b_{\text{пд}}}{2a_{\text{т}}}, \quad (6)$$

где $b_{\text{пд}}$ – расстояние между подвесками двух двигателей, м;
 $a_{\text{т}}$ – половина базы тележки, м.

Продольные силы инерции, действующие на буксовый узел при соударениях с единицами подвижного состава, вычисляются по формуле:

$$F_{\text{ин}}^{\text{п}} = F_N^{\text{п}} \frac{m_{\text{эл}}}{M_{\text{л}}}, \quad (7)$$

где $F_N^{\text{п}}$ – сила, приложенная к упорам автосцепных устройств, кН;
 $m_{\text{эл}}$ – масса узла или элемента экипажа, т;
 $M_{\text{л}}$ – масса локомотива, т.

Продольная сила, приложенная по осям автосцепки, принимается равной 2500 кН [6]. Так как буксовый узел жестко связан с колесной парой, то учитывалась неподрессоренная масса, приходящаяся на одну буксу.

Дополнительные вертикальные силы на опорах кузова от действия продольной силы инерции кузова, передаваемой на тележку, вычисляется по формуле:

$$F_{\text{инк}}^{\text{в}} = F_{\text{инк}}^{\text{п}} \frac{h_{\text{о}}}{2B}, \quad (8)$$

где $h_{\text{о}}$ – расстояние от центра тяжести кузова до плоскости опор на тележку, м;
 B – половина базы кузова, м.

Дополнительные вертикальные силы на опорах кузова при трогании с места $F_{\text{тск}}^{\text{в}}$, приходящиеся на тележку, определяются с учетом силы тяги $F_{\text{т}}^{\text{п}}$ по формуле:

$$F_{\text{тскт}}^{\text{в}} = n_{\text{бс}} F_{\text{т}}^{\text{п}} \frac{h_{\text{о}}}{2B}. \quad (9)$$

Расчет силы диссипации и упругости производился на основе упрощенной модели подвижного состава с двумя степенями свободы, двигающегося по жесткому пути [8]. В результате моделирования получили максимальные значения силы диссипации $F_{\text{дис}}^{\text{в}}$, равное 30 кН, и упругости $F_{\text{упр}}^{\text{в}}$ – 15 кН, приходящиеся на один буксовый узел.

Горизонтальная поперечная динамическая нагрузка определяется умножением суммы всех поперечных сил на коэффициент горизонтальной динамики $K_{\text{дгор}}$ по формуле:

$$F_{\text{дин}}^{\text{б}} = (F_{\text{ц}}^{\text{б}} + F_{\text{в}}^{\text{б}}) \cdot K_{\text{дгор}}. \quad (11)$$

Полученные значения расчетных нагрузок сведены в табл. 1, в которой знак «✓» указывает на включение значения в расчет. На рис. 2 показана расчетная схема приложения поперечных 1, продольных 2 и вертикальных 3 сил.

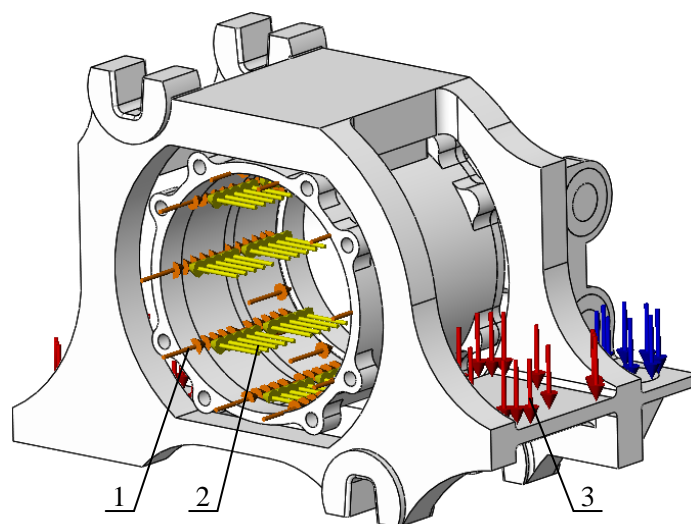


Рис. 2. Расчетная схема приложения нагрузок:
 1 – поперечные; 2 – продольные; 3 – вертикальные силы

Таблица 1

Сочетания нагрузок в различных расчетных режимах

| Расчетные нагрузки | Символ | Значение, кН | Расчетные режимы | | |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------|------------------|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Вертикальная статическая нагрузка | $P_{ст}^B$ | 87,824 | ✓ | ✓ | ✓ |
| Вертикальная нагрузка от центробежной силы | $F_{ц}^B$ | 4,864 | | ✓ | |
| Вертикальная нагрузка от давления ветра | $F_{в}^B$ | 3,125 | | ✓ | |
| Вертикальная нагрузка от силы диссипации | $F_{дис}^B$ | 30,000 | | ✓ | |
| Вертикальная нагрузка от силы упругости | $F_{упр}^B$ | 15,000 | | ✓ | |
| Вертикальная сила от кузова при действия продольной силы инерции кузова | $F_{инк}^B$ | 22,681 | ✓ | | |
| Вертикальная сила от кузова при трогании с места | $F_{тск}^B$ | 12,312 | | | ✓ |
| Вертикальная сила от ТЭД при трогании с места | $F_{тстэд}^B$ | 5,116 | | | ✓ |
| Вертикальная сила при кососимметричной нагрузке | $F_{кос}^B$ | 8,782 | | ✓ | |
| Горизонтальная продольная нагрузка от силы тяги | $F_{т}^H$ | 45,500 | | | ✓ |
| Горизонтальная продольная нагрузка от сил инерции | $F_{ин}^H$ | 35,745 | ✓ | | |
| Горизонтальная поперечная нагрузка от центробежной силы | $F_{ц}^6$ | 6,295 | | ✓ | |
| Горизонтальная поперечная нагрузка от давления ветра | $F_{в}^6$ | 3,438 | | ✓ | |
| Горизонтальная поперечная динамическая нагрузка | $F_{дин}^6$ | 2,920 | | ✓ | |

Условия закрепления рассматриваемой модели аналогичны реальным условиям ее работы в конструкции тележки: буксовые поводки передают тяговые и боковые усилия, поэтому в места их крепления в раме буксы были установлены ограничения продольных и поперечных перемещений 1. На внутренней цилиндрической части корпуса буксы добавлено ограничение вертикальных перемещений 2, имитирующие опору на осевые подшипники. К этой же грани подведены жесткие связи 3, удаленные на половину расстояния между центрами букс одной колесной пары, не допускающие поворот корпуса относительно винтов при действии нагрузок. Кинематические граничные условия показаны на рис. 3. Сетка конечных элементов (рис. 4) выполнена из объемных тетраэдров в соответствии с требованиями расчетной системы [9].

Традиционный буксовый узел электровозов изготавливают литьем из стали марки 25Л (с пределом текучести $\sigma_T = 235 \text{ Н/мм}^2$). Этот материал был использован в передней крышке, корпусе буксы и винтах. К упорным подшипникам применена сталь ШХ15 ($\sigma_T = 390 \text{ Н/мм}^2$). По причине высокой загруженности рамы и ползуна была выбрана сталь 30ХГСФЛ ($\sigma_T = 392 \text{ Н/мм}^2$). Материалы считаются однородными, изотропными, линейно-упругими [9, 10]. Механические свойства материалов имеют близкие значения – модуль упругости равен $0,205 \cdot 10^6 \text{ Н/мм}^2$, коэффициент Пуассона – 0,30.

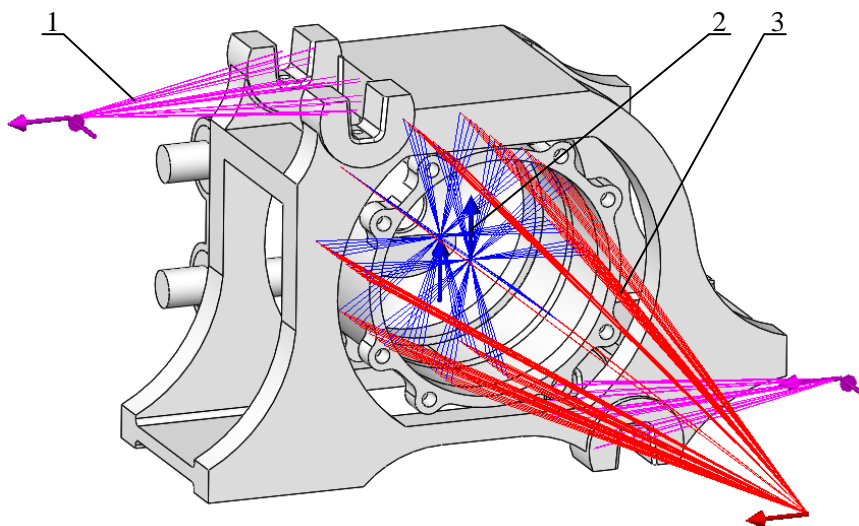


Рис. 3. Расчетная схема эксплуатационных ограничений:

1 – продольные и поперечные перемещения; 2 – вертикальные перемещения;
3 – закрепление оси колесной пары

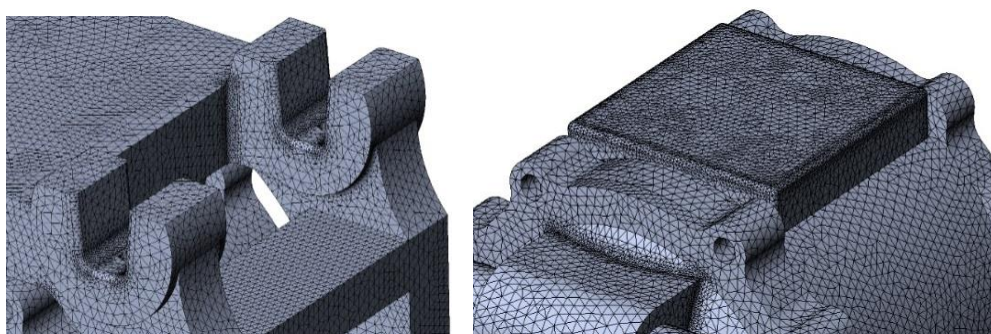


Рис. 4. Конечно-элементная сетка модернизированного буксового узла

С учетом того что в данной сборке присутствует резьбовое соединение, имеющее сложную геометрию, было принято решение заменить этот узел на цилиндрическую втулку и произвести расчет элемента отдельно для уменьшения времени вычислений и получения адекватных результатов.

Прочность конструкции оценивалась по допускаемым напряжениям по отношению к пределу текучести σ_T материала. Согласно [6] допускаемые напряжения для режима 1 составляют – $0,9\sigma_T$, для режима 2 и 3 – $0,6\sigma_T$.

В результате проведенного расчета были получены максимальные напряжения, возникающие в элементах буксового узла в трех расчетных режимах (табл. 2). Как показано на рис. 5 максимальные напряжения, сконцентрированные на ползуне, в местах крепления винтов и приливов под поводки не превышают допустимых, что говорит о выполнении требований к прочности конструкции. Материал для передней крышки и упорных подшипников можно заменить на менее прочный, так как коэффициент запаса по допускаемым напряжениям больше 1,5.

Таблица 2

Максимальные напряжения в элементах буксового узла

| Деталь | Расчетный режим | Максимальные напряжения, Н/мм ² | | Допустимые напряжения, Н/мм ² | Предел текучести σ_T , Н/мм ² |
|----------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-----|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Корпус буксы | 1 | 36 | | 211 | 235 |
| | 2 | 41 | | | |
| | 3 | 44 | | | |
| Передняя крышка | 1 | 84 | | 211 | |
| | 2 | 82 | | | |
| | 3 | 73 | | | |
| Винт (верхний нижний) | 1 | 70 | 59 | 211 | |
| | 2 | 89 | 87 | 141 | |
| | 3 | 97 | 81 | | |
| Рама буксы | 1 | 204 | | 352 | 392 |
| | 2 | 190 | | 235 | |
| | 3 | 145 | | | |
| Ползун корпуса | 1 | 197 | | 352 | |
| | 2 | 207 | | 235 | |
| | 3 | 158 | | | |
| Упр. подшипники слева (верхний нижний) | 1 | 14 | 24 | 351 | 390 |
| | 2 | 74 | 35 | 234 | |
| | 3 | 15 | 24 | | |
| Упр. подшипники справа (верхний нижний) | 1 | 62 | 97 | 351 | |
| | 2 | 17 | 70 | 234 | |
| | 3 | 101 | 104 | | |

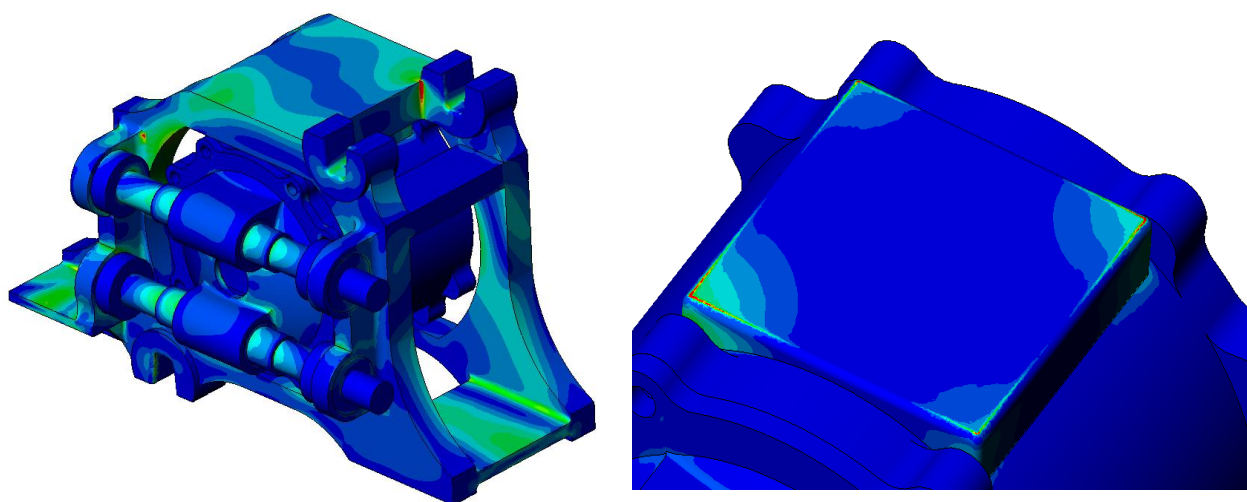


Рис. 5. Эпюра напряжений буксового узла во втором расчетном режиме

Заключение

В работе представлена модернизированная конструкция буксового узла электровоза с самотормозящим винтовым механизмом, предназначенная для установки оси колесной пары в радиальное положение. Она способствует уменьшению интенсивности бокового износа гребней колес и рельсов в кривых участках пути. Помимо этого, обеспечивает прямое управление колесной парой и значительно снижает требуемый управляющий момент. Оценка работоспособности узла, проводимая по результатам прочностного расчета с использованием метода конечных элементов в наиболее трудных режимах работы буксы, показала, что максимальные напряжения не превышают допустимых значений, указанных в [6].

Список литературы

- 1 **Гозбенко, В. Е.** Анализ и пути снижения износа рельсов и колес подвижного состава / В. Е. Гозбенко, Б. Тувшинтур // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 3(47). – С. 191–197. – ISSN 1813-9108.
- 2 **Глазунов, Д. В.** Способы снижения износа колесных пар подвижного состава / Д. В. Глазунов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 2(54). – С. 107–114. – DOI 10.21440/2307-2091-2019-2-107-114.
- 3 **Доронин, С. В.** Движение многосекционных локомотивов в кривых малого радиуса : монография / С. В. Доронин. – Хабаровск : Издательство ДВГУПС, 2009. – 220 с. – ISBN 978-5-262-00466-9.
- 4 **Гайшинец, И. А.** Тележки с управляемым механизмом радиальной установки колесных пар в рельсовой колее / И. А. Гайшинец, С. В. Доронин, И. И. Доронина // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2022. – № 1(30). – С. 3–9. – ISSN 2415-8658.
- 5 **Гайшинец, И. А.** Модернизация буксы электровоза для радиальной установки колесной пары в кривой / И. А. Гайшинец, С. В. Доронин, И. И. Доронина // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19. – № 3. – С. 498–504. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-3-498-504.
- 6 **ГОСТ Р 55513–2013.** Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 августа 2013 г. № 536-ст. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 41 с.
- 7 О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 8 ноября 2016 № 2240р.
- 8 Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.] ; под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с. – ISBN 5-277-01136-6.
- 9 **Kurowski, P.** Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2018 / P. Kurowski. – SDC Publications, 2018. – 596 p. – ISBN 978-1-63057-153-5.
- 10 **Алямовский, А. А.** SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов : за-

References

- 1 **Gozbenko, V. E.** Analysis and ways to reduce the wear of rails and wheels of the rolling stock / V. E. Gozbenko, B. Tovshintur // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2015. – No. 3(47). – P. 191–197. – ISSN 1813-9108.
- 2 **Glazunov, D. V.** Ways to reduce wear of wheelsets of carriage rolling stock / D. V. Glazunov // News of the Ural State Mining University. – 2019. – No. 2(54). – P. 107–114. – DOI 10.21440/2307-2091-2019-2-107-114.
- 3 **Doronin, S. V.** Movement of multi-section locomotives in curves of small radius : monograph / S. V. Doronin. – Khabarovsk : FESTU Publ., 2009. – 220 p. – ISBN 978-5-262-00466-9.
- 4 **Gaishinets, I. A.** Bogies with controlled radial wheelsets in a rail track / I. A. Gaishinets, S. V. Doronin, I. I. Doronina // Pacific Rim Countries Transportation System. – 2022. – No. 1(30). – P. 3–9. – ISSN 2415-8658.
- 5 **Gaishinets, I. A.** Modernization of electric locomotive axle box for radial installation of a wheelset in a curve / I. A. Gaishinets, S. V. Doronin, I. I. Doronina // Proceedings of petersburg transport university. – 2022. – Vol. 19. – No. 3. – P. 498–504. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-3-498-504.
- 6 **GOST R 55513–2013.** Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities: national standard of the Russian Federation : official edition : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated August 26, 2013 No. 536-st. – Moscow : Standartinform, 2014. – 41 p.
- 7 On the norms of the rolling stock free speed on 1520 (1524) mm gauge track : approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated November 08, 2016 No. 2240r.
- 8 Mechanical part of traction rolling stock / I. V. Biryukov, A. N. Savoskin, G. P. Burchak [et al] ; Ed. by I. V. Biryukov. – Moscow : Transport publ., 1992. – 440 p. – ISBN 5-277-01136-6.
- 9 **Kurowski, P.** Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2018 / P. Kurowski. – SDC Publications, 2018. – 596 p. – ISBN 978-1-63057-153-5.
- 10 **Alyamovskiy, A. A.** SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals : tasks, methods, recommendations / A. A. Alyamovskiy.

дачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 562 с. – ISBN 978-5-97060-140-2.

– Moscow : DMK Press Publ., 2015. – 562 p. – ISBN 978-5-97060-140-2.

I. A. Gaishinets, S. V. Doronin, I. I. Doronina, M. V. Yarantsev

LOCOMOTIVE AUXILIARY UNIT FOR AXLE INSTALLATION WHEELS BY CURVE RADIUS

Abstract. When a railway bogie passes through curved sections of the track, significant pressure forces of the wheel flanges on the outer rail thread arise, which lead to increased resistance to movement and intense lateral wear of the contact surfaces. The reason for this is the formation of large values of the angles of the wheel's collision on the rails; therefore, to eliminate them, controlled devices are used to ensure the radial installation of the wheelset axes in the curve. However, the shortcomings of the known systems of controlled turning of wheel sets do not allow the full use of such systems on traction rolling stock. To solve this problem, the paper presents a modernized design of the axle box of the electric locomotive. The performance evaluation of the proposed node was carried out according to the results of strength calculations using the finite element method in the most unfavorable operating modes of the box. The analysis showed that the modernized unit meets the requirements for structural strength.

Keywords: fitting into curves, flange wear, wheelset, radial installation, axle box assembly, modernization, strength calculation.

For citation: Locomotive auxiliary unit for axle installation wheels by curve radius / I. A. Gaishinets, S. V. Doronin, I. I. Doronina, M. V. Yarantsev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 224–233. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_224.

Сведения об авторах

Гайшинец Илья Александрович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Транспорт железных дорог»,
аспирант,
e-mail: ilya.ghs@yandex.ru

Доронин Сергей Владимирович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Транспорт железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: sd@festu.khv.ru

Доронина Ирина Ивановна

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Транспорт железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: iidoronina@festu.khv.ru

Яранцев Максим Владимирович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Транспорт железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: yarantsevmaxim@gmail.com

Information about the authors

Gaishinets Iliya Aleksandrovich

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair «Transport of Railways»,
Postgraduate Student,
e-mail: ilya.ghs@yandex.ru

Doronin Sergey Vladimirovich

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair «Transport of Railways»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: sd@festu.khv.ru

Doronina Irina Ivanovna

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair «Transport of Railways»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: iidoronina@festu.khv.ru

Yarantsev Maksim Vladimirovich

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair «Transport of Railways»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: yarantsevmaxim@gmail.com

Н. В. Гребенников

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ АВТОНОМНОГО ЛОКОМОТИВА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСКРЕТНО-АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. Предложен метод повышения энергоэффективности тяговых двигателей автономных локомотивов за счет применения дискретно-адаптивного управления количеством задействованных двигателей в тяге, что позволяет перейти в область более высоких значений напряжения тягового генератора, в результате чего снижаются потери, зависящие от токовой нагрузки. В результате использования предложенной системы адаптивного регулирования, эксплуатационный коэффициент полезного действия тяговых двигателей, по предварительным оценкам, возрастет на 10 %, что способствует повышению топливной экономичности перевозочного процесса.

Ключевые слова: снижение потерь, тяговые двигатели, локомотив, энергоэффективность, дискретно-адаптивное управление.

Для цитирования: Гребенников, Н. В. Метод снижения потерь электроэнергии в тяговых двигателях автономного локомотива за счет применения дискретно-адаптивного управления / Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 234–240. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_234.

Введение

Тренд, направленный на увеличение секционной мощности локомотивов [1], позволил увеличить объем перевозок и увеличить пропускную способность железных дорог, но при этом практически отсутствует снижение расхода энергоресурсов на тягу поездов, что обусловлено недоиспользованием доступной мощности локомотивов и сопряжено со спецификой работы железнодорожного транспорта, когда в одну сторону направляется основной грузопоток, а в обратную сторону пустая тара, т.е. порожние поезда [2]. Многие исследователи ожидают улучшения эксплуатационных показателей от внедрения асинхронного привода [3] и различных накопителей энергии на тяговом подвижном составе [4], и это, безусловно, является перспективным направлением повышения энергоэффективности [5] и соответствует общемировым тенденциям, но в первую очередь необходимо уделить внимание и совершенствовать процессы преобразования энергии [6] на локомотиве в реальных эксплуатационных условиях [7], иначе применение накопителей энергии не позволит получить существенный экономический эффект.

В [8] предложен способ повышения энергетической эффективности электровозов за счет приведения тяговой мощности в соответствие с потребностями (отключение неиспользуемых ТЭД). Способ получил название дискретно-адаптивного управления (ДАУ) [8] тяговым электроприводом, запатентован [9], и позволяет повысить энергоэффективность электровозов в условиях эксплуатации. Данный способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой позволяет реализовать принцип масштабируемости распределенной системы путем приведения количества работающих тяговых двигателей к текущим условиям нагрузки на локомотив [6] и должен стать одним из ключевых элементов цифровой системы управления локомотива (в том числе и будущих систем на основе искусственного интеллекта), что позволит существенно сократить удельный расход электроэнергии на тягу поездов.

Для тепловозов с электрической передачей мощности постоянного или переменного тока данная проблема недоиспользования мощности стоит еще острее [11], чем на электровозах, что объясняется гиперболической характеристикой тягового генератора (рис. 1) [12].

Тепловозы последних выпусков предусматривают возможность полного использования эффективной мощности дизеля, т.е. чтобы всё время выдерживалось соотношение:

$$P_e = P_r + P_{всп} \cdot \dots \quad (1)$$

В результате мощность тягового генератора (при наличии выпрямительной установки мощность тягового генератора определяется на выходе выпрямительной установки) для выбранной позиции может возрастать или уменьшаться на величину изменения мощности вспомогательных нужд, что вносит дополнительные возмущающие воздействия в процесс управления поездом.

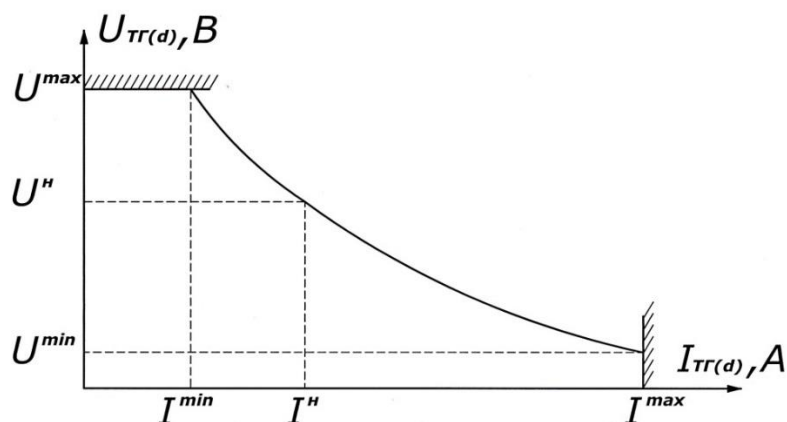


Рис. 1. Внешняя характеристика тягового генератора

Внешняя и частичные характеристики тягового генератора имеют вид гиперболы, т.е. мощность генератора поддерживается постоянной на каждой позиции контроллера машиниста, что позволяет обеспечить полное использование свободной мощности дизеля во всем рабочем диапазоне скоростей движения тепловоза [7].

Материалы и методы

Поле рабочих точек (рис. 2) тягового генератора ГСТ-2800-1000У2 тепловоза 2ТЭ25К^М в реальных условиях получено в результате обработки массива данных, регистрируемых микропроцессорной системой управления (МПСУ-ТП) для тепловоза 2ТЭ25К^М, эксплуатируемого на участке Северо-Кавказской железной дороги. Общее число измерений параметров составило 2 956 680 шт., что составляет порядка 35 суток работы тепловоза.

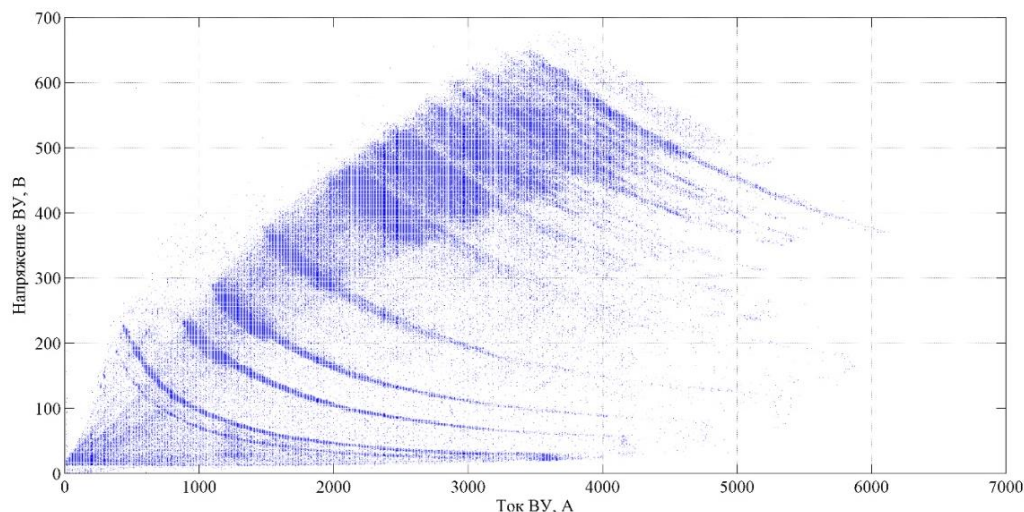


Рис. 2. Поле рабочих точек тягового генератора 2ТЭ25К^М

Из гиперболической характеристики тягового генератора (рис. 1) следует, что ток тягового генератора изменяется в широком диапазоне. Например, из эксплуатационных данных (рис. 2) видно, что на первой позиции ток тягового генератора изменяется в диапазоне от 400 А до 4000 А, т.е. в 10 раз. Известно, что омические потери в электрических машинах пропорциональны квадрату тока, т.е. изменение омических потерь будет в 100 раз:

$$\Delta P_{эл} = I^2 r. \quad (2)$$

Стократное изменение электрических потерь при работе по гиперболической характеристике является первой причиной низкой энергоэффективности тяговых электрических машин в режимах с неполной нагрузкой.

Второй причиной снижения энергоэффективности является управление тяговым приводом по напряжению, что также приводит к увеличению токовой нагрузки тяговых электрических машин, и как следствие – к существенному увеличению доли потерь, зависящих от квадрата тока.

$$\eta_{\text{ТЭД}} = 1 - \frac{I_{\text{ТЭД}}^2 \cdot r + \Delta P_{\text{пост}}}{I_{\text{ТЭД}} U_{\text{DC}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{ТЭД}}$ – ток тягового двигателя; U_{DC} – напряжение на зажимах канала выпрямительной установки; $\Delta P_{\text{пост}}$ – величина условно-постоянных потерь.

Из формулы (3) видно, что, применяя регулирование по напряжению, изменяется подводимая мощность, но при этом потери мощности в электрической машине остаются такими же, что приводит к существенному снижению энергоэффективности тяговых электрических машин (тягового генератора и тягового двигателя).

Применение дискретно-адаптивного управления количеством тяговых двигателей в работе позволит рационально использовать доступную мощность каждого двигателя, что снизит затраты энергии на потери, зависящие от токовой нагрузки. Количество ТЭД, реализуемых силу тяги, определяется в соответствии с мощностью выпрямительной установки по внешней тяговой характеристике генератора для каждой позиции контроллера машиниста по формуле:

$$n_{\text{ТЭД}}^j = \left\lceil \frac{P_{\text{ВУ}}^j \cdot \eta_{\text{ТЭД}}^n}{P_{\text{ТЭД}}^n} \right\rceil, \quad (4)$$

где $P_{\text{ВУ}}^j$ – мощность выпрямительной установки для j -й позиции контроллера машиниста; $\eta_{\text{ТЭД}}^n$ – номинальный КПД ТЭД; $P_{\text{ТЭД}}^n$ – номинальная мощность ТЭД (механическая мощность на валу).

Результаты расчета внешних характеристик при работе с разным количеством тяговых электродвигателей (ТЭД) приведены в таблице 1. По расчётным точкам, а также используя теоретические исследования на ПК, строим внешние характеристики тягового генератора в зависимости от числа реализуемых силу тяги тяговых электродвигателей (рис. 3).

Систему адаптивного регулирования количества задействованных в тяге ТЭД на локомотиве можно реализовать с помощью штатной микропроцессорной системы управления тепловозом 2ТЭ25К^М (МПСУ-ТП), в алгоритм работы которой необходимо внести следующие изменения: количество включаемых ТЭД должно соответствовать определенной позиции контроллера машиниста согласно табл. 2.

Таблица 1

Расчет внешней характеристики тягового генератора

| $U_d, \text{В}$ | $I_d, \text{А}$ | | | | | |
|-----------------|---------------------------|------|------|------|------|------|
| | Количество ТЭД в тяге, шт | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 750 | 549 | 1099 | 1648 | 2198 | 2747 | 3296 |
| 652 | 632 | 1264 | 1895 | 2527 | 3159 | 3791 |
| 577 | 714 | 1428 | 2143 | 2857 | 3571 | 4285 |
| 517 | 797 | 1593 | 2390 | 3187 | 3983 | 4780 |
| 469 | 879 | 1758 | 2637 | 3516 | 4395 | 5274 |
| 452 | 912 | 1824 | 2736 | 3648 | 4560 | 5472 |
| 436 | 945 | 1890 | 2835 | 3780 | 4725 | 5670 |
| 421 | 978 | 1956 | 2934 | 3912 | 4890 | 5868 |
| 408 | 1011 | 2022 | 3033 | 4044 | 5054 | 6065 |
| 395 | 1044 | 2088 | 3132 | 4175 | 5219 | 6263 |

U, В

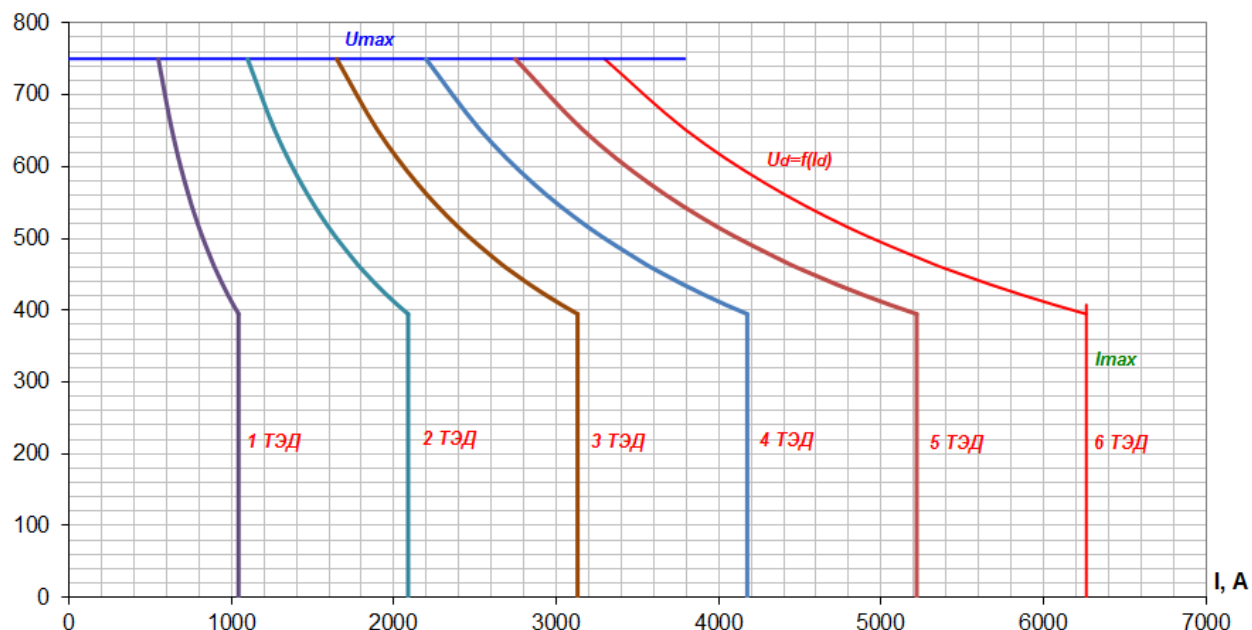


Рис. 3. Внешние характеристики тягового генератора в зависимости от количества ТЭД, реализуемых силу тяги

При скоростях меньше 20 км/ч, для позиций контроллера машиниста от 1 до 5 включаются удвоенное количество ТЭД от расчетного значения, приведенного в таблице 2, а начиная с 6 позиции подключаются все шесть тяговых двигателей секции тепловоза с целью предотвращения боксования в зоне низких скоростей. После достижения скорости более 20 км/ч ТЭД плавно выводятся из тяги для приведения в соответствие количества работающих в тяге ТЭД (табл. 2).

Таблица 2

Соответствие работающих ТЭД позиции контроллера машиниста

| Позиция контроллера машиниста | Количество работающих ТЭД | Суммарная мощность на зажимах выпрямительной установки, кВт | Мощность одного работающего канала выпрямительной установки, кВт |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 120 | 120 |
| 2 | 1 | 220 | 220 |
| 3 | 1 | 330 | 330 |
| 4 | 2 | 550 | 275 |
| 5 | 2 | 735 | 368 |
| 6 | 3 | 882 | 294 |
| 7 | 3 | 1029 | 343 |
| 8 | 3 | 1104 | 368 |
| 9 | 4 | 1323 | 331 |
| 10 | 4 | 1470 | 368 |
| 11 | 5 | 1617 | 323 |
| 12 | 5 | 1764 | 353 |
| 13 | 5 | 1840 | 368 |
| 14 | 6 | 2058 | 343 |
| 15 | 6 | 2210 | 368 |

Управление включением/отключением ТЭД осуществляется при помощи устройства U_6 системы МПСУ-ТП путем уменьшения напряжения на соответствующих тяговых электродвигателях (ТЭД) с помощью шестиканального управляемого выпрямителя U_1 до нуля.

Заключение

Установленное на тепловозе 2ТЭ25К^М оборудование позволяет реализовать энергоэффективное управление тяговой электрической передачей мощности тепловоза путем выведения из тяги (отключения) части электродвигателей. Реализовать систему отключения ТЭД можно путем доработки программного обеспечения МПСУ-ТП. В разрабатываемом алгоритме необходимо предусмотреть учет работы каждого ТЭД и отключать первыми те, у которых время работы будет наибольшим, следовательно, будет реализовываться алгоритм выравнивания ресурса ТЭД. Кроме того, необходимо предусмотреть смену работающих ТЭД при превышении допустимого времени, выведенного из тяги ТЭД с целью снижения износа коллекторно-щеточного аппарата.

В результате использования предложенной системы адаптивного регулирования числа работающих тяговых двигателей в тяге эксплуатационный коэффициент полезного действия ТЭД по предварительным оценкам возрастет на 10 %, а, следовательно, и уменьшится расход дизельного топлива на 10 %, только за счет оптимизации работы режимов тягового электрического оборудования тепловозов.

Список литературы

1 Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). – Москва : ОАО «РЖД». – 2015. – 128 с.

2 **Зарифьян, А. А.** Показатели энергетической эффективности грузовых магистральных электровозов в различных условиях эксплуатации / А. А. Зарифьян // Вестник Института проблем естественных монополий : Техника железных дорог. – 2019. – № 2(46). – С. 28–35. – ISSN 1998-9318.

3 Повышение энергоэффективности тяговых электроприводов с асинхронными двигателями и системой векторного управления / Ю. М. Иньков, А. С. Космодамианский, А. А. Пугачев, С. В. Морозов // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 10–15. – ISSN 0013-5860.

4 Моделирование бортовых систем хранения энергии для гибридного тягового привода / О. С. Валинский, Т. С. Титова, В. В. Никитин, А. М. Евстафьев // Электротехника. – 2020. – № 10. – С. 14–18. – ISSN 0013-5860.

5 **Петрушин, А. Д.** Повышение энергетической эффективности подвижного состава железных дорог с учетом требований экологии / А. Д. Петрушин, И. В. Волков, С. С. Черняев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 40–46. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_40.

6 Совершенствование тягового подвижного состава на основе современных технологий энергосбережения / А. М. Евстафьев, Д. Е. Кирышин, В. В. Никитин, О. Е. Пудовиков // Электротехника. – 2021. – № 2. – С. 2–6. – ISSN 0013-5860.

7 **Зарифьян, А. А.** Концепция повышения энергетической эффективности тепловозной тяги / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 107. – ISSN 2223-5167.

References

1 Strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book). – Moscow : Russian Railways. – 2015. – 128 p.

2 **Zarifyan, A. A.** Indicators of energy efficiency of freight mainline electric locomotives in various operating conditions / A. A. Zarifyan // Bulletin of the Institute of Natural Monopoly Problems : Railway Engineering. – 2019. – No. 2 (46). – P. 28–35. – ISSN 1998-9318.

3 Increasing the energy efficiency of traction electric drives with asynchronous motors and a vector control system / Yu. M. Inkov, A. S. Kosmodamiansky, A. A. Pugachev, S. V. Morozov // Electrical engineering. – 2021. – No. 9. – P. 10–15. – ISSN 0013-5860.

4 Modeling of onboard energy storage systems for a hybrid traction drive / O. S. Valinsky, T. S. Titova, V. V. Nikitin, A. M. Evstafiev // Elektrotekhnik. – 2020. – No. 10. – P. 14–18. – ISSN 0013-5860.

5 **Petrushin, A. D.** Improving the energy efficiency of railway rolling stock, taking into account the requirements of ecology / A. D. Petrushin, I. V. Volkov, S. S. Chernyaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1 (81). – P. 40–46. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_40.

6 Improvement of traction rolling stock based on modern energy saving technologies / A. M. Evstafiev, D. E. Kiryushin, V. V. Nikitin, O. E. Pudovikov // Electrical engineering. – 2021. – No. 2. – P. 2–6. – ISSN 0013-5860.

7 **Zarifyan, A. A.** The concept of increasing the energy efficiency of diesel traction / A. A. Zarifyan, N. V. Grebennikov, T. Z. Talakhadze // Electronic scientific publication of "Naukovedenie". – 2017. – Vol. 9, No. 6. – P. 107. – ISSN 2223-5167.

8 **Зарифьян, А. А. (мл.)** Дискретно-адаптивное управление тяговым приводом грузового электровагона при работе с неполной нагрузкой / А. А. Зарифьян (мл.) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1. – С. 49–59. – ISSN 0201-727X.

9 **Патент № 2617857 С** Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В61С 15/00, В60К 31/00. Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой : № 2015139252 : заявл. 15.09.2015 : опубл. 28.04.2017 / А. А. Андриященко, А. А. Зарифьян, Ю. А. Орлов, К. П. Солтус; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ТРТранс» (ООО «ТРТранс»). – 2 с.

10 Определение полезной работы, совершаемой локомотивом при тяге поезда / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе, В. В. Сироткин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1(69). – С. 40–49. – ISSN 0201-727X.

11 **Гребенников, Н. В.** Анализ энергетической эффективности эксплуатации пассажирского тепловоза ТЭП70БС / Н. В. Гребенников // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 5(95). – С. 17–22. – ISSN 1997-0722.

12 Электрические передачи локомотивов : в 2 частях / А. А. Андриященко, Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2015. – 98 с.

8 **Zarifyan, A. A. (Jr.)** Discrete-adaptive control of the traction drive of a freight electric locomotive during operation with partial load / A. A. Zarifyan (Jr.) // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2018. – No. 1. – P. 49–59. – ISSN 0201-727X.

9 **Patent No. 2617857 C** Russian Federation, IPC B60L 15/20, B61C 15/00, B60K 31/00. Method for controlling the energy efficiency of a locomotive when operating at partial load : No. 2015139252 : Appl. 09/15/2015 : published on 04/28/2017 / A. A. Andryushchenko, A. A. Zarifyan, Yu. A. Orlov, K. P. Soltus; applicant Limited Liability Company «TRTrans» (LLC «TRTrans»). – 2 p.

10 Determination of useful work performed by a locomotive during train traction / A. A. Zarifyan, N. V. Grebennikov, T. Z. Talakhadze, V. V. Sirotkin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2018. – No. 1 (69). – P. 40–49. – ISSN 0201-727X.

11 **Grebennikov, N. V.** Analysis of the energy efficiency of operation of the passenger diesel locomotive ТЕР70BS / N. V. Grebennikov // Bulletin of Transport of the Volga Region. – 2022. – No. 5 (95). – P. 17–22. – ISSN 1997-0722.

12 Electrical transmission of locomotives: In 2 parts / A. A. Andryushchenko, N. V. Grebennikov, A. A. Zarifyan, P. G. Kolpakhchyan. – Rostov-on-Don : Rostov State University of Communications, 2015. – 98 p.

N. V. Grebennikov

METHOD FOR REDUCING POWER LOSSES IN TRACTION MOTORS OF AN AUTONOMOUS LOCOMOTIVE THROUGH THE USE DISCRETE ADAPTIVE CONTROL

Abstract. It is proposed a method for improving the energy efficiency in traction motors of the autonomous locomotives through the use of discrete-adaptive control of the operating motors` number in traction, which makes it possible to account the higher voltage values of the traction generator, as its result of losses depends on the reduction the current load. As a result of using the proposed adaptive control system, the operational efficiency of traction motors, according to preliminary estimates, will increase by 10%, which contributes to an increase in the fuel efficiency of the transportation process.

Keywords: loss reduction, traction motors, locomotive, energy efficiency, discrete-adaptive control.

For citation: Grebennikov, N. V. Method for reducing power losses in traction motors of an autonomous locomotive through the use discrete adaptive control / N. V. Grebennikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 234–240. – DOI10.46973/0201-727X_2023_1_234.

Сведения об авторах

Information about the authors

Гребенников Николай Вячеславович

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

Grebennikov Nikolay Vyachaslavovich

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

П. Ю. Коновалов, И. А. Яицков

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ИСТЕЧЕНИЯ ПЕСКОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Аннотация. Предложена трехмерная модель конструкции усовершенствованной системы пескоподачи с применением эффекта виброоживления с помощью поршневого пневматического вибропульсатора одностороннего типа для плавного непрерывного регулирования количества песка из корпуса форсунки песочницы и использованием эжекции дополнительного количества воздуха через газоструйный инжектор для увеличения скорости истечения песковоздушной смеси при раздельном независимом питании сжатым воздухом инжектора и вибропульсатора. Представлены результаты моделирования транспортировки песковоздушной смеси с целью определения зависимости скорости истечения и массового расхода сжатого воздуха от величины давления перед рабочим соплом газоструйного инжектора для двух различных диаметров проходного сечения сопла 3,9 и 5 мм. По полученным результатам для реализации регулирования скорости транспортировки песковоздушной смеси путем управления величиной давления сжатого воздуха, подводимого к рабочему соплу газоструйного инжектора, с целью компенсации потерь на различные сопротивления в системе пескоподачи рациональнее использовать сопло диаметром проходного сечения 5 мм.

Ключевые слова: система пескоподачи, скорость истечения, песковоздушная смесь, моделирование, вычислительный эксперимент, регулирование, давление, сжатый воздух.

Для цитирования: Коновалов, П. Ю. Технические решения по регулированию увеличения скорости управляемого истечения песковоздушной смеси / П. Ю. Коновалов, И. А. Яицков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 241–247. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_241.

Введение

На подвижном составе железных дорог для предотвращения негативного избыточного проскальзывания колес относительно рельсов в различных режимах движения (боксование в тяге и юз при торможении) применяют подачу частиц кварцевого песка повышенной твердости в зону контакта колес с рельсами [1–3]. Однако известно, что существующие системы пескоподачи имеют разнообразные конструкции основных элементов и расходные характеристики количества песка в зависимости от типа и назначения подвижного состава [4]. Так, например, применяются форсунки песочницы различных конструкций, отличается также длина и сложность пескопроводящих труб для локомотивов с двух- и трехосными тележками [5], где при наличии длинных горизонтальных участков подводят дополнительный объем воздуха для исключения слеживания песка, а для обеспечения регулирования количества песка из корпуса форсунки в зависимости от фактических условий эксплуатации и режима нагруженности локомотива по сцеплению используют импульсную подачу с различной скважностью пауз и включений [4]. С целью исключения неисправностей, приводящих к частичным или полным отказам пескоподачи, а также для повышения эксплуатационных показателей данных систем и локомотивов в целом на основе результатов, приведенных в [6–9], предлагается усовершенствованная система пескоподачи с применением эффекта виброоживления для плавного непрерывного регулирования количества песка из корпуса форсунки песочницы и использованием эжекции дополнительного количества воздуха для увеличенной скорости истечения песковоздушной смеси. Предложенная система имеет конструкцию, расчетная трехмерная модель которой показана на рис. 1.

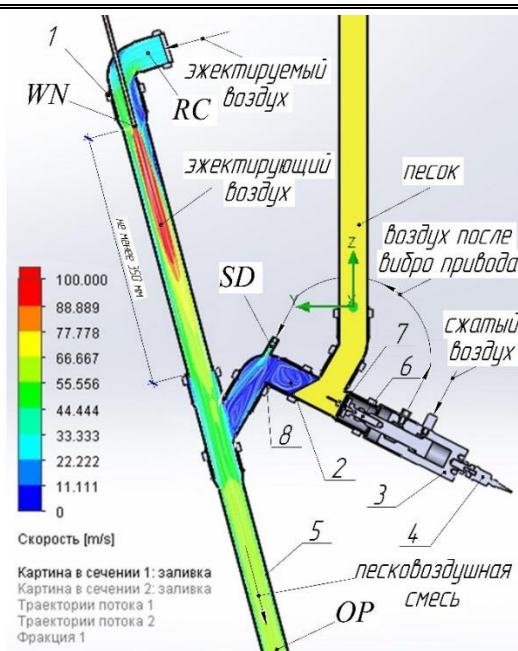


Рис. 1. Система пескоподачи с применением эффекта виброоживления и увеличением скорости истечения за счет эффекта эжекции до 50 м/с при диаметре рабочего сопла инжектора 3,9 мм

1 – газоструйный инжектор; 2 – форсунка песочницы; 3 – пневматический вибропривод;
4 – датчик ускорений; 5 – подсыпной рукав; 6 – поршень вибропривода;
7 – латексная мембрана; 8 – порожек в корпусе форсунки песочницы

Особенностью приведенной на рис. 1 системы пескоподачи является наличие пневматического вибропривода 3 и газоструйного инжектора 1. Вибропривод 3 является поршневым пневматическим вибропульсатором одностороннего действия, закрепленным на корпусе форсунки песочницы 2, для реализации поосного плавного непрерывного дозирования количества песка под движущие колеса тягового подвижного состава в зависимости от фактических условий эксплуатации [10] и расположения колесной пары по направлению движения поезда в габарите одной секции или локомотива в целом. Редуктор с сервоприводом позволяет изменять давление сжатого воздуха, подводимого в корпус вибропульсатора 3, поршень 6 которого пропорционально величине давления изменяет частоту перемещения и силовое воздействие через латексную мембрану 7 на слой песка в корпусе форсунки песочницы, приводя его в псевдооживленное состояние, при котором частицы перетекают через порог 8 [6] и попадают в воздушный поток от газоструйного инжектора 1.

Воздушный поток в зависимости от диаметра рабочего сопла WN инжектора 1 достигает рассчитанных скоростей более 40 м/с [9] за счет эжекции дополнительного количества воздуха в пескопровод через сечение приемной камеры RC , как показано в [8], с возможностью реализации двойного сокращения массового расхода сжатого воздуха из пневматической системы локомотива относительно потребляемого количества штатной форсунки песочницы ОНЗ-64 при подаче песка в 1500 г/мин. Газоструйный инжектор 1 питается сжатым воздухом независимо от пневматического вибропульсатора 3 и может располагаться на борту локомотива на любом расстоянии от форсунки песочницы 2, обязательным требованием является лишь то, чтобы прямой участок после приемной камеры был не менее 350 мм, так как данный участок воздуховода является смесительной камерой инжектора, в которой происходит выравнивание профиля скоростей по сечению, что необходимо для уменьшения потерь при дальнейшей транспортировке частиц песка по подсыпному рукаву 5 под колеса подвижного состава.

Скорость транспортировки частиц песка и истечения из подсыпного рукава 5 со значениями выше 40 м/с гарантирует доставку в зону контакта колес с рельсами при воздействии бокового ветра силой до 20 м/с более 90 % количества частиц песковоздушной струи с различной запыленностью от минимального расхода в 100 г/мин до необходимых 1500 г/мин для магистральных электровозов. Раздельное независимое питание сжатым воздухом пневматического вибропульсатора 3 и газоструйного инжектора 1 позволяет осуществлять продувку пескопровода 5 как до включения системы, так и после завершения процесса пескоподачи при избыточном проскальзывании движущих колес локомотивов относительно рельсов. Продувку в системе пескоподачи на рис. 1 возможно реализовать при отклю-

ченном электропневматическом вентиле на трубопроводе, подводящем сжатый воздух к виброприводу, и при открытом клапане, отвечающем за подачу воздуха к инжектору, что исключит дозирование и подачу частиц песка в подсыпной рукав без вибрационного воздействия, а скоростной воздушный поток, проходя по пескопроводу, сдует оставшиеся частицы песка после завершения пескоподачи, исключив их слеживание и снизив вероятность закупоривания проходного сечения трубопровода 5. Также возможно проводить периодическую продувку подсыпных рукавов 5, направленных встречно по ходу движения поезда, куда в зимний период эксплуатации попадают снег и частицы льда, что является причиной закупорки концевых насадок подсыпных труб и приводит к полному отказу пескоподающей системы при смене направления движения.

Постановка задачи

При определении потерь скорости транспортировки песковоздушной смеси по длинному пескопроводу, имеющему местные сопротивления в виде криволинейных участков, было установлено, что снижение скорости песковоздушной смеси не превышает 5 % [11]. Однако известно, что скорость движения частиц всегда меньше скорости транспортирующего потока и может составлять от 10 до 25 % в зависимости от концентрации и размера частиц твердой фракции. С учетом наихудших условий транспортировки получается, что скорость частиц может снижаться в диапазоне от 6 до 14 м/с. Данный факт может стать причиной снижения скорости истечения песковоздушной смеси ниже 40 м/с, что недопустимо с точки зрения эксплуатационных показателей системы пескоподачи, как указано в [9].

По причине того, что представленная на рис. 1 усовершенствованная система пескоподачи является универсальной для внедрения на подвижном составе различного типа и назначения со своими особенностями формы и длины пескопровода, а также количества наибольшего необходимого расхода песка на одну форсунку песочницы, возникла необходимость определения технического решения по увеличению скорости управляемого истечения песковоздушной смеси. Как указывалось, [11], имеется возможность повышения скорости транспортирующего потока путем увеличения диаметра проходного сечения рабочего сопла инжектора или приращения величины давления сжатого воздуха, подводимого через сопло с постоянным диаметром. Зависимости скорости истечения и расхода сжатого воздуха приведены в [5, 8]. На практике изменение диаметра – трудоемкий и затратный процесс, требующий определения точного значения площади проходного сечения для обеспечения корректировки и достижения необходимой скорости транспортировки при компенсации потерь падения скорости с учетом особенностей пескоподающих систем локомотивов различного типа и назначения.

Для реализации поставленной задачи на основе твердотельной модели усовершенствованной системы пескоподачи, представленной на рис. 1, был проведен вычислительный эксперимент по определению зависимостей изменения скорости транспортировки и истечения песковоздушной смеси от величины давления сжатого воздуха, подводимого к рабочему соплу газоструйного инжектора. Моделирование проводилось с неизменным максимально возможным расходом воздуха через пневматический вибропульсатор 0,001225 кг/с при рабочем давлении равном 0,6 МПа. Граничными условиями для проведения моделирования были: давление окружающей среды, равное атмосферному 101325 Па, в РС входного сечения приемной камеры инжектора и ОР выходного сечения подсыпного рукава; массовый расход сжатого воздуха через сечение форсунки песочницы SD, равный расходу через пневматический вибропульсатор 0,001225 кг/с; статическое давление сжатого воздуха, подводимое через сечение WN рабочего сопла газоструйного инжектора, варьировалось в диапазоне от 0,3 до 0,7 МПа. Моделирование проводилось для двух диаметров проходного сечения рабочего сопла инжектора 3,9 и 5 мм согласно [5, 8].

Результаты моделирования

Результатом моделирования являются зависимости различных характеристик усовершенствованной системы пескоподачи от величины давления сжатого воздуха, подводимого к рабочему соплу газоструйного инжектора, представленные на рис. 2–4. Стоит отметить, что на графиках построены зависимости для системы пескоподачи с газоструйными инжекторами, имеющими диаметр проходного сечения рабочего сопла 3,9 и 5 мм, которым соответствуют расчетные скорости истечения, равные 51,2 и 71,8 м/с соответственно, при постоянной величине статического давления сжатого воздуха 0,5 МПа, подаваемого через ускорительное сопло инжектора [5, 8]. Также заметим, что массовый расход сжатого воздуха через инжектор в 0,005 кг/с из [5, 8] при диаметре сопла 3,9 мм рассчитывался исходя из двукратного сокращения расхода относительно количества воздуха, затраченного серийной форсункой песочницы ОНЗ-64 при подаче 1500 г/мин количества песка. Для удобства анализа результатов моделирования указанные значения массового расхода сжатого воздуха, его давление и скорости истечения песковоздушной смеси обозначены на рис. 2–4 в виде пунктирных линий.

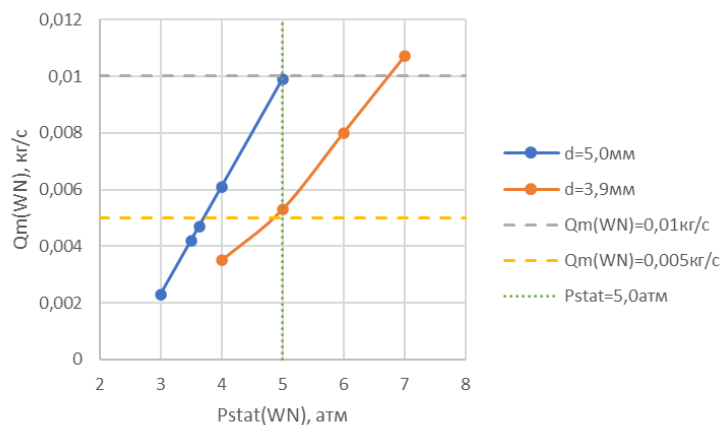


Рис. 2. Зависимость массового расхода сжатого воздуха через сечение (WN) от давления перед соплом инжектора в сечении (WN)

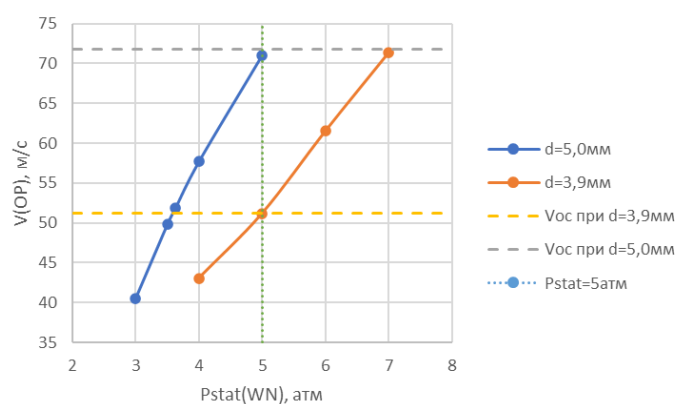


Рис. 3. Зависимость скорости истечения песковоздушной смеси через сечение (OP) от давления перед соплом инжектора в сечении (WN)

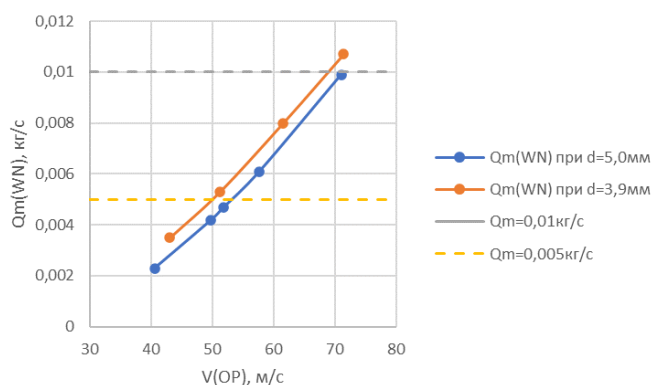


Рис. 4. Зависимость скорости истечения песковоздушной смеси через сечение (OP) от массового расхода сжатого воздуха через сечение (WN) рабочего сопла инжектора

Выводы

Из графиков зависимостей, приведенных на рис. 2–4, можно сделать следующие выводы. Для реализации регулирования скорости транспортировки песковоздушной смеси путем управления величиной давления сжатого воздуха, подводимого к рабочему соплу газоструйного инжектора с целью компенсации потерь на различные сопротивления в системе пескоподачи, рациональнее использовать сопло с диаметром проходного сечения 5 мм. Данный факт возможно объяснить тем, что расчеты в

[5, 8] были выполнены с запасом скорости истечения через сопло с диаметром 5 мм, что подтверждается реализацией расчетной скорости истечения выше 40 м/с при более низком значении давления в 3,63 атм относительно сопла с диаметром 3,9 мм (см. рис. 3). Причем удается достичь немногим более высоких значений скорости истечения в 51,9 м/с (см. рис. 4) при несколько более низком расходе сжатого воздуха 0,0047 кг/с относительно 0,0053 кг/с для сопла с диаметром 3,9 мм (см. рис. 2). В результате регулирования давления сжатого воздуха перед рабочим соплом газоструйного инжектора диаметром 5 мм достигается увеличение скорости управляемого истечения песковоздушной смеси с экономией количества сжатого воздуха в 11,3 %.

Список литературы

- 1 Improving the efficiency of the path-rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds / V. V. Shapovalov, V. I. Kolesnikov, P. V. Kharlamov [et al.] // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 900 (2020) 012011 – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012011.
- 2 **Kokhanovsky, V. A.** A Lubricant for Rotaprint Lubrication of the Wheel–Rail System / V. A. Kokhanovsky, D. V. Glazunov // Journal of Friction and Wear. – 2020. – No. 41(6). – P. 531–537. – DOI 10.3103/S1068366620060100.
- 3 Metal Plating of Friction Surfaces of the «Wheel–Rail» Pair / V. V. Shapovalov, Y. F. Migal, A. L. Ozyabkin [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2020. – No. 41(4). – P. 338–346. – DOI 10.3103/s1068366620040121.
- 4 **Коновалов, П. Ю.** Улучшение противобуксовочных свойств транспортных машин на основе модернизации пневмопривода песочной системы / П. Ю. Коновалов, Ю. П. Булавин, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_8.
- 5 **Konovalov, P. Y.** Increasing the outlet flow velocity of the locomotive sand feeding system using ejecting / P. Y. Konovalov and Y. P. Bulavin // AIP Conference Proceedings 2503, 050032 (2022). – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0099759> (Published Online: 13 October 2022).
- 6 **Булавин, Ю. П.** Экспериментальное исследование работы модернизированной форсунки песочницы в условиях вибрации / Ю. П. Булавин, П. Ю. Коновалов, И. В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1(85). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_8.
- 7 **Konovalov, P. Yu.** Analysis of granular materials vibrorheology of a railway sanding system / P. Yu. Konovalov, Yu. P. Bulavin, I. V. Volkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 September 2019 year. Vol. 709, 3, Issue 2. – Sevastopol : Institute of Physics Publishing, 2020. –

References

- 1 Improving the efficiency of the path-rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds / V. V. Shapovalov, V. I. Kolesnikov, P. V. Kharlamov [et al.] // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 900 (2020) 012011 – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012011.
- 2 **Kokhanovsky, V. A.** A Lubricant for Rotaprint Lubrication of the Wheel–Rail System / V. A. Kokhanovsky, D. V. Glazunov // Journal of Friction and Wear. – 2020. – No. 41(6). – P. 531–537. – DOI 10.3103/S1068366620060100.
- 3 Metal Plating of Friction Surfaces of the «Wheel–Rail» Pair / V. V. Shapovalov, Y. F. Migal, A. L. Ozyabkin [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2020. – No. 41(4). – P. 338–346. – DOI 10.3103/s1068366620040121.
- 4 **Konovalov, P. Yu.** Improving the traction properties of transport vehicles based on the modernization of the pneumatic drive of the sand system / P. Yu. Konovalov, Yu. P. Bulavin, I. V. Volkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universitetf Putey Soobsheniya. – 2021. – No. 1(81). – P. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_8.
- 5 **Konovalov, P. Y.** Increasing the outlet flow velocity of the locomotive sand feeding system using ejecting / P. Y. Konovalov and Y. P. Bulavin // AIP Conference Proceedings 2503, 050032 (2022). – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0099759> (Published Online: 13 October 2022).
- 6 **Bulavin, Yu. P.** Experimental study of the operation of a modernized sandbox nozzle in vibration conditions / Yu. P. Bulavin, P. Yu. Konovalov, I. V. Volkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universitetf Putey Soobsheniya. – 2022. – No. 1(85). – P. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_8.
- 7 **Konovalov, P. Yu.** Analysis of granular materials vibrorheology of a railway sanding system / P. Yu. Konovalov, Yu. P. Bulavin, I. V. Volkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 September 2019 year. Vol. 709, 3, Issue 2. – Sevastopol : Institute of Physics Publishing, 2020. –

P. 033093. – DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033093.

8 Improving the pneumatic actuator of the locomotive sand feeding system by increasing the outlet flow velocity / Y. P. Bulavin, P. Y. Konovalov, I. V. Volkov, O. N. Bessarabova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Ser. 4 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020, Sevastopol, 07–11 September 2020. Vol. 971. – BRISTOL, ENGLAND : IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 042032. – DOI 10.1088/1757-899X/971/4/042032.

9 Анализ выходных характеристик пневмопривода системы пескоподачи транспортных машин / П. Ю. Коновалов, Ю. П. Булавин, И. В. Волков, И. А. Яицков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 242–253. – ISSN 2071-6168.

10 **Волков, И. В.** Учет различных факторов при разработке системы непрерывной дозированной подачи песка / И. В. Волков, Ю. П. Булавин, П. Ю. Коновалов // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. Том 3. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 261–265. – EDN PAKYEH.

11 **Булавин, Ю. П.** Исследование особенностей транспортировки песковоздушной смеси с учетом местных сопротивлений трубопровода / Ю. П. Булавин, П. Ю. Коновалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(87). – С. 26–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_26.

P. 033093. – DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033093.

8 Improving the pneumatic actuator of the locomotive sand feeding system by increasing the outlet flow velocity / Y. P. Bulavin, P. Y. Konovalov, I. V. Volkov, O. N. Bessarabova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Ser. 4 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020, Sevastopol, 07–11 September 2020. Vol. 971. – BRISTOL, ENGLAND : IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 042032. – DOI 10.1088/1757-899X/971/4/042032.

7 Analysis of output characteristics of the pneumatic actuator of the transport machine's sand feeding system / P. Y. Konovalov, Y. P. Bulavin, I. V. Volkov, I. A. Yaitskov // Izvestiya TulGU. Technical sciences. – 2020. – No. 3. – P. 242–253. – ISSN 2071-6168.

10 **Volkov, I. V.** Taking into account various factors in the development of a continuous metered sand supply system / I. V. Volkov, Yu. P. Bulavin, P. Yu. Konovalov // Transport: science, education, production: collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019. Vol. 3. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – P. 261–265. – EDN PAKYEH.

11 **Bulavin, Yu. P.** Investigation of the peculiarities of transportation of sand-air mixture taking into account local pipeline resistances / Yu. P. Bulavin, P. Yu. Konovalov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobsheniya. – 2022. – No. 3(87). – P. 26–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_26.

P. Yu. Konovalov, I. A. Yaitskov

TECHNICAL SOLUTIONS FOR REGULATING THE INCREASE IN THE SPEED OF CONTROLLED OUTFLOW OF SAND-AIR MIXTURE

Abstract. The paper proposes three-dimensional model of the design of an improved sand supply system using the effect of vibration liquefaction using a one-way piston pneumatic vibropulsator for smooth continuous regulation of the sand amount from the sandbox nozzle body and the ejection use of an additional amount of air through a gas jet injector to increase the ejection rate of the sand-air outflow mixture with separate independent supply of compressed air to the injector. The results of modeling the transportation of a sand-air mixture in order to determine the dependence of the outflow rate and mass flow rate of compressed air on the pressure in front of the working nozzle of a gas-jet injector for two different diameters of the nozzle flow section of 3.9 and 5 mm are presented. According to the results obtained, to implement the regulation of the speed of transportation of the sand-air mixture by controlling the pressure of the compressed air supplied to the working nozzle of the gas-jet injector, in order to compensate for losses due to various resistances in the sand supply system, it is more rational to use a nozzle with a diameter of the passage section of 5 mm.

Keywords: and supply system, outflow velocity, sand-air mixture, modeling, computational experiment, regulation, pressure, compressed air.

For citation: Konovalov, P. Y. Technical solutions for regulating the increase in the speed of controlled outflow of sand-air mixture / P. Y. Konovalov, I. A. Yaitskov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobsheniya. – 2023. – No. 1. – P. 241–247. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_1_241.

Сведения об авторах**Коновалов Павел Юрьевич**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Тяговый подвижной состав»,
старший преподаватель,
e-mail: pashafromru@yandex.ru

Яицков Иван Анатольевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: yia@rgups.ru

Information about the authors**Konovalov Pavel Yurievich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Traction Rolling Stock»,
Senior Lecturer,
e-mail: pashafromru@yandex.ru

Yaitskov Ivan Anatolevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and Cars Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: yia@rgups.ru

И. С. Лексутов, В. П. Клюка

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ДЕТАЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ДИАМЕТРА КОЛЕСА ВАГОНА

Аннотация. Сделан обзор современных автоматизированных систем, использующихся для измерения диаметра колеса вагона, и предложена система классификации подобных систем на основе кинематических особенностей относительного движения внутри системы «источник – приемник – объект». Показаны основные особенности измерительных систем и предсказаны особенности еще не применяющихся на железнодорожном транспорте измерительных устройств. На примере задачи измерения диаметра колеса показан синтез структуры и расчет основных характеристик позиции для контроля диаметра колеса вагона в составе колесной пары и тележки в условиях размещения позиции на поточной линии либо пути-накопителе.

Ключевые слова: триангуляционный дальномер, автоматизированная система, колесная пара вагона.

Для цитирования: Лексутов, И. С. Анализ особенностей применения и классификация автоматизированных систем для бесконтактного измерения размеров и формы деталей на примере систем контроля диаметра колеса вагона / И. С. Лексутов, В. П. Клюка // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 248–256. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_248.

Введение

В последнее время для измерений параметров размеров и формы колес вагонов как в ремонтных, так и в эксплуатационных депо предлагаются бесконтактные оптические технологии. Предлагаются к внедрению автоматизированные системы, которые могут выполнять контроль широкого комплекса параметров, который практически полностью характеризует исправное состояние колес вагона в составе колесной пары. Таким образом, установкой одной единицы оборудования возможно совершить некоторый технологический скачок, который позволит ограничить использование нескольких единиц специализированного ручного измерительного и контрольного инструмента и уменьшить затраты на его содержание.

Состояние проблемы и постановка задачи

Однако автоматизация производства может двигаться не только скачками, но и малыми шагами, постепенно отказываясь от ручного труда путем внедрения простых установок на самом базовом уровне. Внедрение сложных автоматизированных станков, реализующих комплексный контроль узлов и систем вагона, часто очень трудно обосновать. Комплексные автоматизированные системы и станки для диагностирования технического состояния вагона сложны и дороги, а встраивание подобных установок в автоматические линии затруднено из-за сложностей технологического характера, связанных с загрузкой и необходимостью точного позиционирования объекта контроля на измерительной установке. Следует отметить, что одной из особенностей предприятий вагонного хозяйства является относительно малый объем производства ремонта, внедрение в которое дорогостоящего оборудования окупится в очень отдаленной перспективе. Поэтому, на взгляд авторов, постепенное внедрение в производство более простых автоматизированных установок, регистрирующих отдельные технические параметры объекта из всего комплекса признаков неисправности, – это наиболее рациональный подход. При этом необходимо обеспечивать открытость таких автоматизированных систем с возможностью расширения их функционала путем установки в будущем новых модулей, расширяющих возможности регистрации других признаков неисправности объекта контроля.

Еще одна проблема при использовании сложных систем измерений, стремящихся охватить весь перечень диагностических признаков, возникает, когда методика автоматизированного измерения не повторяет принятую, а использует другой принцип действия и набор информации, который часто неполный для такой задачи. После сбора компьютер аппроксимирует и интерпретирует эту информацию, используя некие корреляционные критерии, косвенно связанные с объективными признаками неис-

правности. Особенностью такой методики является ограничения по достоверности результатов диагностирования, так как сложно напрямую сравнивать для верификации два принципиально разных способа измерения. Такие методики обеспечивают достаточно правдоподобные результаты диагностирования, но зачастую их необходимо подтверждать с использованием утвержденной в технической документации методики. Из-за чего снижается эффект от внедрения таких автоматизированных систем, так как они не могут работать в полностью или частично автоматическом режиме и постоянно в ходе эксплуатации требуют участие работников для перепроверки результатов, исключения недостоверных показаний и «обучения» автоматизированной системы уже в процессе ее эксплуатации путем изучения случаев «ложных срабатываний».

Целью исследования ставится анализ методик, реализованных при бесконтактном оптическом контроле деталей вагонов для повышения достоверности получаемых результатов на этапе проектирования путем максимального приближения бесконтактного способа к тому, который принят в действующей документации. Приближение автоматизированной методики к принятой в документации, без погони за охватом полного списка контролируемых параметров в одной автоматизированной установке, создает условия для корректного сравнения результатов работы автоматизированной методики при подтверждении ее достоверности. Это обоснованно сделает автоматизированную методику и реализующую ее измерительную машину, даже если используются другие физические принципы, эквивалентом измерению при помощи ручного инструмента по действующей технической документации.

Предлагаемое решение

Бесконтактные оптические дальномеры получили широкое распространение в автоматизированных системах для контроля параметров формы и размеров деталей. Положительные их особенности известны хорошо. Например, есть возможность исключения механического износа и связанной с этим периодической поверки и юстировки измерительной системы. Реализуется исключение механического контакта с объектом контроля, который может оказывать разнообразные неблагоприятные воздействия на измерительный датчик. Актуально применение таких дальномеров для задач, связанных с их дистанционным использованием, в условиях, когда следует не нарушать габарит при контроле размеров деталей подвижного состава на ходу. Но вместе с преимуществами следуют и некоторые недостатки, связанные с физическими особенностями дальномеров, которые можно назвать преимуществами классических способов контроля.

Многие методики измерения, основанные на использовании ручного механического измерительного и контрольного инструмента, обладают преимуществами перед автоматизированными способами. Например, часто поиск максимального или минимального размера по вершине выпуклой области поверхности, которая может обладать несколькими локальными максимумами по уровню, происходит автоматически, с использованием тактильных ощущений работника, его органов чувств и особенностей конструкции движущихся частей инструмента, где обычным является наличие плоскостей и перпендикулярных элементов. Та же задача, решаемая автоматизированной системой, требует механического либо электронного сканирования всей исследуемой поверхности с учетом некоторого достаточного интервала между соседними точками, и выявления из полученного облака точек той, что требуется по условиям измерения. Некоторые задачи поиска минимума того или иного признака решает работник автоматически, ориентируясь на визуальные признаки. Например, если оценка технического состояния проводится по индикаторам износа, которых может быть на детали несколько, работник может выбрать из этих индикаторов на детали тот, который показывает наибольший износ. Если та же задача решается каким-то автоматом, то необходимо измерить все возможные контрольные точки, а только потом выбрать минимальные либо максимальные показатели в зависимости от задачи. Конечно же этот пример довольно показательно описывает еще и исключение при измерениях «человеческого фактора».

На рис. 1 показан пример описанной ситуации на деталях тележки 18-9855, когда из всей верхней поверхности нужно контролировать положение только ее плоской части (рис. 1, а), а из множества из четырех индикаторов нужно выбрать тот, который имеет минимальную глубину (рис. 1, б). В обоих случаях применяется штангенглубиномер, автоматически становящийся перпендикулярно к контролируемой поверхности за счет своей формы.

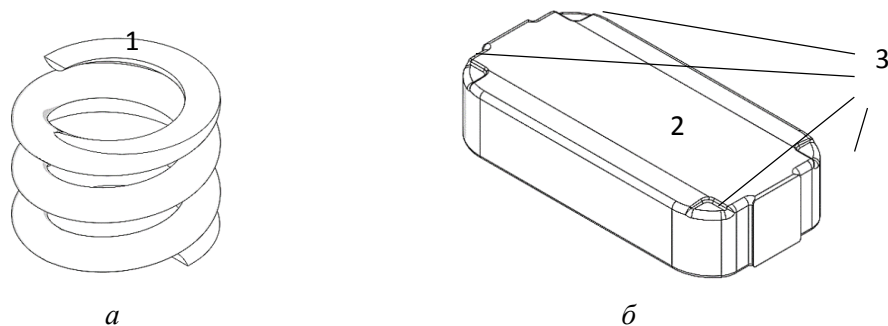


Рис. 1. Характерные поверхности деталей тележки вагона (а – наружная пружина скользуна, б – колпак скользуна с индикаторами износа):

1 – плоская торцевая поверхность цилиндрической пружины; 2 – рабочая поверхность, подверженная износу; 3 – четыре индикатора, из которых для браковки нужно выбрать один с наименьшей глубиной относительно уровня плоскости рабочей поверхности

В зависимости от изменения сопротивлений дренажных установок с помощью программы распределения электрических величин в тяговой рельсовой сети рассчитаем потенциалы ДУ тяговой подстанции и трубопровода. Данные предлагается снимать в следующие моменты: когда оба локомотива находятся в точке 20 км (см. рис. 1), когда один локомотив находится в точке 10 км, а второй – в точке 30 км и когда один локомотив находится в точке 0 км (см. рис. 2), а второй – в точке 40 км (см. рис. 3).

Использование ручного инструмента предполагает гибкое им манипулирование при помощи рук работника, тогда как автоматизированная система часто имеет лишь жестко закрепленные датчики, либо возможность грубой подстройки положения в пространстве по линейной направляющей. Ручной инструмент обычно предполагает контакт через минимум две точки, одна из которых является базой для отчета. Автоматизированная методика измерения такой базы часто не имеет, а ведет отчет от текущего положения измерительного дальномера, настоящее положение которого в пространстве может измениться в ходе эксплуатации автоматизированной установки. Установить реальное положение дальномера и внести корректировки в алгоритм вычисления размеров или интерпретации показаний датчика бывает затруднительно из-за условий применения и места установки такой измерительной системы.

Показания дальномера при измерении размеров не связаны напрямую с размером исследуемой детали, как в обычной методике с применением ручного инструмента. Дальномер измеряет расстояние только от собственного корпуса до какой-то точки на поверхности детали, которая доступна для объектива дальномера в данный момент. Из этого расстояния вычисляется нужный размер, исходя из свойств и способа установки корпуса дальномера на автоматизированной установке либо на устройстве манипулирования положением дальномера в пространстве. Часто расчеты производятся с учетом неких принятых допущений и предположений о форме объекта (например, о его симметрии). Поэтому показания измерительных установок на основе оптических дальномеров – это, в основном, некоторая расчетная интерпретация взаимного положения нескольких объектов в трехмерном пространстве с учетом информации о точных моментах времени между сериями измерений.

В том числе, исходя и из вышеприведенных соображений, процесс разработки, проектирования и юстировки измерительных систем, построенных на использовании оптических дальномеров, состоит в подборе такого положения элементов измерительной машины и объекта контроля, которые обеспечивали бы требующуюся по заданию точность и покрытие возможных отклонений измеряемого параметра.

Основная проблема, решаемая при построении таких систем, – это наиболее оптимальное расположение измерительных устройств (датчиков) в пространстве вокруг объекта контроля. Критерии оптимальности могут быть разнообразными. Например, это может быть минимальная стоимость установки, максимальная точность измерений, достоверность контроля, максимальная скорость измерения, либо условие обеспечения не нарушения порога дальности до объекта (например, соблюдение габарита при контроле движущегося подвижного состава) и т.д.

Сам процесс и способ измерения с использованием оптического триангуляционного дальномера по своей сути представляет собой регистрацию отклонений от калиброванных положений поверхностей контролируемых объектов относительно внешних поверхностей модулей источников и приемников отраженного сигнала. Обычно положения внешних поверхностей модулей приемников и источ-

ников жестко фиксированы внутри единого корпуса дальномера. Однако существуют устройства технической диагностики с разнесенными модулями. Например, это устройство АСООД [7], где модули разнесены на относительно большое расстояние и зафиксированы в неподвижном состоянии.

Жесткое закрепление модулей источника и приемника оптического излучения в пространстве внутри корпуса получило наибольшее распространение. Это удобно тем, что юстировку устройства делает единожды производитель. Существуют отработанные соотношения пары основных свойств таких устройств: ближняя граница измерения/диапазон измерения, которые предлагает производитель. От этих соотношений зависит точность и способ применения дальномера. Проектирование измерительной установки в этих условиях упрощается, так как проектировщик может принять за постоянный параметр свойства датчика и сконцентрировать усилия на конструктивных особенностях самой автоматизированной установки. Однако, с другой стороны, такое жесткое закрепление приемника и источника излучения – это серьезное ограничение функциональности установки, так как при измерении разных по номиналу и отклонениям размеров и параметров приходится для каждого такого параметра подбирать свой датчик, в зависимости от требуемой точности и номинала размера. Это приводит к увеличению количества датчиков в установке и усложнению ее структуры, проблемам взаимного влияния датчиков друг на друга и усложнению механической и кинематической схемы измерительной установки.

Для более структурированного осмысления разнообразия существующих и еще не внедренных/неразработанных автоматизированных систем в области бесконтактных оптических измерений можно классифицировать обсуждаемые автоматизированные установки по следующим основным признакам (с возможностью их дальнейшего расширения и дополнения вспомогательными признаками): 1) способ движения либо неподвижность объекта измерения; 2) способ движения или неподвижность измерительного датчика; 3) неизменность/адаптация параметров измерительного устройства в процессе измерения (изменение взаимного положения в пространстве источника и приемника излучения). В процессе работы устройства эти варианты и сочетания могут чередоваться, путем переключения режимов. Эти предложения можно визуализировать с помощью схемы, показанной на рис. 2. Здесь под собственным движением понимается такое движение, параметрами которого автоматизированная система не управляет, а может только регистрировать или вычислять по косвенным признакам.

В предложенной классификации и по схеме возможных вариантов реализации бесконтактных измерений можно увидеть все возможные измерительные устройства как реализованные, так и еще не разработанные, но заранее обладающие некоторыми положительными особенностями. На данный момент большинство существующих установок (например, для измерения диаметра колеса вагона) реализуют два основных варианта: неподвижные датчики и управляемое перемещение объекта, закрепленного на движущейся части установки, либо неподвижная группа измерительных датчиков и неуправляемое перемещение объекта в поле зрения объективов. Это обусловлено относительной простотой конструкции автоматизированной установки и интерпретации получаемых данных от измерительных дальномеров. Системам «Комплекс», «3DWheel» и т.п. соответствует сочетание 1–4. Многие измерительные стенды, предлагаемые для ремонтных депо, реализуют сочетание 2–4 или комбинацию 2–4 и 2–5. В таких стендах предполагается закрепление и управляемое вращение колесной пары относительно неподвижных либо движущихся линейно по программе измерительных модулей приемник/источник. Пару неподвижный объект/неподвижный измерительный модуль можно понимать в смысле относительного движения и отсутствия изменения относительно других частей измерительной установки в момент измерения.

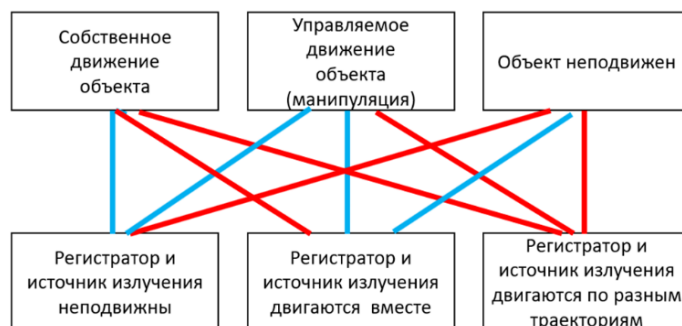


Рис. 2. Варианты конструкции измерительных устройств по кинематическим признакам

Некоторые другие варианты сочетаний признаков реализуются менее часто. Например, сочетание 5–3 по схеме соответствует способу действия и применения лазерного профилометра [8], в котором

переносной модуль автоматизированной системы устанавливается на неподвижное колесо, после чего включается привод для управляемого перемещения по линейной траектории модуля источник/приемник.

Существует система бесконтактного измерения диаметра колеса с использованием контактного шаблона, основанная на движении измерительного модуля в пространстве при неподвижном объекте [10]. Особенностью этого устройства является то, что движение происходит не точным управляемым по программе манипулированием, а регистрацией дальности в ходе хаотизированного направляемого рукой оператора движения, которое оператор выполняет по некоторым правилам. Из множества таких измерений АС выбирает и усредняет наиболее подходящие, информируя об этом оператора. Кроме того, структура источника излучения прибора довольно сложная. Картина, проецируемая на поверхность колеса, состоит из трех линий (проецируется из трех источников излучения), по взаимному положению которых можно судить о расстоянии до поверхности объекта в совокупности с информацией о параллаксе отдельной линии относительно приемника. Эти линии также можно воспринимать как три точки остановки движущегося в пространстве источника излучения относительно неподвижного в корпусе измерителя приемника.

Приемников излучения также может быть несколько. Известны бинокулярные дальномеры. Их можно рассматривать как комбинацию неподвижного приемника в отдельно взятый момент времени, при этом приемник можно считать движущимся прерывисто из одной позиции в другую (зеркальную относительно оси источника излучения) на этапе сборки этого дальномера.

Комбинация 4–3 может соответствовать устройству измерения, подобного устройствам из группы контактных [1], в случае если контактный сенсор линейных перемещений в них заменен на бесконтактный оптический. Однако совмещение в одном устройстве элементов методик, реализующих способы контактного и бесконтактного измерения, достаточно спорно. Существует риск неудачной комбинации достоинств и недостатков обоих принципов измерения. Стоит также заметить, что любое жесткое закрепление бесконтактного датчика, либо закрепление привода его пространственной манипуляции, иногда предполагает наличие механической связи объекта и сенсора через некоторые звенья, что увеличивает погрешность измерений.

В качестве другого примера комбинации 4–3 можно привести предлагаемый способ использования устройства Calpigi [10]. В этом случае совместно с измерителем, не имеющим механического контакта с объектом, используется находящийся в контакте механический индикатор в виде скобы, устанавливаемый на объект. По взаимному положению частей этого индикатора и сканируемой поверхности объекта вычисляется диаметр колеса.

Комбинация, которая имеет в наличии признак б, наиболее интересная. Источник либо приемник разнесенного датчика могут оставаться неподвижными, но относительно них должен перемещаться соответственно приемник/источник. Такой способ построения трехмерных моделей используется в фотограмметрии. Но для технических измерений пока способ не используется. В таком способе измерений координат точек поверхности используется либо неструктурированное излучение условно неподвижного солнца, либо движущаяся вместе с приемником осветительная лампа.

Таким образом теоретически установлено, что бесконтактные средства измерений часто не дают объективной картины, так как используют разные методы и физические принципы относительно стандартных методик. Эта проблема уже была замечена, и существуют попытки опытной оценки точности используемого измерительного оборудования. Некоторые оценки погрешности стандартных шаблонов и бесконтактных устройств при сравнении с методом прямого контактного измерения профиля и диаметра колеса показывают заметные погрешности [11]. Интересно, что для оценки погрешности принятой методики используется станок для механической обработки колеса с использованием контактного способа измерения.

Для иллюстрации предлагаемого авторами подхода к классификации и построению упрощенных, открытых, специализированных на контроле какого-либо одного параметра автоматизированных систем, которые реализуют наиболее близкий к стандартной методике способ измерения, предлагается следующее устройство, показанное на рис. 3.

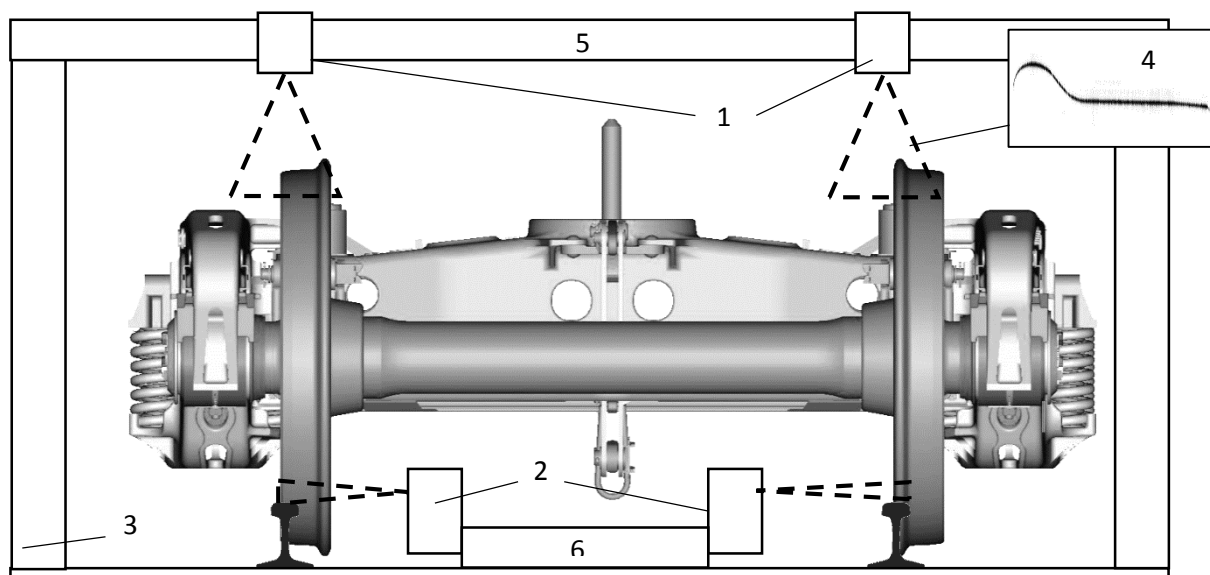


Рис. 3. Устройство для измерения диаметров колес:

1 – дальномеры с электронным сканированием; *2* – дальномеры лазерные триангуляционные; *3* – рама измерительного стенда в виде портала; *4* – изображение профиля поверхности измеряемого колеса, получаемого дальномером с электронным сканированием; *5* – верхняя балка портала; *6* – нижняя балка для размещения дальномеров

Устройство состоит из портала, построенного над отрезком стандартного пути, который может использоваться в качестве транспортировочного между ремонтными позициями в депо, или же этот путь может использоваться в качестве входа в стеллаж-накопитель для хранения колесных пар. Также устройство может использоваться в тележечном отделении, для измерений диаметра колес в составе тележки. На портале в верхней части размещены пара дальномеров с электронным сканированием, которые работают вместе с парой обычных недорогих триангуляционных дальномеров, которые контролируют расстояние между внутренними гранями колес и поперечное смещение с перекосом колесной пары относительно оси пути. Эти датчики необходимы для поиска на профиле точки, соответствующей линии или поверхности катания. Как и скоба ДК, используемая в стандартной методике измерения, пара верхних датчиков измеряют непосредственно диаметры колес, так как колеса противоположной стороной поверхности катания опираются на головку рельса. Это обеспечивает снижение погрешности измерения диаметра в два раза по сравнению со способом, реализующим в стационарных установках сочетания 2–4 и 2–5, где диаметр вычисляется из результата измерения радиуса колеса.

Согласно действующему руководящему документу по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар, номинальный диаметр по кругу катания нового колеса равен 957 мм с предельным отклонением 7 мм, а высота гребня равна 28 мм с отклонением 1 мм. Таким образом, максимальный по высоте уровень колеса будет 992 мм. Минимально возможный размер для контроля верхними датчиками будет определяться из геометрической возможности существования такой фигуры. Его можно принять равным параметру D_v и D_n , которые равны 802 мм. Таким образом, минимальный диапазон для дальномера с электронным сканированием равен 190 мм. Высота установки верхнего дальномера от уровня поверхности рельса равна 992 плюс расстояние от нижней грани датчика до ближней грани. Нижние дальномеры используются в данной установке как вспомогательные, для контроля расстояния между гранями и поперечного смещения колесной пары на пути. Информация с нижних дальномеров также используется для запуска процесса сканирования поверхности катания основными дальномерами и выяснения величины продольного перекоса колесной пары.

Процесс сканирования завершается, если значения дальности от нижних датчиков выходят за дальнюю границу измерений. Из полученного облака точек, полученных при сканировании профиля поверхности катания, выбирается та серия измерений, в которой существует точка с минимальной координатой по вертикальной оси. В этой последовательности находят измерение, соответствующее точке, расположенной на круге катания (с опорой на координаты внутренней грани колеса, как в стандартной методике). Кроме диаметра, структура установки и состав датчиков позволяют измерять такие параметры, как разность диаметров колес в одной колесной паре, если устройство применяется для контроля колес в тележке, то можно измерить разность диаметров колес в тележке. Использование

дальномеров с электронным сканированием позволяет измерять параметры гребней и другие свойства сечения поверхности катания.

Если требуется контролировать овальность колес, то требуется разместить минимум два таких портала на расстоянии 1,5 метра друг от друга для обеспечения двух измерений на колесо во взаимно перпендикулярных плоскостях. Другой способ расширения контролируемых параметров – это изменение класса устройства с сочетания 1–4 до 1–5. В этом случае верхняя балка портала делается подвижной в продольном направлении и снабжается следящим приводом с цифровым управлением. Балка может следить за катящейся внутри портала колесной парой, что позволяет выявлять еще и точечные дефекты на поверхности катания (например, ползуны и выщерблины) и с большей достоверностью измерять овальность и неравномерный прокат. Пределы перемещений подвижной балки в случае измерения отдельной колесной пары составят 3030 мм с некоторым запасом выбега для торможения. Если требуется измерять поочередно колесные пары в составе тележки, то длина хода верхней балки должна быть увеличена с учетом времени остановки слежения за первой колесной парой в тележке и торможения, также добавляется время перевода балки в начальное положение для начала слежения за второй колесной парой. Нижняя балка портала также может стать подвижной для повышения достоверности измерений разницы расстояния между внутренними гранями колеса и выявления точечных дефектов типа местного уширения обода.

Для процедуры поверки устройства измерения предлагается проводить периодические контрольные измерения эталона в виде новой колесной пары с точно известными размерами. В ходе поверки в программу вносятся корректирующие коэффициенты, которые компенсируют возможный износ отрезка пути под порталом и деформацию рамы устройства измерения, которые приводят к изменению положения дальномеров относительно друг друга и пути.

Вывод

В качестве вывода можно заключить, что использование бесконтактных способов измерения основных параметров вагонных деталей имеет некоторые проблемы верификации результатов из-за сложностей сравнения с результатами измерений с использованием принятых в технической документации методик. А поэтому точность и достоверность таких измерений нельзя гарантировать. Так как в предложенной классификации способов реализации бесконтактных методик используются кинематические признаки, предлагается вместо принятого термина «триангуляционный лазерный дальномер» использовать термин «параллаксный дальномер», поскольку такое определение более точно характеризует физический принцип реализации способа измерения дальности, а не способ вычисления и интерпретации дальности внутри ограниченной группы дальномеров. Кроме того, способ вычисления дальности в наиболее распространенных дальномерах такого класса не использует значений углов между какими-либо объектами, как это делается в классическом способе триангуляции. На примере реализации способа бесконтактного контроля диаметра колеса по кругу катания в условиях ремонтного депо показан предлагаемый подход к упрощению автоматизированных систем и одновременно к максимальному приближению способа измерения к принятой в документации методике с использованием скобы ДК Т447.01.000. Такой подход повысит достоверность и позволит обоснованно применять результат измерения диаметра колес, полученный автоматизированной установкой, как эквивалент методики, принятой в действующей документации.

Список литературы

1 **Волков, В. М.** Определение диаметров колесных пар по кругу катания локомотивов и вагонов с использованием устройств по измерению хорды колеса / В. М. Волков, С. Н. Должиков, М. Н. Лакеенко // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : Материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ., Омск, 18–19 октября 2018 года / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 54–60. – ISBN 978-5-949-41213-8.

References

1 **Volkov, V. M.** Determining the diameters of wheelsets along the rolling circle of locomotives and wagons using devices for measuring the wheel chord / V. M. Volkov, S. N. Dolzhikov, M. N. Lakeyenko // Quality control and diagnostics in industry and transport : Materials of the III All-Russian. sci.-tech. conf. with international participant, Omsk, October 18–19, 2018 / Omsk State Transport University. – Omsk, 2018. – P. 54–60. – ISBN 978-5-949-41213-8.

2 Патент на полезную модель № 87983 U1 Российская Федерация, МПК B61K 9/12, G01B 7/02, G01B 7/06. Устройство для измерения диаметров и толщины гребней колес железнодорожного транспортного средства / Е. А. Ханцинзят, В. Г. Жерновой, В. Н. Муртазин. – № 2009119206/22 : заявл. 21.05.2009 : опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. – 2 с.

3 Патент на полезную модель № 87023 U1 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Система бесконтактного определения размеров колесных пар в статике при плановых видах ремонта / М. Д. Рабинович, А. М. Кривной, В. В. Луговской [и др.]. – № 2008151715/22 : заявл. 26.12.2008 : опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26. – 2 с.

4 Патент № 2153432 C2 Российская Федерация, МПК B61K 9/12, G01B 11/24, G01B 11/25. Установка для измерения параметров качения колеса железнодорожного вагона и способ измерения (варианты) / А. Л. С. Ревуэльта, К. Х. Г. Гомес. – № 96112773/28 : заявл. 28.06.1996 : опубл. 27.07.2000, Бюл. № 18. – 3 с.

5 Патент № 2724915 C1 Российская Федерация, МПК B61L 27/00. Контроль состояния изнашиваемого элемента / М. Давидыч, Д. Клингебил, У. Сивалингам. – № 2019138635 : заявл. 19.04.2018 : опубл. 26.06.2020, Бюл. № 18. – 28 с.

6 Патент на полезную модель № 87794 U1 Российская Федерация, МПК G01B 11/24. Устройство для измерения параметров колесных пар / А. З. Венедиктов, В. Н. Тирешкин, С. Е. Фетисов [и др.]. – № 2009125761/22 : заявл. 06.07.2009 : опубл. 20.10.2009, Бюл. № 29. – 2 с.

7 Патент на полезную модель № 45976 U1 Российская Федерация, МПК B61K 9/00. Устройство для обнаружения рельсовых транспортных средств с отрицательной динамикой / Г. Н. Юрин, В. М. Стельмах, В. А. Ярошук [и др.]. – № 2005103967/22 : заявл. 28.01.2005 : опубл. 10.06.2005, Бюл. № 16. – 2 с.

8 Measurement sensors // Сайт компании Riftek. – URL : https://riftek.com/products/railway_wheel_profile_gauge_ikp/ (дата обращения : 14.12.2022).

9 Measurement Instruments for Railway Transport // Сайт компании Riftek. – URL: https://riftek.com/products/real_time_wheels_geometry_measurement_system/ (дата обращения : 14.12.2022).

10 Measurement of rolling circle diameter with market-leading precision and compact auxiliary gage // Сайт компании Nextsense. – URL: <https://www.nextsense-worldwide.com/en/industries/railway/wheel-diameter-gauge.html> (дата обращения : 14.12.2022).

2 Patent for useful model 87983 U1 Russian Federation, IPC B61K 9/12, G01B 7/02, G01B 7/06. A device for measuring the diameters and thickness of the wheel flanges of a railway vehicle / E. A. Khantsinzyat, V. G. Zhernovoi, V. N. Murtazin. – No. 2009119206/22 : appl. 05.21.2009 : publ. October 27, 2009.

3 Patent for useful model 87023 U1 Russian Federation, IPC G01N 29/04. System for non-contact determination of the dimensions of wheel pairs in statics during planned types of repairs / Rabinovich, M. D., Krivnoy, A. M., Lugovskoy, V. V. – No 2008151715/22 : appl. 12/26/2008 : publ. 09.20.2009.

4 Patent 2153432 C2 Russian Federation, IPC B61K 9/12, G01B 11/24, G01B 11/25. Installation for measuring the rolling parameters of the wheel of a railway car and measurement method (options) / A. L. S. Revuelta, K. H. G. Gomez. – No. 96112773/28 : appl. 06.28.1996 : publ. 07/27/2000.

5 Patent 2724915 C1 Russian Federation, IPC B61L 27/00. Monitoring the state of the wear element / M. Davidich, D. Klingebil, W. Sivalingham. – No. 2019138635 : appl. 04.19.2018 : publ. 06/26/2020.

6 Patent 87794 U1 Russian Federation, IPC G01B 11/24. A device for measuring the parameters of wheel sets / A. Z. Venediktov, V. N. Tireskin, S. E. Fetisov [at al.]. – No. 2009125761/22 : Appl. 07.06.2009 : publ. 10.20.2009.

7 Patent 45976 U1 Russian Federation, IPC B61K 9/00. Device for detecting rail vehicles with negative dynamics / G. N. Yurin, V. M. Stelmakh, V. A. Yaroshchuk [at al.]. – No. 2005103967/22 : appl. 01.28.2005 : publ. 06/10/2005.

8 Measurement sensors // Website of the company Riftek. – URL: https://riftek.com/products/railway_wheel_profile_gauge_ikp/ (date of access: 12/14/2022).

9 Measurement Instruments for Railway Transport // Website of the company Riftek. – URL: https://riftek.com/products/real_time_wheels_geometry_measurement_system/ (date of access: 12/14/2022).

10 Measurement of rolling circle diameter with market-leading precision and compact auxiliary gage // Website of the company Nextsense. – URL: <https://www.nextsense-worldwide.com/en/industries/railway/wheel-diameter-gauge.html> (date of access : 12/14/2022).

11 Огуенко, В. Н. Как изнашиваются колеса «Сапсанов» / В. Н. Огуенко, С. В. Перфилов, С. О. Сытина // Локомотив. – 2011. – № 12(660). – С. 26–27. – ISSN 0869-8147.

8 Measurement sensors // Сайт компании Riftek. – URL : https://riftek.com/products/railway_wheel_profile_gauge_ikp/ (дата обращения : 14.12.2022).

9 Measurement Instruments for Railway Transport // Сайт компании Riftek. – URL: https://riftek.com/products/real_time_wheels_geometry_measurement_system/ (дата обращения : 14.12.2022).

10 Measurement of rolling circle diameter with market-leading precision and compact auxiliary gage // Сайт компании Nextsense. – URL: <https://www.nextsense-worldwide.com/en/industries/railway/wheel-diameter-gauge.html> (дата обращения : 14.12.2022).

11 Огуенко, В. Н. Как изнашиваются колеса «Сапсанов» / В. Н. Огуенко, С. В. Перфилов, С. О. Сытина // Локомотив. – 2011. – № 12(660). – С. 26–27. – ISSN 0869-8147.

11 Oguenko, V. N. How the wheels of «Sapsanov» wear out / V. N. Oguenko, S. V. Perfilov, S. O. Sytina // Lokomotiv. – 2011. – No. 12 (660). – P. 26–27. – ISSN 0869-8147.

8 Measurement sensors // Website of the company Riftek. – URL: https://riftek.com/products/railway_wheel_profile_gauge_ikp/ (date of access: 12/14/2022).

9 Measurement Instruments for Railway Transport // Website of the company Riftek. – URL: https://riftek.com/products/real_time_wheels_geometry_measurement_system/ (date of access: 12/14/2022).

10 Measurement of rolling circle diameter with market-leading precision and compact auxiliary gage // Website of the company Nextsense. – URL: <https://www.nextsense-worldwide.com/en/industries/railway/wheel-diameter-gauge.html> (date of access: 12/14/2022).

11 Oguenko, V. N. How the wheels of «Sapsanov» wear out / V. N. Oguenko, S. V. Perfilov, S. O. Sytina // Lokomotiv. – 2011. – No. 12 (660). – P. 26–27. – ISSN 0869-8147.

I. S. Leksutov, V. P. Kluka

ANALYSIS OF APPLICATION FEATURES AND CLASSIFICATION OF AUTOMATED SYSTEMS FOR NON-CONTACT MEASUREMENT OF THE DIMENSIONS AND SHAPE OF PARTS ON THE EXAMPLE OF CAR WHEEL DIAMETER CONTROL SYSTEMS

Abstract. Provides an overview of modern automated systems used to measure the diameter of a car wheel and proposes a classification system for such systems based on the kinematic features of relative motion within the source-receiver-object system. It is predicted the main features of measuring systems are shown and the features of future measuring devices have not used in railway transport. The example of measuring the wheel diameter shows the calculation of the main characteristics of the position to control the diameter of the car wheel as part of a wheel pair under the conditions of placing the position on a production line or storage track.

Keywords: triangulation rangefinder, automated system, wagon wheelset.

For citation: Leksutov, I. S. Analysis of application features and classification of automated systems for non-contact measurement of the dimensions and shape of parts on the example of car wheel diameter control systems / I. S. Leksutov, V. P. Kluka // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 248–256. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_248.

Сведения об авторах

Лексупов Илья Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Leksutov@mail.ru

Клюка Владислав Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: vklyuka@mail.ru

Information about the author

Leksutov Ilya Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Railway Cars and Railway Car Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Leksutov@mail.ru

Kluka Vladislav Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Railway Cars and Railway Car Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: vklyuka@mail.ru

И. А. Яицков, Е. С. Федотов

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФFUЗОРНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ КАНАЛОВ ТОРМОЗНЫХ ДИСКОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация. На интенсивность теплоотвода путем конвективного теплообмена от вентилируемых тормозных дисков транспортных средств напрямую влияет количество и время прохождения воздушного потока через вентиляционный аппарат. Чем интенсивнее на входе в вентиляционный аппарат и медленнее на выходе воздушный поток, тем интенсивнее будет проходить охлаждение самого тормозного диска. Замедлить скорость прохождения воздушных потоков можно путем создания искусственных препятствий или путем перехода воздушных потоков из ламинарного в турбулентный режим течения. Методика проведения исследования, предложенная в данной статье, позволит охарактеризовать механизм формирования в вентиляционном канале мест повышенного и пониженного давления и возникновения вихревых потоков при турбулентном протекании воздушного потока.

Ключевые слова: воздушный поток, вентиляционный аппарат, тормозной диск, пограничный слой, датчик давления, зона разрежения, зона повышенного давления, направление движения.

Для цитирования: Яицков, И. А. Методика определения аэродинамических характеристик диффузорных вентиляционных каналов тормозных дисков транспортных средств / И. А. Яицков, Е. С. Федотов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 257–263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257.

Введение

Современные конструкционные решения изготовления тормозных дисков транспортных средств предусматривают, что тормозные диски, как правило, должны иметь вентиляционный аппарат диффузорного типа (рис. 1). Такая конструкция получила широкое распространение ввиду оптимального соотношения стоимости изготовления и эффективности работы [1]. Рассмотренная ниже методика может быть применима и для исследования вентиляционных аппаратов различных конструкций. Проведение исследований возможно только на реальных физических моделях в увеличенных размерах без учета аэродинамических потерь при различных конструктивных исполнениях.

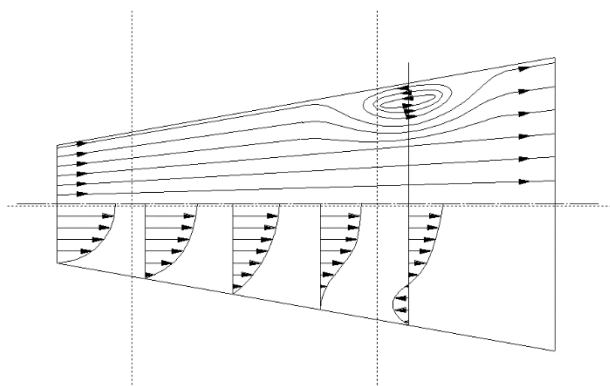


Рис. 1. Распределение скоростей движения воздушного потока в пограничном слое для различных по длине каналов сечений

Объект и методы исследования

При рассмотрении процесса работы вентиляционного аппарата дисково-колодочного тормоза можно обратить внимание, что в большинстве случаев происходит истечение воздуха через диффузорные каналы [2].

В представленном на рис. 1 вентиляционном канале прямоугольного сечения проходное сечение изменяется за счет угла раскрытия боковых стенок. При этом следует учитывать, что при более длительном прохождении отдельно взятого объема воздушного потока через вентиляционный канал в большей степени происходит охлаждение тормозного диска [4, 5].

Принимая во внимание уравнение Бернулли, можно прийти к выводу, что в невязком ядре потока газовых частиц происходит снижение скорости движения в диффузоре, а также повышается давление:

$$\frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{c^2}{2}\right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dp}{\rho} = -cdc. \quad (2)$$

Таким образом, можно пояснить, что в ядре потока газовых частиц возникает область повышенного давления за счет снижения кинетической энергии.

При прохождении воздуха через вентиляционный канал происходит преодоление сил сопротивления движению потока воздуха в пограничном слое. Данное явление образуется за счет собственной кинетической энергии и касательного напряжения, возникающего со стороны более быстродвижущихся потоков воздуха, расположенных дальше от стенки [6].

Толщина пограничного слоя в вентиляционных каналах диффузорного типа возрастает с увеличением длины самого канала в отличие от обычного прямолинейного канала. Это вызвано двумя факторами:

- во-первых, прохождение воздуха через вентиляционные каналы обусловлено потерями на трение;
- во-вторых, утолщение пограничного слоя происходит за счет снижения давления и скорости в ядре потока.

С увеличением толщины пограничного слоя неизбежно происходит уменьшение касательного напряжения:

$$\tau = \mu \cdot \frac{\partial c}{\partial n} = \mu \cdot \frac{c}{\delta}. \quad (3)$$

Таким образом, быстро движущиеся частицы теряют способность увлекать за собой частицы, расположенные вблизи стенок диффузора, в результате чего происходит падение скорости движения частиц, градиент скорости по нормали постепенно исчезает $\frac{\partial c}{\partial n} = 0$ и частицы вблизи стенки останав-

ливаются. При дальнейшем движении частиц в ядре потока происходит разряжение в зоне стенки диффузора, в результате чего возникает эффект отрыва пограничного слоя. Отрыв, как правило, приводит к образованию вихрей, а накопленная направленная кинетическая энергия потока частиц приобретает вихревую форму [7]. С увеличением вихревых потоков повышаются и вихревые потери или потери отрыва. Кинетическая энергия потока при переходе в вихревое движение не приводит к увеличению давления потока, так как тормозится силами трения воздушного потока, приводя к повышению температуры. При этом следует учитывать, что повышение температуры потока не влечет за собой повышение давления потока [8].

В диффузорных каналах тормозных дисков потери кинетической энергии на отрыв будут положительно сказываться на эффективности охлаждения тела тормозного диска. При проектировании тормозных дисков для повышения эффективности их действия, как правило, придерживаются следующих решений: чем больше поток проходящего воздуха и чем дольше он задерживается в каналах охлаждения тормозного диска, тем эффективнее получается система охлаждения [9].

Необходимо учитывать особенность течения воздушного потока: чем ближе к основанию диффузора происходит отрыв пограничного слоя, тем больше возникают вихревые потери, пропорциональные кинетической энергии воздушного потока, для того сечения, где происходит возникновение отрыва.

Учитывая условия возникновения отрыва при $\tau = 0$, можно определить, какие факторы влияют на возникновение точки отрыва:

- при ламинарном истечении газа через прямоугольный диффузор профиль скорости имеет менее заполненный вид в отличие от турбулентного режима;
- при развитом истечении газа, как правило, нормальный градиент скорости и касательное напряжение на входе меньше, чем при развитии пограничного слоя в диффузоре;
- изменение эпюры скоростей в пристеночном пространстве происходит постепенно с замедлением скорости воздушного потока.

Если при проектировании стоит задача сохранения ламинарного режима истечения газа, то главными параметрами в нашем случае будут являться скорость истечения газа, длина и угол раскрытия диффузора. Если же речь идет о создании турбулентного режима, то при помощи изменения данных параметров можно добиться желаемого результата.

При значении угла расширения диффузора $\nu \leq 40^\circ$ отрыв воздушного потока от стенок вентиляционного канала начинается не по всему периметру сечения, а в области с наименьшей скоростью воздушного потока в пристеночном слое. С возникновением отрыва на одной стороне диффузорного вентиляционного канала прекращается дальнейшее повышение статического давления вдоль поверхности вентиляционного канала, следовательно, отрыв воздушного потока на противоположной стороне не происходит. Данный эффект обуславливается несимметричным распределением скоростей по сечениям вентиляционного канала при движении воздушного потока.

При малых углах раскрытия диффузорного канала зона с образовавшимся вихревым потоком сносится набегающим потоком воздуха, на освобожденном месте возникает новая вихревая зона и т.д. Для случая симметричного диффузорного канала наблюдается попеременный отрыв воздушного потока от стенок вентиляционного канала, приводящий к значительным колебаниям в целом [10].

Воздушный поток, проходящий через вентиляционный канал, испытывает сопротивление, вызванное разделением потока на входе в канал, потери на трение и потери, связанные с вихреобразованием.

Для более подробного рассмотрения данного процесса авторами предлагается методика исследования аэродинамических характеристик движения воздушного потока в различных по конфигурации вентиляционных каналах тормозных дисков. Первоначальные исследования планируется провести на диффузорных каналах прямоугольной формы.

Авторами предлагается методика определения зон возникновения отрыва от пограничного слоя и направления движения воздушного потока. Методика проведения исследования представлена ниже.

1 *Определение зон повышенного и пониженного давления.* Из рассмотренного ранее материала можно сделать вывод, что при движении воздушного потока в прямоугольном диффузорном канале возникают зоны повышенного и пониженного давления. Данные зоны можно установить путем определения параметров давления воздушного потока в предполагаемых зонах с помощью сверхчувствительных тензометрических датчиков давления. Датчики можно расположить по стенкам физической модели увеличенного масштаба. Пример расположения датчиков представлен на рис. 2.

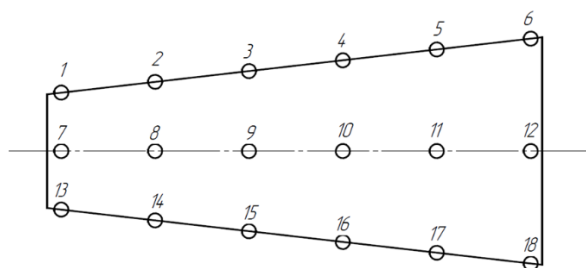


Рис. 2. Места исследования зон повышенного и пониженного давления

На рис. 2 представлены предполагаемые места установки датчиков измерения давления воздушного потока. Так как плоскости основания рабочих поверхностей тормозного диска параллельны, аэродинамические характеристики у них будут практически одинаковы. Следовательно, можно сделать вывод, что для исследования движения воздушного потока достаточно снять параметры с одной плоскости, а именно с датчиков 7–12 (см. рис. 2).

При данном методе исследования можно применить датчики, подобные тем, которые представлены на рис. 3.



Рис. 3. Датчик давления

Представленный на рис. 3 датчик имеет по своей конфигурации сенсор, способный определять давление (избыточное/отрицательное) при подключении его посредством гибкой или жесткой трубки должного диаметра (с обеспечением герметичного соединения) к требуемой области исследования. Выходной сигнал с датчика можно оцифровать любым контроллером, поддерживающим протокол обмена I2C.

Учитывая функциональную возможность подобных датчиков, можно исследовать области с повышенным и пониженным давлением практически в любых местах вентиляционного канала. С учетом представленного на рис. 4 варианта подключения датчика возможны следующие результаты:

- если в приемной трубе датчика будет находиться область избыточного давления, то датчик определит избыточное давление;
- если в приемной трубе датчика будет находиться область отрицательного давления, то датчик определит отрицательное давление;
- если в поперечном направлении относительно приемной трубы датчика будет проходить воздушный поток, то датчик определит отрицательное давление, ввиду подхвата и уноса воздушных масс, находящихся в приемной трубе.

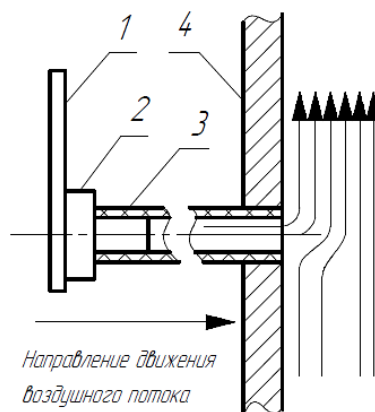


Рис. 4. Конструктивное исполнение варианта № 1 установки датчика давления:

- 1 – датчик давления; 2 – сенсор датчика давления; 3 – подводящий трубопровод;
4 – стенка вентиляционного канала

Для уточнения зон можно прибегнуть к методу определения направления движения воздушных потоков, описанных ниже.

2 Определение направлений движения воздушных потоков. При движении воздушных масс, не имеющих зон разрежения и избыточного давления, сложно определить направление по давлению в данной зоне. Однако, если расположить приемную трубку сенсора по направлению движения воздушных потоков, можно определить направленность их движения:

- если воздушный поток будет двигаться навстречу приемной трубе сенсора (рис. 5, а), тогда можно обнаружить сигнал датчика, соответствующий избыточному давлению;
- если воздушный поток будет двигаться в обратном направлении приемной трубы сенсора (рис. 5, б), тогда можно обнаружить сигнал датчика, соответствующий отрицательному давлению, ввиду подхвата и уноса воздушных масс, находящихся в приемной трубе.

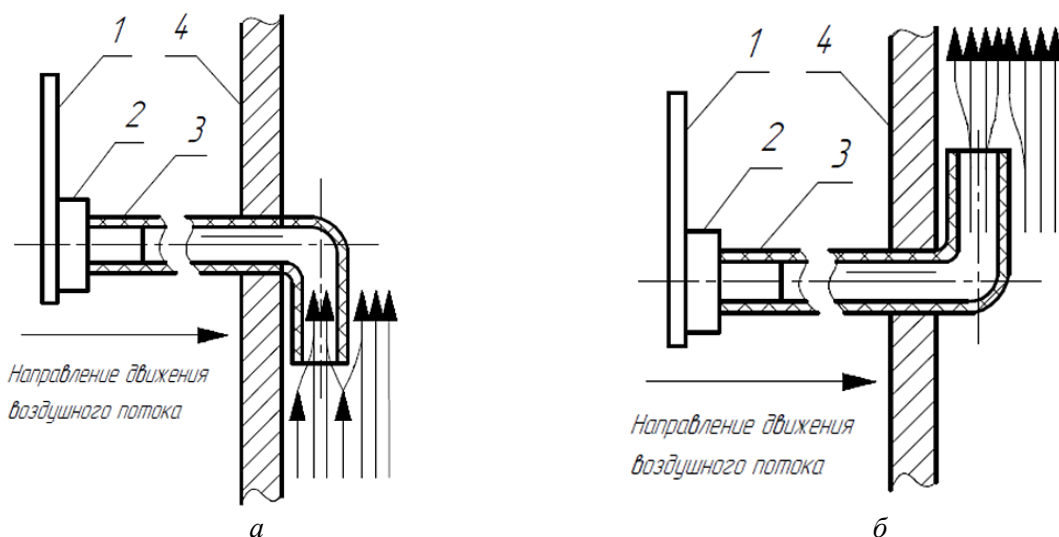


Рис. 5. Конструктивное исполнение варианта № 2 установки датчика давления:
а – встречное направление; *б* – попутное; 1 – датчик давления; 2 – сенсор датчика давления;
 3 – подводящий трубопровод; 4 – стенка вентиляционного канала

Выводы

Рассмотренная методика проведения исследования может найти применение при изучении характеристик различных по конструкции вентиляционных аппаратов. Наиболее важными условиями, способствующими минимизации погрешностей измерений, будут являться размеры физической модели и скорость воздушного потока. Представленные конструктивные решения установки датчиков – вариант № 1 и вариант № 2 – помогут определить зоны повышенного и пониженного давления, а также направления движения воздушного потока. Таким образом, предложенная методика способна определить момент возникновения турбулентного истечения воздушного потока и количество вихревых зон вдоль стенок вентиляционного канала.

Список литературы

- 1 Особенности конструкции различных деталей дисково-колодочных тормозов и эффективность их действия / Е. С. Федотов, П. А. Поляков, Р. С. Тагиев, С. В. Харьков // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сборник статей VI Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 19–20 марта 2020 года / под общей редакцией В. В. Салмина. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2020. – С. 182–186.
- 2 Разработка методики оценки системы охлаждения тормозных дисков / А. Е. Литвинов, П. А. Поляков, Е. А. Полякова [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 14–22. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-1-14-22.
- 3 **Федотов, Е. С.** Интенсификация конвективного теплообмена при изменении скорости потока воздуха в вентилируемом тормозном диске / Е. С. Федотов, П. А. Поляков, М. В. Стародуб // Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения) : сборник статей

Reference

- 1 Design features of various parts of disc brakes and the effectiveness of their action / E. S. Fedotov, P. A. Polyakov, R. S. Tagiev, S. V. Kharkiv // Innovations of technical solutions in mechanical engineering and transport: collection of articles of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference for young scientists and students with international participation, Penza, 19–20 March 2020 / Under the general editorship of V. V. Salmin. – Penza : Penza State Agrarian University, 2020. – P. 182–186.
- 2 Development of a methodology for evaluating the cooling system of brake discs / A. E. Litvinov, P. A. Polyakov, E. A. Polyakova [et al.] // Bulletin of M.T. Kalashnikov IzhSTU. – 2020. – Vol. 23. – No. 1. – P. 14–22. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-1-14-22.
- 3 **Fedotov, E. S.** Intensification of convective heat exchange when changing the air flow velocity in a ventilated brake disc / E. S. Fedotov, P. A. Polyakov, M. V. Starodub // Transport. Economy. Social sphere (Actual problems and their solutions) : collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference, Penza, April 23–24,

- VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 23–24 апреля 2021 года. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 137–140.
- 4 **Ерофеев, А. И.** Медленные течения газа при сильной теплопередаче / А. И. Ерофеев, О. Г. Фридлендер // Вестник нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4–3. – С. 768–770.
- 5 **Atkins, M.** Flow behavior in radial vane brake rotors at low rotational speeds / M. Atkins, F. Kienhofer // Journal of Fluids Engineering. – 2019. – No. 141(8). – 49 p. – DOI 10.1115/1.4042470.
- 6 **Panelli, M.** Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators / M. Panelli // International conference «Thermal and Environmental Issues in Energy Systems», ASME-UIT-ATI (Sorrento, Italy, 10 may 2010). – DOI 10.13140/2.1.3525.7122.
- 7 **Пиралишвили, Ш. А.** Вихревой эффект. Теория, эксперимент, численное моделирование / Ш. А. Пиралишвили // Сборник научных трудов SWORLD. – 2013. – № 3. – С. 79–99.
- 8 Интенсификация теплопередачи в пластинчатом теплообменнике за счет пульсации потока теплоносителя / С. Ф. Кудашев, О. В. Кудашева, О. В. Душутина, Р. Р. Равилов // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 10–2. – С. 262–267.
- 9 **Parish, D.** Automotive ventilated brake rotor aerodynamic investigation : MSc Thesis, School of Engineering / D. Parish. – 2003. – 108 p.
- 10 **Johnson, D. A.** Analysis of flow through a vented automotive brake rotor / D. A. Johnson, B. A. Sperandei, R. Gilbert // Journal of Fluids Engg. – 2014. – Vol. 125. – P. 979–986.
2021. – Penza : Penza State Agrarian University, 2021. – P. 137–140.
- 4 **Erofeev, A. I.** Slow gas flows with strong heat transfer / A. I. Erofeev, O. G. Friedlander // Bulletin of Nizhny Novgorod University named after N. I. Lobachevsky. – 2011. – No. 4–3. – P. 768–770.
- 5 **Atkins, M.** Flow behavior in radial vane brake rotors at low rotational speeds / M. Atkins, F. Kienhofer // Journal of Fluids Engineering. – 2019. – No. 141(8). – 49 p. – DOI 10.1115/1.4042470.
- 6 **Panelli, M.** Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators / M. Panelli // International conference «Thermal and Environmental Issues in Energy Systems», ASME-UIT-ATI (Sorrento, Italy, 10 may 2010). – DOI 10.13140/2.1.3525.7122.
- 7 **Piralishvili, S. A.** Vortex effect. Theory, experiment, numerical modeling / S. A. Piralishvili // Collection of scientific papers SWORLD. – 2013. – No. 3. – P. 79–99.
- 8 Intensification of heat transfer in a plate heat exchanger due to pulsation of the coolant flow / S. F. Kudashev, O. V. Kudasheva, O. V. Dushutina, R. R. Ravirov // Modern high-tech technologies. – 2019. – No. 10–2. P. 262–267.
- 9 **Parish, D.** Automotive ventilated brake rotor aerodynamic investigation: MSc Thesis, School of Engineering / D. Parish. – 2003. – 108 p.
- 10 **Johnson, D. A.** Analysis of flow through a vented automotive brake rotor / D. A. Johnson, B. A. Sperandei, R. Gilbert // Journal of Fluids Engg. – 2014. – Vol. 125. – P. 979–986.

I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov

METHOD FOR DETERMINING AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF DIFFUSER VENTILATION CHANNELS OF BRAKE DISCS OF VEHICLES

Abstract. The intensity of heat removal by convective heat transfer from ventilated brake discs of wheeled vehicles is directly affected by the amount and passage time of the air flow through the ventilation apparatus. The more intense the air flow at the inlet and slower at the outlet to the ventilation unit, the more intensively the cooling of the brake disc will take place. It is possible to slow down the speed of air wind passage by creating artificial obstacles or by switching from laminar to turbulent flow regime. The research methodology proposed in this paper is able to characterize the mechanism of places` formation of high and low pressure in the ventilation duct and the occurrence of vortex flows during the turbulent flow of the air flow.

Keywords: air flow, ventilation apparatus, brake disc, boundary layer, pressure sensor, rarefaction zone, high pressure zone, direction of movement.

For citation: Yaitskov, I. A. Method for determining aerodynamic characteristics of diffuser ventilation channels of brake discs of vehicles / I. A. Yaitskov, E. S. Fedotov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No 1. – P. 257–263. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_257.

Сведения об авторах**Яицков Иван Анатольевич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
декан электромеханического факультета,
e-mail: yia@rgups.ru

Федотов Евгений Сергеевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
аспирант,

Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),
кафедра «Транспортные процессы и технологические комплексы»,
старший преподаватель,
e-mail: avtoru2009@mail.ru

Information about the authors**Yaitskov Ivan Anatolievich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and Car Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Dean of Electromechanical Faculty,
e-mail: yia@rgups.ru

Fedotov Evgeny Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Postgraduate Student,

Kuban State Technological University (KubSTU),
Chair «Transport Processes and Technological Complexes»,
Senior Lecturer,
e-mail: avtoru2009@mail.ru

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 : 621.311.4 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_264

*В. В. Доманский***ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОД РАСЧЕТА РИСКА ОТКАЗА ПРИ ДРЕЙФЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Аннотация. Предложен метод управления мониторингом и техническим обслуживанием устройств электроснабжения тяги поездов. Метод реализует комплексный подход к повышению эффективности эксплуатации устройств электроснабжения с возможностью прогноза вероятности состояния силового трансформатора (работоспособность или восстановление). Реализация метода позволит принимать обоснованные решения по использованию полного ресурса трансформатора без угрозы риска отказа или преждевременного вывода из эксплуатации.

Ключевые слова: эффективность эксплуатации, управление, техническое обслуживание, электрооборудование, мониторинг, марковский процесс, риск отказа.

Для цитирования: Доманский, В. В. Информационные технологии и метод расчета риска отказа при дрейфе технического состояния тягового трансформатора / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_264.

Введение

В структуре затрат железнодорожного транспорта расходы на электроэнергию на тягу поездов занимают значительную часть. Наиболее удобным показателем с точки зрения учета и анализа расхода энергии и эффективности электрической тяги является удельный расход электроэнергии на тягу поездов. Важным представляется исследование факторов, влияющих на данный показатель, с целью поиска путей и средств их оптимизации. К таким факторам следует отнести технические показатели эксплуатационной работы, качественные характеристики использования подвижного состава, производственные затраты, технологические потери, которые на сегодня в системе тягового электроснабжения составляют 107,3 кВтч на 10 тыс. ткм брутто. Не менее важным является также анализ устойчивости электроснабжения, где в качестве определяющего фактора можно выделить удельное время перерыва электроснабжения тяги поездов, среднегодовое значение которого, по данным исследований, составляет на 100 км развернутой длины 1,08 ч. Данные статистического учета числовых характеристик основных объектов системы электроснабжения тяги поездов приведены в табл. 1 [1].

*Таблица 1***Количественные значения основных элементов системы электроснабжения**

| Показатель | Значение | | | |
|-------------------------------------------------|----------|-----------|-----------|----------|
| Общее число тяговых подстанций | 1401 | | | |
| Число тяговых подстанций переменного тока | 463 | | | |
| Количество понижающих и тяговых трансформаторов | 4668 | | | |
| Срок службы трансформаторов | > 40 лет | 30–40 лет | 20–30 лет | < 20 лет |
| | 5,2 % | 25,4 % | 50,5 % | 19,4 % |

По нормативным документам срок службы трансформаторов составляет не менее 25 лет, а через 12 лет требуется капитальный ремонт. В среднем ежегодно происходит 15–20 повреждений тяговых трансформаторов. Большинство трансформаторов для подстанций переменного тока разрабатывались по общепромышленному ГОСТу и не обеспечивают необходимой динамической устойчивости в режиме работы тяговой сети (величина и количество коротких замыканий). Это является объективной причиной их повреждений на подстанциях близких к центрам генерирования мощности [2]. Управление устройствами тягового электроснабжения требует на современном этапе разработки информационных технологий, позволяющих контролировать множество факторов, основными категориями кото-

рых являются электрические (напряжение, мощность, токи), механические (вибрация, движение), физические (температура, давление жидкостей, состав газов) и др. Вместе с тем не установлено оптимальное взаимодействие между различными подсистемами управления технологическими процессами объектов тягового электроснабжения. В процессах сервисного обслуживания оборудования не в полном объеме используется статистическая информация о результатах проведения аварийных работ, отказах оборудования, дефектах и т.д. Как правило, оперативная информация о состоянии оборудования фиксируется. Однако нет системности при анализе возникновения неисправностей и качества выполнения ремонтов. Низкая оперативность принятия решений при изменениях рабочих параметров режимов тяги и отсутствие системного анализа выполненных работ на силовом оборудовании тягового электроснабжения требуют поиска новых технологических подходов, ориентированных на эффективную эксплуатацию электрооборудования и ресурсосбережение в условиях значительного износа его ресурса. В процессе перехода к перспективным способам обслуживания устройств электроснабжения тяги поездов по состоянию на базе комплексной диагностики электрооборудования необходимо использование информационных технологий. В настоящее время управление техническим состоянием электрооборудования дистанций электроснабжения железных дорог России выполняется в соответствии с нормативными документами [2]. Нормативная база определяет поддержание необходимого уровня надежности электрооборудования в процессе эксплуатации. Эксплуатация оборудования при использовании системы планово-предупредительных ремонтов без учета действительной потребности в их выполнении неэффективна и приводит к неоправданным затратам. Техническое состояние электрооборудования в момент проведения работ может и не требовать обслуживания и замены, если не достигнута критическая степень его износа. Вместе с тем старение устройств тягового электроснабжения требует оценки уровня риска его эксплуатации за пределами установленного срока службы. Рост повреждаемости после 30 лет эксплуатации свидетельствует о несовершенстве системы мониторинга, диагностики и технического обслуживания трансформаторов [1, 3].

Результаты обследований трансформаторов мощностью от 6,3 до 1000 МВт в разных странах и климатических зонах, показывают, что 70 % трансформаторов имеют наработку более 25 лет, а 30 % – требуют повышенного контроля [4]. Необходимость ресурсосбережения изменяет вектор развития технического обслуживания устройств электроснабжения (УЭ). Выполнение этого условия возможно при качественном управлении обслуживанием оборудования и комплексном применении информационных технологий и методов диагностики УЭ [5]. Многими компаниями используется японская система технического обслуживания оборудования Total Productive Maintenance, которая обеспечивает эффективность эксплуатации оборудования на протяжении всего жизненного цикла. Перспективны и системы технологий обслуживания и ремонта на основе стандартов серии ISO 9000.

Однако специфика работы железных дорог требует своих технологий эксплуатации на базе энерго- и ресурсосбережения с применением информационных систем управления технологическим процессом обслуживания устройств тягового электроснабжения [6]. Для повышения эффективности эксплуатации силового электрооборудования необходимо внедрение современных систем технического обслуживания по состоянию и решение следующих задач:

- модернизировать информационную систему управления с учетом комплекса организационных, технических и финансовых факторов;
- повысить эффективность эксплуатации силовых трансформаторов с учетом изменения основных параметров тяговой сети, в том числе нагрузки, требуемой мощности, графика движения, температуры окружающей среды и т. д.

Решение указанных задач способствует повышению надежности системы тягового электроснабжения, эффективности эксплуатации оборудования и снижению затрат на техническое обслуживание [3, 5, 7].

Для формализации задачи синтеза структуры сложных систем управления техническим обслуживанием силового оборудования тяговых подстанций рассмотрим множества: F – функционал системы (множество выполняемых операций), $f \in F$; P – методы и алгоритмы управления, определяющие структуру системы, $p \in P$; R – взаимосвязанная совокупность процессов (элементов) системы. Тогда получаем оптимизационную задачу, в которой ищется экстремум целевой функции S на пересечении указанных множеств:

$$S\{f \in F(p \in P)\}R\{m \in M\} \rightarrow \text{extr.} \quad (1)$$

Подобными элементами сложных систем технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) силового электрооборудования могут быть средства информационных технологий и комплексного диагностирования для регистрации и обработки информации в аналитических центрах управления [5–7].

В результате решения указанных выше задач достигается повышение эффективности управления и работы автоматизированных рабочих мест энергодиспетчеров, осуществляются классификация, регистрация, хранение, обработка информации о техническом состоянии электрооборудования, производятся анализ причин отказов, оценка стоимости устранения и формирование графиков технического обслуживания и ремонтов, выполняются обоснование и учет планируемых расходов на ремонт и техническое обслуживание, а также формирование заказов на запасные части и материалы.

Задача оснащения электрооборудованием объектов тягового электроснабжения требует комплексного подхода, предполагающего взаимосвязанное подключение подсистем управления, слежения, диагностики и контроля с целью автоматизации объекта в целом. Это обеспечит минимизацию удельных расходов на один информационный сигнал, что обуславливает экономическую целесообразность подхода.

Целью исследования является разработка методов и способов повышения эффективности эксплуатации силового электрооборудования тяговых подстанций путем модернизации системы технического обслуживания и ремонта на базе информационных технологий.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- разработать структуру системы управления техническим обслуживанием и ремонтом силового электрооборудования тягового электроснабжения на базе информационных технологий;
- разработать метод расчета риска отказа тягового трансформатора при дрейфе его технического состояния.

1 Структура системы управления ТО и Р силового электрооборудования тягового электроснабжения

На основании анализа существующих систем технического обслуживания и ремонта силового оборудования энергетических систем и электротяговых сетей железных дорог разработана структура управления мониторингом и техническим обслуживанием силового оборудования тягового электроснабжения (рис. 1).

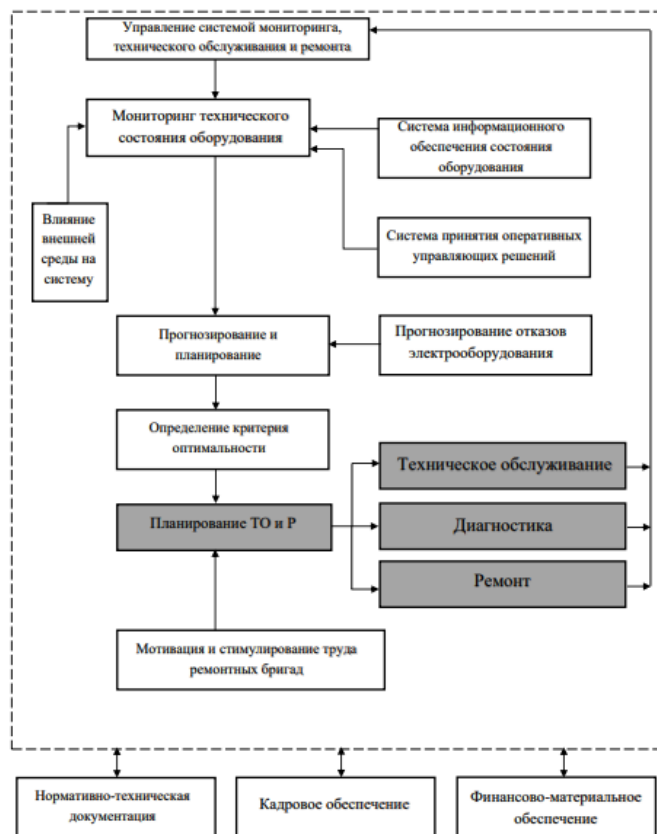


Рис. 1. Схема управления ТО и Р электрооборудования

Предлагаемый подход к решению задачи повышения эффективности эксплуатации электрооборудования тяговых подстанций не рассматривался в нормативно-технической документации и инструкциях обслуживания трансформаторов, выключателей и другого силового электрооборудования [1, 2].

Информационная система управления процессами ТО и Р должна включать в себя комплекс организационных, технических и финансовых мероприятий, мониторинг и диагностику оборудования, и автоматизацию управления процессами эксплуатации. В качестве показателей управления ТО и Р электрооборудования тягового электроснабжения используются следующие параметры: интервалы времени между операциями ТО и Р, диагностирования, локализации и ликвидации отказов, а также оценка остаточного ресурса и погрешности измерения мощности, числа пусков и др. Пункты формирования выходных сигналов систем контроля и диагностики состояния элементов оборудования определим, как информационно-диагностические точки (ИДТ). Для нахождения показателей их надежности используется принцип функционирования восстанавливаемой сложной системы [7].

Структура устройства электрооборудования представляется в виде дерева, элементы которого являются функциональными подсистемами, рассматриваемыми во взаимосвязи и образующими множество S , $|S| = N$. Только работоспособность всех N подсистем одновременно обеспечивает нахождение электрооборудование в рабочем состоянии. Допустимое время исправной работы N -го составляющего элемента $T_{\text{доп}N}$ распределено по закону $Z_N(t) = P(t < T_{\text{доп}N})$ с интенсивностью λ_N , а время восстановления τ_N – по закону $B_N(t) = P(t < \tau_N)$ с интенсивностью μ_N . Количество ИДТ определяет размерность рассматриваемой функциональной модели.

Обозначим n – число диагностируемых по ИДТ составляющих элементов, $n < N$; суммарные интенсивности отказов:

- j -го элемента – λ_j , $\lambda_j = \sum_{i=1}^n \lambda_i$, $j = \overline{1, N}$;
- электрооборудования – λ_0 , $\lambda_0 = \sum_j^N \lambda_j$.

Тогда глубина диагностирования d определяется отношением:

$$d = \frac{\lambda_j}{\lambda_0}, \quad j = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Работоспособность электрооборудования определяется видами и степенью неисправностей и дефектов, входящих в него элементов. Дефекты по степени риска (СР) вероятности наступления отказа $\overline{P}(t) = 1 - Z_N(t)$ можно разделить на следующие категории: не опасные для функционирования электрооборудования (СР-1); дефекты относительной опасности (СР-2); опасные для функционирования (СР-3). Соответственно для каждого уровня опасности можно ввести вероятности P_i пребывания составляющего элемента в i -м состоянии, $i = 1, 2, 3$. Обозначив P_N – вероятность безотказной работы элемента N , получим формулу для определения коэффициента степени риска отказа:

$$K_{\text{СР}} = 1 - \frac{P_N}{P_i}. \quad (3)$$

Определяющие показатели (ОП), от которых зависит работоспособность электрооборудования, формируют вектор $\overline{X}(t)$, компонентами которого являются независимые составляющие частные ОП каждого элемента $X_d(t)$, $d = \overline{1, N}$. Принадлежность допустимому множеству изменения вектора ОП $G = \|\overline{G_1}, \overline{G_d}\|$ задает условие работоспособности оборудования: $\overline{X}(t) \in \overline{G}$. Если хотя бы для одного компонента $X_d(t)$ вектора $\overline{X}(t)$ частного ОП выполняется условие $\overline{X}_d(t) \notin G_d$, то электрооборудование не считается работоспособным. Допустимое среднее значение ОП N -го составляющего элемента, $d \neq N$, определяет пороговое значение осуществления перехода работоспособного состояния в неработоспособное:

$$X_{d_{\text{доп}}} = X_0(1 + K), \quad (4)$$

при этом начальное состояние работоспособности электроснабжения характеризуется случайной величиной X_0 , которая при небольших объемах выборки подчиняется нормальному распределению; допустимое значение нахождения ОП в пределах области N_d определяется коэффициентом K . Нахождение за пределами допустимой области N_d любого ОП является критерием отказа электрооборудования. Тогда соответственно вероятность пребывания ОП в N_d в момент времени t ($t > t_0$) определяет вероятность безотказной работы каждого элемента из множества N . При этом должны соблюдаться условия работоспособности элемента в начальный момент времени t_0 и равенства начального состояния работоспособности ОП значению X_0 . Следует отметить, что компоненты вектора ОП $X_d(t)$, представляющие процессы постепенных отказов, характеризующихся интенсивностью перехода электрооборудования из одного состояния в другое, удовлетворяют условиям стационарности и монотонности. Проведенные исследования позволили считать этот процесс марковским [8, 9].

2 Метод расчета риска отказа тягового трансформатора при дрейфе его технического состояния

Рассмотрим граф состояний процесса перехода силового трансформатора из области работоспособного O_1 в область неработоспособного состояния O_2 (рис. 2).

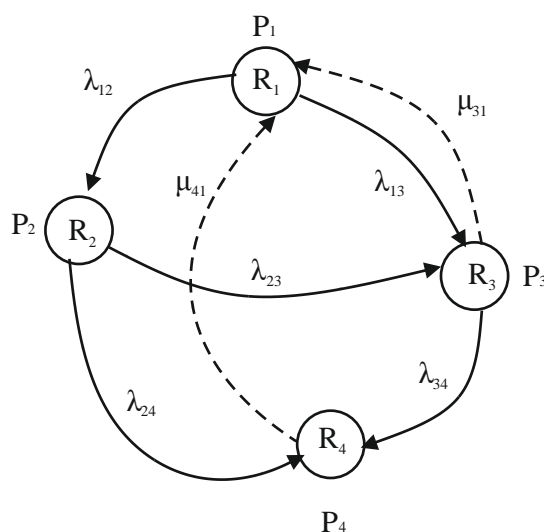


Рис. 2. Граф состояний и переходов трансформатора:

R_1 – трансформатор исправен и находится в работе; R_2 – трансформатор в состоянии скрытого отказа (СР-1); R_3 – трансформатор находится в состоянии восстановления или назначается плановое техническое обслуживание (СР-2); R_4 – трансформатор находится в состоянии аварийного ремонта (СР-3); дуги орграфа λ_{12} , λ_{13} , λ_{23} , λ_{24} , λ_{34} означают интенсивность переходов при изменении технического состояния; дуги μ_{31} , μ_{41} – интенсивность восстановления

Для рассматриваемого на рис. 2 процесса перехода трансформатора в различные состояния система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1(t) + \mu_{31}P_3(t) + \mu_{41}P_4(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) - (\lambda_{34} + \mu_{31})P_3(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{34}P_3(t) - \mu_{41}P_4(t). \end{cases} \quad (5)$$

Систему (5) можно дополнить условием нормировки состояния трансформатора:

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1. \quad (6)$$

Для расчета перехода трансформатора из O_1 в O_2 и обратно выбраны статистические данные эксплуатации трансформатора: $\lambda_{12} = 0,015$; $\lambda_{13} = 0,03$; $\lambda_{23} = 0,04$; $\lambda_{24} = 0,05$; $\lambda_{34} = 0,035$; $\mu_{31} = 0,05$; $\mu_{41} = 0,004$. Результаты расчета вероятности изменения состояния трансформатора представлены в

табл. 2 и на рис. 3, вероятность восстановления работоспособного состояния приведена на рис. 4, и вероятность работоспособного состояния – на рис. 5. Результаты расчетов, отображенные в табл. 2 и на рис. 3–5, позволяют оценить вероятность изменения состояния электрооборудования в условиях эксплуатации при переходе из O_1 в O_2 при соответствующих показателях интенсивности отказа и интенсивности восстановления.

Таблица 2

Результаты расчета вероятности изменения состояния трансформатора

| t , год | $P_1(t)$ | $P_2(t)$ | $P_3(t)$ | $P_4(t)$ |
|-----------|----------|----------|----------|-----------------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3,4 | 0,898 | 0,032 | 0,109 | $2,389 \cdot 10^{-3}$ |
| 5,8 | 0,806 | 0,058 | 0,197 | $4,754 \cdot 10^{-3}$ |
| 8,2 | 0,723 | 0,079 | 0,269 | $7,097 \cdot 10^{-3}$ |
| 10,6 | 0,649 | 0,096 | 0,328 | $9,418 \cdot 10^{-3}$ |
| 13 | 0,583 | 0,11 | 0,376 | 0,012 |
| 15,4 | 0,523 | 0,121 | 0,415 | 0,014 |
| 17,8 | 0,47 | 0,13 | 0,447 | 0,016 |
| 20,2 | 0,421 | 0,137 | 0,473 | 0,018 |
| 22,6 | 0,378 | 0,143 | 0,494 | 0,021 |
| 25 | 0,34 | 0,147 | 0,512 | 0,023 |

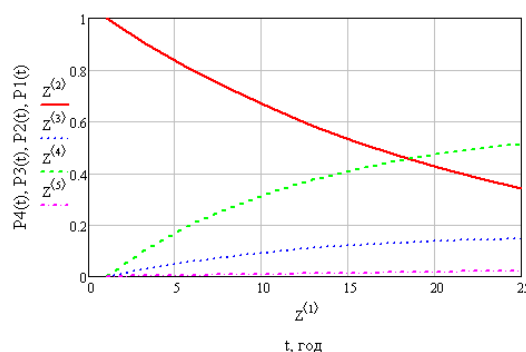


Рис. 3. Вероятность изменения состояния силового трансформатора тяговой подстанции: $Z^{<1>}$ – время перехода объектов системы из работоспособного состояния в другие виды состояний, а также интенсивности их восстановления; $Z^{<2>}$ – вероятность $P_1(t)$ (трансформатор исправен и находится в работе); $Z^{<3>}$ – вероятность $P_2(t)$ (трансформатор находится в состоянии скрытого отказа); $Z^{<4>}$ – вероятность $P_3(t)$ (трансформатор находится в состоянии восстановления или назначается плановое техническое обслуживание); $Z^{<5>}$ – вероятность $P_4(t)$ (трансформатор находится в состоянии ремонта)

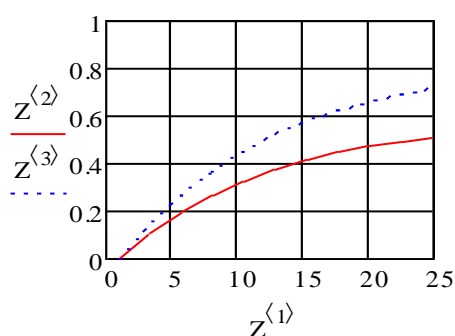


Рис. 4. Вероятность восстановления работоспособного состояния – $P_v(t)$: $Z^{<2>}$ – вероятность $P_v(t)$ при интенсивности восстановления $\mu = 0,05$; $Z^{<3>}$ – вероятность $P_v(t)$

при интенсивности восстановления $\mu = 0,07$

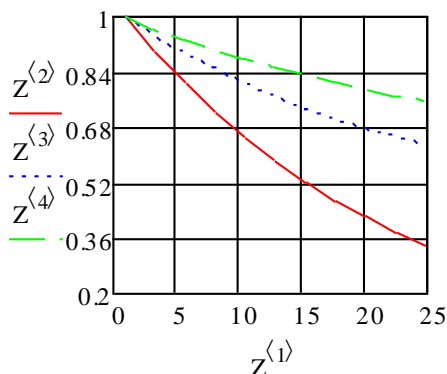


Рис. 5. Вероятность работоспособного состояния:

$Z^{<2>}$ – вероятность $P(t)$ – трансформатор находится в состоянии скрытого отказа ($\lambda = 0,045$);
 $Z^{<3>}$ – вероятность $P(t)$ – при уменьшении времени восстановления ($\mu = 0,02$); $Z^{<4>}$ – вероятность $P(t)$ при уменьшении интенсивности отказа ($\lambda = 0,035$) и времени восстановления ($\mu = 0,02$)

Результаты расчета степени риска наступления отказа – K_{CP} , согласно выражению (3) следующие: нахождение трансформатора в состоянии скрытого отказа $K_{CP}(P_2) = 4$; в состоянии необходимости восстановления или планового технического обслуживания $K_{CP}(P_3) = 2,5$; в состоянии необходимости ремонта $K_{CP}(P_4) = 46$. Предложенный метод расчета позволяет определить степень риска использования оборудования с учетом интенсивности его отказов и интенсивности восстановления с целью прогнозирования и предупреждения выхода из строя, а также обеспечения своевременного обслуживания и ремонта.

Обеспечение надежности и бесперебойной работы УЭ требует оказания мер, реализуемых комплексно системами изготовления, эксплуатации, службы поддержки и проведения технического обслуживания [10]. Фактические значения показателей контроля безопасности, предоставляемые службами управления надежностью предприятия-изготовителя, а также данные о технической разработке, монтаже и вводе в эксплуатацию участка УЭ обеспечивают обратную связь в системе диагностики и контроля надежности, сопоставление требуемой и фактической схем которой представлено на рис. 6.



Рис. 6. Схемы процессов управления надежностью и экономичностью устройств электроснабжения:

а – фактическая; *б* – требуемая

Сравнительный анализ схем показал, что требуемый уровень управления подразумевает осуществление совокупных мер по обеспечению надежности трехуровневой системой взаимодействия изготовителя, эксплуатирующей ЭЧ (дистанцией электроснабжения) и сервисной службы технического обслуживания.

3 Обсуждение результатов исследования

Информационные технологии составляют неотъемлемую основу всех процессов технического диагностирования. Развитие данного исследования позволяет совершенствовать ТО и Р. В данном случае использование экспертных систем (ЭС) является подходящим инструментарием для выбора и осуществления ресурсосберегающих технологий эксплуатации систем тягового электроснабжения с целью минимизации затрат на протяжении всех этапов УЭ. База для разрабатываемых ЭС формируется из исходных данных работы механизма синтеза эвристик. Например, удавшиеся случаи минимизации затрат на восстановление при эксплуатации силового оборудования фиксируются в базе методом ретроспекции. Продукция хранится в базе в виде иерархических структур или просто представляет некоторую совокупность. На рис. 7 показана диаграмма взаимодействия элементов ЭС для реализации ресурсосберегающих технологий эксплуатации и ремонта УЭ. Однако подобные алгоритмы и методы сбора и хранения данных ЭС требуют совершенствования систем управления устройствами тягового электроснабжения путем создания интегрированных систем, например, таких как российский продукт АСТМУ. В будущем такие ЭС будут необходимым инструментом аналитических центров.



Рис. 7. Диаграмма ЭС центров диагностики

Выводы

1 Разработаны научно обоснованные принципы построения перспективной системы эксплуатации устройств электроснабжения по состоянию и минимуму затрат в процессе их жизненного цикла

на базе комплексной диагностики параметров с анализом критериев состояния и упреждающей регулировкой или ремонтом оборудования.

2 Предложены информационные технологии оценки состояния устройств электроснабжения в процессе их эксплуатации на базе синтеза двух источников информации: диагностики в режиме реального времени и имитационного моделирования. Разработана обобщенная схема экспертной системы для анализа состояния устройств электроснабжения и выработки управляющих воздействий в аналитических центрах систем управления.

3 Показано, что эффективность работы системы технического обслуживания определяется такими факторами, как надежность силовых трансформаторов тяговых подстанций, продолжительность поиска отказов и ремонтных работ.

4 Установлено, что реализация ТО и Р с использованием информационных технологий управления технологическими процессами повышает эффективность эксплуатации силового электрооборудования тяговых подстанций.

Список литературы

1 Анализ работы Трансэнерго по итогам 2017 года / ОАО «Российские железные дороги»; Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД». – Москва, 2018. – 148 с.

2 **ГОСТ Р 57659-2017.** Методы испытаний объектов железнодорожного транспорта в целях продления назначенного срока службы. Часть 1. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения железной дороги. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 12 с.

3 **Ефимов, А. В.** Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – Москва: УМК МПС России, 2000. – 512 с. – ISBN 5-89035-022-6.

4 **Луковенко, А. С.** Повышение надежности оборудования электрических подстанций тягового электроснабжения при работе в критических режимах / А. С. Луковенко, Р. М. Христинич // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2016. – № 2. – С. 36–40. – ISSN 1995-5685.

5 **Костюков, А. В.** Экспериментальные исследования акустических характеристик трансформатора / А. В. Костюков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 127–132. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-12-127-133.

6 **Доманский, В. Т.** Повышение энергетической эффективности систем электроснабжения тяги и питающих линий энергосистем / В. Т. Доманский, В. В. Доманский, И. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 3. – С. 114–117. – ISSN 0201-727X.

7 **Доманский, В. В.** Информационные технологии режимов работы тягового электроснабжения и питающих их энергосистем / В. В. Доманский,

References

1 Analysis of the work of Transenergo at the end of 2017 / JSC “Russian Railways”; Transenergo – a Branch of JSC “Russian Railways”. – Moscow, 2018. – 148 p.

2 **GOST R 57659-2017.** Methods of testing railway transport facilities in order to extend the designated service life. Part 1. Power transformers and autotransformers of traction substations, transformer substations and linear traction power supply devices of the railway. – Moscow: Standartinform, 2017. – 12 p.

3 **Efimov, A. V.** Reliability and diagnostics of railway power supply systems / A. V. Efimov, A. G. Galkin. – Moscow: UMK MPS of Russia, 2000. – 512 p. – ISBN 5-89035-022-6.

4 **Lukovenko, A. S.** Improving the reliability of the equipment of electric substations of traction power supply when operating in critical modes / A. S. Lukovenko, R. M. Hristinich // ELECTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry. – 2016. – No. 2. – P. 36–40. – ISSN 1995-5685.

5 **Kostyukov, A. V.** Experimental studies of the acoustic characteristics of the transformer / A. V. Kostyukov // Bulletin of the Tula State University. Technical science. – 2021. – No. 12. – P. 127–132. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-12-127-133.

6 **Domansky, V. T.** Improving the energy efficiency of traction power supply systems and power supply lines / V. T. Domansky, V. V. Domansky, I. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2013. – No. 3. – P. 114–117. – ISSN 0201-727X.

7 **Domansky, V. V.** Information technologies of modes of operation of traction power supply and power systems feeding them / V. V. Domansky, G. A. Domanskaya, V. A. Vasenko // Vestnik

Г. А. Доманская, В. А. Васенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3(79). – С. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.

8 Analysis and optimization of the reactive power compensation modes in a power supply system / V. Yagup, K. Yagup, Yu. Kovalova [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Iss. 3/5 (99). – P. 13–22. – DOI 10.15587/1729-4061.2019.168584.

9 Sun, H.-Ch. Fault Diagnosis of Power Transformers Using Computational Intelligence : A Review / Huo-Ching Sun, Yann-Chang Huang, Chao-Ming Huang // Energy Procedia. – 2012. – No. 14. – P. 1226–1231. – DOI 10.1016/j.egypro.2011.12.1080.

10 Попова, Н. А. Применение современных информационных технологий в процессе подготовки персонала для управления объектами системы электроснабжения / Н. А. Попова, П. А. Бодров, И. Г. Акперов // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт : наука, образование, производство», («Транспорт-2021»). Т. 3. : Гуманитарные науки. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 230–234. – ISBN 978-5-907295-42-1

Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 3(79). – P. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.

8 Analysis and optimization of the reactive power compensation modes in a power supply system / V. Yagup, K. Yagup, Yu. Kovalova [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Iss. 3/5 (99). – P. 13–22. – DOI 10.15587/1729-4061.2019.168584.

9 Sun, H.-Ch. Fault Diagnosis of Power Transformers Using Computational Intelligence : A Review / Huo-Ching Sun, Yann-Chang Huang, Chao-Ming Huang // Energy Procedia. – 2012. – No. 14. – P. 1226–1231. – DOI 10.1016/j.egypro.2011.12.1080.

10 Popova, N. A. Application of modern information technologies in the process of personnel training for the management of power supply system facilities / N. A. Popova, P. A. Bodrov, I. G. Akperov // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Transport : science, education, production”, (“Transport-2021”). Vol. 3. : Humanities. – Rostov-on-Don, 2021. – P. 230–234. – ISBN 978-5-907295-42-1

V. V. Domansky

INFORMATION TECHNOLOGIES AND METHOD OF CALCULATING THE RISK OF FAILURE IN CASE OF DRIFT OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE TRACTION TRANSFORMER

Abstract. The paper proposes a method for controlling the monitoring and maintenance of train traction power supply devices. The method implements an integrated approach to improving the efficiency of operation of power supply devices with the possibility of predicting the probability of the power transformer state (operability or restoration). The implementation of the method will make it possible to make an informed decision on the use of the transformer circle life without the failure risk or premature decommissioning.

Keywords: operational efficiency, management, maintenance, electrical equipment, monitoring, Markov process, failure risk.

For citation: Domansky, V. V. Information technologies and method of calculating the risk of failure case of drift of the technical condition of the traction transformer / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_264.

Сведения об авторах

Доманский Василий Валерьевич
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Информатика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: domansk2015@mail.ru

Information about the authors

Domansky Vasily Valerievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Science»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: domansk2015@mail.ru

А. И. Осипова

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ, ВХОДЯЩЕГО В СИСТЕМУ ДВУХУРОВНЕГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР

Аннотация. Рассмотрена задача расчета токов короткого замыкания, протекающих в металлической оболочке ВОЛС, интегрированной в систему заземления опор контактной сети. Приведена методика определения токов в металлической части ВОЛС для различных вариантов питания межподстанционной зоны. Сделаны выводы, предложены критерии определения возможности применения ВОЛС в качестве дополнительного проводника с позиций обеспечения расчетного срока службы оптоволоконного кабеля.

Ключевые слова: токи короткого замыкания, волоконно-оптический кабель, групповое заземление опор, термическая деградация, тепловой импульс.

Для цитирования: Осипова, А. И. Обеспечение термической стойкости волоконно-оптического кабеля, входящего в систему двухуровневого заземления опор / А. И. Осипова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 274–281. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_274.

Введение

Применение волоконно-оптического кабеля типа ОКГТ в процессе сооружения волоконно-оптических линий связи на сети электрифицированных железных дорог открывает широкие возможности для дальнейшего совершенствования системы тягового электроснабжения. Одним из таких решений является использование металлической оболочки кабеля в качестве дополнительного, резервного проводника, интегрированного в систему группового заземления опор. При этом появится дополнительный путь протекания тока короткого замыкания, что позволит повысить надежность и безопасность функционирования железных дорог постоянного тока [1]. В случае возникновения аварийного режима работы в системе тягового электроснабжения ток короткого замыкания будет протекать по всем элементам, образующим цепь обратного тока, в том числе по металлической оболочке волоконно-оптического кабеля. Протекание тока приводит к нагреву структуры кабеля, что может сказаться на его технических характеристиках и сроке службы. Для всех типов ОКГТ, производимых в настоящее время, в паспортных данных указывают в том числе две величины – предельное значение тока, протекающего по кабелю в течение одной секунды, и максимальная величина теплового импульса.

Как известно, максимально допустимая температура нагрева ОКГТ при воздействии длительно протекающего тока не должна превышать значения 85 °С [2]. При увеличении температуры свыше данного значения происходит изменение структуры отражающего покрытия, нанесенного на внутренние стенки волоконно-оптической трубки, что, в свою очередь, приводит к затуханию информационного сигнала и выходу из строя линии связи. Таким образом, расчет тепловых процессов, возникающих в кабеле ОКГТ при протекании по нему токов большой величины, является достаточно важной и трудоемкой задачей, для решения которой в первую очередь необходимо владеть информацией о протекающих по кабелю токах.

Нагрев структуры кабеля ОКГТ и, в частности, её металлических элементов происходит вследствие протекания в данных проводниках электрического тока и описывается законом Джоуля – Ленца. Как известно из основ электротехники, при протекании электрического тока по проводнику в последнем возникают потери мощности, которые проявляются в виде выделения тепловой энергии в структуре проводника. Для анализа теплофизических процессов в структуре ОКГТ в качестве основного деструктивно влияющего фактора будем полагать ток короткого замыкания, ответвляющийся в ОКГТ при авариях. Для расчета величины тока, протекающего в ОКГТ, в качестве исходных данных примем результаты расчета токов короткого замыкания вдоль исследуемой зоны, выполненного по методике, описанной в работе [3]. Токи, протекающие по существующему тросу группового заземления слева и справа от точки короткого замыкания (КЗ), обозначим как I_{T1} и I_{T2} . Для дальнейшей работы будем использовать схему замещения, показанную на рис. 1, указав на ней направления токов в элементах схемы.

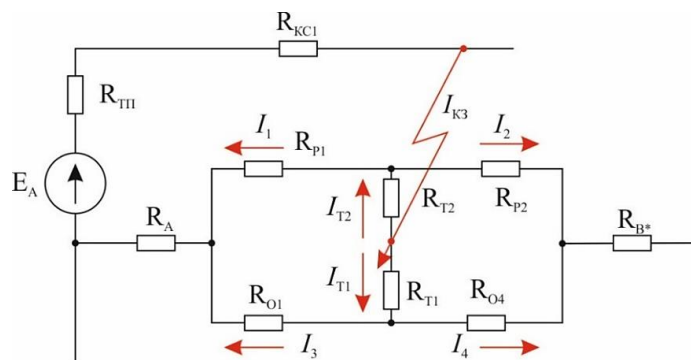


Рис. 1. К расчёту токов, протекающих в ОКГТ на однопутном участке при одностороннем питании контактной сети, точка КЗ левее заземляющего спуска

В схеме замещения приняты следующие обозначения элементов:

$R_{КС}$ – сопротивление контактной сети от тяговой подстанции до точки КЗ;

$R_{П1}$, $R_{П2}$ – эквивалентное сопротивление двух ниток рельсов от места электрического соединения с ОКГТ точки подключения заземляющего спуска участка ТГЗ, где произошло КЗ, левее и правее соответственно;

R_A , R_{B^*} – сопротивление ОКГТ от места присоединения к контуру тяговых подстанций электрического соединения с рельсом слева и справа;

$R_{Т1}$ – сопротивление одного пролёта троса группового заземления левее точки КЗ;

$R_{Т2}$ – сопротивление одного пролёта троса группового заземления правее точки КЗ;

$R_{ТП}$ – сопротивление тяговой подстанции, включающие сопротивление понизительных трансформаторов, выпрямительно-инверторных преобразователей и сопротивление внешней энергосистемы;

$R_{О1}$ и $R_{О4}$ – сопротивления, учитывающие активную составляющую сопротивления ОКГТ от ближайшей точки заземления ОКГТ на рельс до точки соединения ОКГТ и ТГЗ.

Для двух независимых контуров, в которые включено сопротивление троса группового заземления опор, можно составить уравнения:

$$\begin{cases} I_3 \cdot R_{О1} - I_1 \cdot R_{П1} - I_{Т2} \cdot R_{Т2} + I_{Т1} \cdot R_{Т1} = 0, \\ I_2 \cdot R_{П2} - I_4 \cdot R_{О4} + I_{Т2} \cdot R_{Т2} - I_{Т1} \cdot R_{Т1} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

После преобразования получим

$$\begin{cases} I_1 = \frac{I_{Т1} \cdot R_{Т1} - I_{Т2} \cdot R_{Т2} + I_3 \cdot R_{О1}}{R_{П1}}, \\ I_2 = \frac{I_{Т1} \cdot R_{Т1} - I_{Т2} \cdot R_{Т2} + I_4 \cdot R_{О4}}{R_{П2}}. \end{cases} \quad (2)$$

С учётом того, что

$$I_1 + I_2 = I_{Т2}, \quad (3)$$

$$I_3 + I_4 = I_{Т1}.$$

Перепишем последнюю систему выражений:

$$I_{Т2} = \frac{I_{Т1} \cdot R_{Т1} - I_{Т2} \cdot R_{Т2} + I_3 \cdot R_{О1}}{R_{П1}} + \frac{I_{Т1} \cdot R_{Т1} - I_{Т2} \cdot R_{Т2} + (I_{Т1} - I_3) \cdot R_{О4}}{R_{П2}}. \quad (4)$$

Решив данное выражение относительно искомой величины, получим

$$I_{О1} = I_3 = \frac{(I_{Т1} \cdot R_{Т1} - I_{Т2} \cdot R_{Т2}) \cdot (R_{П1} + R_{П2}) + I_{Т1} \cdot R_{О4} \cdot R_{П1} - I_{Т2} \cdot R_{П1} \cdot R_{П2}}{R_{О4} \cdot R_{П1} - R_{О1} \cdot R_{П2}}. \quad (5)$$

Ток на втором участке ОКГТ можно определить, используя выражение

$$I_{O2} = I_{O3} = I_4 = I_{T1} - I_3. \quad (6)$$

Пользуясь аналогичными рассуждениями, получим выражения для расчёта доли тока в ОКГТ при проходе заземляющего спуска. При переходе точки КЗ через заземляющий спуск (рис. 2) расчётное выражение принимает вид

$$I_{O3} = I_3 = \frac{(I_{T3} \cdot R_{T3} - I_{T2} \cdot R_{T2}) \cdot (R_{P1} + R_{P2}) + I_{T3} \cdot R_{O3} \cdot R_{P1} - I_{T2} \cdot R_{P1} \cdot R_{P2}}{R_{O3} \cdot R_{P1} - R_{P2} \cdot R_{O1} - R_{P2} \cdot R_{O2}}. \quad (7)$$

$$I_{O2} = I_{O1} = I_4 = I_{T1} - I_3. \quad (8)$$

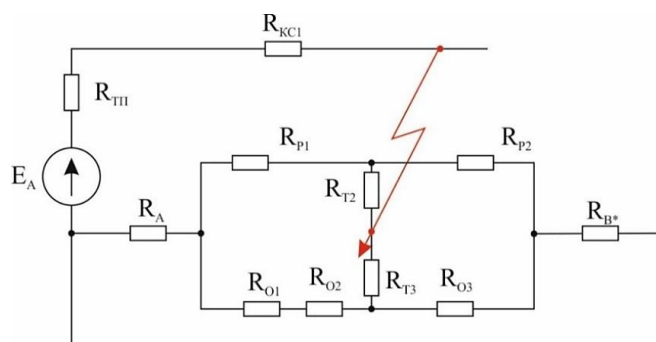


Рис. 2. К расчёту токов, протекающих в ОКГТ на однопутном участке при одностороннем питании контактной сети, точка КЗ правее заземляющего спуска

Определенные значения токов в ОКГТ необходимо сравнить с допустимыми значениями токов, длительно протекающих в применяемом типе волоконно-оптического кабеля. Результат сравнения позволит сделать вывод о возможности использования кабеля в качестве дополнительного проводника в системе группового заземления опор контактной сети постоянного тока при одностороннем питании межподстанционной зоны. Для случая, когда на участке применяется схема двустороннего питания контактной сети, подход к расчету токов в волоконно-оптической линии связи будет подобен описанному ранее, но с учетом наличия нескольких источников энергии. Рассмотрим методику расчёта тока в ОКГТ при использовании схем двустороннего питания.

На рис. 3 показана схема замещения для расчета токов КЗ в тяговой сети постоянного тока при двустороннем питании. Эта схема справедлива для случая, когда точка КЗ расположена левее заземляющего спуска. Расставим токи во всех ветвях схемы и запишем уравнения, используя законы Кирхгофа. В процессе работы составляющие тока КЗ, протекающего через шины тяговых подстанций, будем считать известными. Для этого используем результаты расчета токов КЗ вдоль исследуемой зоны, выполненной по методике, описанной в работе [3].

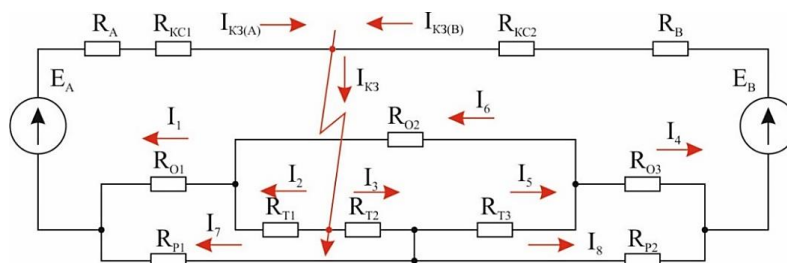


Рис. 3. К расчёту токов в ОКГТ на однопутном участке при двустороннем питании контактной сети, точка КЗ левее заземляющего спуска

В схеме замещения дополнительно к ранее описанным приняты следующие обозначения:

$R_{КС1}, R_{КС2}$ – сопротивление контактной сети от тяговой подстанции до точки КЗ, левее и правее соответственно;

R_A, R_B – сопротивление ОКГТ от места присоединения к контуру тяговых подстанций до электрического соединения с рельсом слева и справа;

R_{T1} – сопротивление ТГЗ левее точки КЗ;

R_{T2} – сопротивление ТГЗ правее точки КЗ;

R_{T3} – сопротивление ТГЗ от заземляющего спуска до места соединения с ОКГТ;

R_{O1} и R_{O3} – сопротивления ОКГТ от ближайшей точки заземления ОКГТ на рельс до точки соединения ОКГТ и ТГЗ слева и справа;

R_{O2} – сопротивление ОКГТ между точками соединения участка ТГЗ и ОКГТ.

$$I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) + I_2 \cdot R_{T1} + I_1 \cdot R_{O1} = E_A, \quad (9)$$

$$I_3 \cdot R_{T2} + I_7 \cdot R_{P1} - I_1 \cdot R_{O1} - I_2 \cdot R_{T1} = 0. \quad (10)$$

Из формулы (9) получим

$$I_2 = \frac{E_A - I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_1 \cdot R_{O1}}{R_{T1}}. \quad (11)$$

Учитывая, что

$$I_3 = I_{K3} - I_2 = \frac{I_{K3} \cdot R_{T1} - E_A + I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) + I_1 \cdot R_{O1}}{R_{T1}}, \quad (12)$$

$$I_7 = I_{K3(A)} - I_1. \quad (13)$$

Сложим значения из формул (9) и (10):

$$I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) + I_3 \cdot R_{T2} + I_7 \cdot R_{P1} = E_A. \quad (14)$$

Подставим в полученное выражение соотношения (12) и (13):

$$I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) + \frac{I_{K3} \cdot R_{T1} - E_A + I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) + I_1 \cdot R_{O1}}{R_{T1}} R_{T2} + (I_{K3(A)} - I_1) \cdot R_{P1} = E_A.$$

После преобразования, с учетом того что $I_{O1} = I_1$, получим

$$I_{O1} = \frac{I_{K3} \cdot R_{T1} \cdot R_{T2} + I_{K3(A)} \cdot [(R_A + R_{KC1} + R_{P1}) \cdot R_{T1} + (R_A + R_{KC1}) \cdot R_{T2}] - E_A \cdot (R_{T1} + R_{T2})}{R_{P1} \cdot R_{T1} - R_{O1} \cdot R_{T2}}. \quad (15)$$

Ток I_4 определим из соотношения

$$I_4 = I_{O3} = I_{K3(B)} - I_8.$$

После преобразования получим:

$$I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) - I_8 \cdot R_{P2} + I_7 \cdot R_{P1} = E_A - E_B = 0.$$

$$I_8 = \frac{I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) + (I_{K3(A)} - I_1) \cdot R_{P1}}{R_{P2}}. \quad (16)$$

$$I_{O3} = I_{K3(B)} - \frac{I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) + (I_{K3(A)} - I_{O1}) \cdot R_{P1}}{R_{P2}}. \quad (17)$$

Для расчёта тока в ОКГТ на участке 2 составим уравнение:

$$I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) - I_4 \cdot R_{O3} + I_1 \cdot R_{O1} + I_6 \cdot R_{O2} = E_A - E_B = 0.$$

Из уравнения определим искомый ток:

$$I_{O2} = I_6 = \frac{I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) - I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) + I_4 \cdot R_{O3} - I_1 \cdot R_{O1}}{R_{O2}}. \quad (18)$$

При перемещении точки КЗ правее заземляющего спуска схема замещения будет соответствовать случаю, показанному на рис. 4.

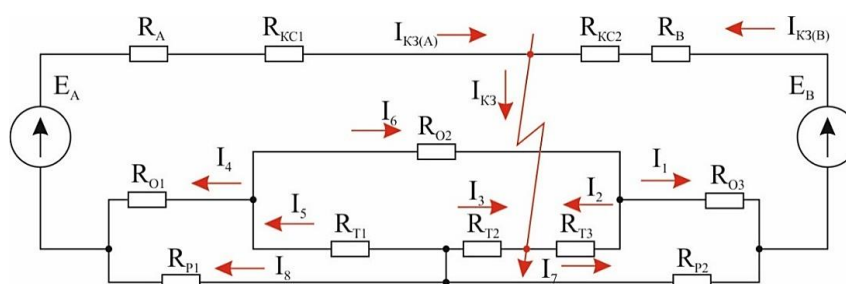


Рис. 4. К расчёту токов в ОКГТ на однопутном участке при двустороннем питании контактной сети, точка КЗ правее заземляющего спуска

Сравнивая рис. 3 и 4, можно заключить, что они зеркально повторяют друг друга. С учётом этого:

$$I_{O3} = \frac{I_{K3} \cdot R_{T3} \cdot R_{T2} + I_{K3(B)} \cdot [(R_B + R_{KC2} + R_{P2}) \cdot R_{T3} + (R_B + R_{KC2}) \cdot R_{T2}] - E_B \cdot (R_{T3} + R_{T2})}{R_{P2} \cdot R_{T3} - R_{O3} \cdot R_{T2}}. \quad (19)$$

$$I_{O1} = I_{K3(A)} - \frac{I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) - I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) + (I_{K3(B)} - I_{O3}) \cdot R_{P2}}{R_{P1}}. \quad (20)$$

$$I_{O2} = I_6 = \frac{I_{K3(A)} \cdot (R_A + R_{KC1}) - I_{K3(B)} \cdot (R_B + R_{KC2}) + I_{O1} \cdot R_{O1} - I_{O3} \cdot R_{O3}}{R_{O2}}. \quad (21)$$

Полученные значения токов на участках волоконно-оптического кабеля необходимо сравнить с максимально допустимыми токами для соответствующего типа кабеля ОКГТ, применяемого на участке, и сделать выводы о допустимости принятия решения об интеграции последнего в систему группового заземления опор с учетом данных о времени протекания этих токов. При отсутствии данных о допустимых значениях токов и допустимом времени их протекания можно использовать числовые методы расчета теплотехнических характеристик ОКГТ или компьютерные программы, позволяющие выполнять моделирование таких процессов.

Вывод

Для обеспечения расчётного срока службы ОКГТ, применяемого в составе двухуровневой системы группового заземления опор предложен алгоритм проверки волоконно-оптического кабеля на термическую стойкость при использовании системы двухуровневого заземления опор контактной сети. Предлагаемая методика позволит на стадии проектирования либо на стадии реконструкции принять обоснованное решение о влиянии токов КЗ в оболочке ОКГТ на срок службы оптического волокна, находящегося в теле кабеля.

Список литературы

- 1 **Осипова, А. И.** Особенности организации альтернативной схемы заземления опор контактной сети постоянного тока / А. И. Осипова, В. А. Осипов // Сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 45–47.
- 2 СТО. Руководство по расчёту режимов плавки гололеда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределенного контроля температуры ОКГТ в режиме плавки : утвержден и введен в действие приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 18.05.2012 № 264. – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29.060.50.122-2012.pdf
- 3 **Осипова, А. И.** Моделирование и расчёт токов короткого замыкания в системе постоянного тока с дополнительным тросом группового заземления опор контактной сети / А. И. Осипова, В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4. – С. 127–133. – ISSN 0201-727X.
- 4 **Жарков, Ю. И.** Проблемы организации защиты тяговой сети постоянного тока от коротких замыканий при повышенных токовых нагрузках / Ю. И. Жарков, Е. П. Фигурнов // Электрификация транспорта. – 2014. – № 7. – С. 28–31. – ISSN 2307-4221.
- 5 **Фигурнов, Е. П.** Параметры совместных схем замещения систем внешнего и тягового электропитания при коротком замыкании в контактной сети / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Л. А. Герман [и др.] // Электрические станции. – 2021. – № 7 (1080). – С. 20–26. – ISSN 0201-4564.
- 6 **Дынькин, Б. Е.** Анализ отказов релейных защит путем статистического моделирования их работы / Б. Е. Дынькин // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» / Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 24–28.
- 7 **Стороженко, Е. А.** Снижение влияния электрического поля высоковольтных линий электропередачи на волоконно-оптические линии связи / Е. А. Стороженко, Д. Е. Стороженко, А. С. Кляморов, К. С. Гукасов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2 (25). – С. 56. – ISSN 2073-8633.
- 8 **Бочев, А. С.** Влияние переменных электромагнитных полей высокой напряженности на интенсивность деградационных процессов в структуре волоконно-оптических кабелей / А. С. Бочев,

References

- 1 **Osipova, A. I.** Features of the organization of an alternative grounding scheme for DC contact network supports / A. I. Osipova, V. A. Osipov // Collection of scientific papers of the V International Scientific and Technical Conference «Energy of transport. Actual problems and tasks». – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 45–47.
- 2 SRT "Manual for calculating ice melting modes on a lightning-proof cable with a built-in optical cable (OCGT) and the use of distributed temperature control of OCGT in melting mode". Approved and put into effect : By Order of JSC FGC UES No. 264. dated 18.05.2012. – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29.060.50.122-2012.pdf
- 3 **Osipova, A. I.** Modeling and calculation of short-circuit currents in a DC system with an additional cable for group grounding of contact network supports / A. I. Osipova, V. A. Osipov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobcheniya. – 2019. – No. 4. – P. 127–133. – ISSN 0201-727X.
- 4 **Zharkov, Yu. I.** Problems of the organization of protection of the DC traction network from short circuits at elevated current loads / Yu. I. Zharkov, E. P. Figurnov // Elektrifikatsiya transport. – 2014. – No. 7. – P. 28–31. – ISSN 2307-4221.
- 5 **Figurnov, E. P.** Parameters of joint replacement schemes of external and traction power supply systems with a short circuit in the contact network / E. P. Figurnov, Yu. I. Zharkov, L. A. German [et al.] // Electric stations. – 2021. – No. 7 (1080). – P. 20–26. – ISSN 0201-4564.
- 6 **Dynkin, B. E.** Analysis of relay protection failures by statistical modeling of their operation / B. E. Dynkin // Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference «Energy of Transport. Actual problems and tasks» / Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobcheniya. – Rostov-on-Don, 2019. – P. 24–28.
- 7 **Storozhenko, E. A.** Reducing the influence of the electric field of high-voltage power transmission lines on fiber-optic communication lines / E. A. Storozhenko, D. E. Storozhenko, A. S. Klyamorov, K. S. Gukasov // Engineering Bulletin of the Don. – 2013. – No. 2 (25). – P. 56. – ISSN 2073-8633.
- 8 **Bochev, A. S.** Influence of variable electromagnetic fields of high intensity on the intensity of degradation processes in the structure of fiber-optic cables / A. S. Bochev, G. E. Soloviev,

Г. Е. Соловьев, В. А. Осипов, О. В. Невретдинова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 2(34). – С. 94–99. – ISSN 0201-727X.

9 **Капкаев, А. А.** Интеграция экранирующего провода в системе тягового электроснабжения с волоконно-оптической линией связи : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Капкаев Андрей Андреевич. – Ростов-на-Дону, 2017. – 208 С. – URL: <https://www.dissercat.com/content/integratsiya-ekraniruyushchego-provoda-v-sisteme-tyagovogo-elektrosnabzheniya-s-voikonno>.

10 СТО РЖД 07.021.1–2019. Стандарт ОАО «РЖД». Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 1. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения постоянного тока. Общие принципы и правила построения защит, блокировок и автоматики в системах электроснабжения : утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 15 января 2020) № 37/р.

11 Инструкция по предотвращению электротермической деградации волоконно-оптических кабелей, подвешенных на опорах контактной сети участков железных дорог ОАО «РЖД» с электротягой переменного тока. : утверждена вице-президентом ОАО «РЖД» В. Н. Сазоновым 05.06.2006.

12 Оптический кабель ОКГТ в грозозащитном тросе. Оптический кабель ОКФП в фазном проводе и арматура. – URL: <http://smartenergo.net> (дата обращения: 02.04.2023).

13 Кабель ОКГТ : [сайт компании «ТрансВОК»]. – URL: <http://www.transvoc.ru> (дата обращения: 02.04.2023).

14 СТО 56947007–33.180.10.173–2014. Методические указания по расчету термического воздействия токов короткого замыкания и термической устойчивости грозозащитных тросов и оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос, подвешиваемых на воздушных линиях электропередачи. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» : утвержден приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 21.05.2014 г. № 237. – URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/1e3/kf0fx7tlqzmsf4mmfa12ar3kjgx367t6.pdf> (дата обращения: 02.04.2023).

V. A. Osipov, O. V. Nevretdinova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobcheniya. – 2009. – No. 2(34). – P. 94–99. – ISSN 0201-727X.

9 **Капкаев, А. А.** Integration of a shielding wire in a traction power supply system with a fiber-optic communication line : dis. Candidate of Technical Sciences : 05.22.07 / Kapkaev Andrey Andreevich. – Rostov-on-Don, 2017. – 208 p. – URL: <https://www.dissercat.com/content/integratsiya-ekraniruyushchego-provoda-v-sisteme-tyagovogo-elektrosnabzheniya-s-voikonno>

10 STO RZD 07.021.1–2019 Standard of JSC «RZD». Protection of railway power supply systems from short circuits and overload. Part 1. Methodology for selecting protection settings in a DC traction power supply system. General principles and rules for the construction of protections, locks and automation in power supply systems. Approved and put into effect by the Order of JSC "Russian Railways" dated January 15, 2020) No. 37/R.

11 Instructions for the prevention of electrothermal degradation fiber-optic cables suspended on the supports of the contact network of railway sections of JSC "Russian Railways" with an alternating current electric traction. Approved. Vice-President of JSC "Russian Railways" V. N. Sazonov 05.06.2006.

12 OKGT optical cable in a lightning protection cable. OKFP optical cable in the phase wire and fittings. – URL: <http://smartenergo.net> (date of access: 02.04.2023).

13 OKGT cable: [website of the Trans-WOK company]. – URL: <http://www.transvoc.ru> (date of access: 02.04.2023).

14 STE 56947007-33.180.10.173-2014. Methodological guidelines for calculating the thermal effects of short-circuit currents and thermal stability of lightning protection cables and optical cables embedded in a lightning protection cable suspended on overhead power lines. The standard of the organization of JSC "FGC UES", approved by the order of JSC "FGC UES" dated 21.05.2014 No. 237. – URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/1e3/kf0fx7tlqzmsf4mmfa12ar3kjgx367t6.pdf> (date of access: 02.04.2023).

A. I. Osipova

ENSURING THE THERMAL STABILITY OF THE FIBER-OPTIC CABLE INCLUDED IN THE TWO-LEVEL GROUNDING SYSTEM OF THE SUPPORTS

Abstract. The paper considers the problem of calculating short-circuit currents flowing in the metal sheath of the FOCL integrated into the grounding system of the contact network

supports. It is used a technique for determining the currents in the metal part of the FOCL for various options for powering the inter substation zone. The conclusions are drawn, criteria are proposed for determining the possibility of using FOCL as an additional conductor from the standpoint of ensuring the estimated service life of a fiber optic cable.

Keywords: short-circuit currents, fiber-optic cable, group grounding of supports, thermal degradation, thermal pulse.

For citation: Osipova, A. I. Ensuring the thermal stability of the fiber-optic cable included in the two-level grounding system of the supports / A. I. Osipova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 274–281. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_274.

Сведения об авторах

Осипова Анна Ивановна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматизированные системы
электрообеспечения»,
старший преподаватель,
e-mail: nyshka79@mail.ru

Information about the authors

Osipova Anna Ivanovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Automated Systems of Power Supply»,
Senior Lecturer,
e-mail: nyshka79@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 – 5–10 страниц.

Одновременно представляют электронную версию статьи, выполненной в текстовом редакторе Word for Windows, шрифт Times New Roman, 11 pt, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание по ширине, абзацный отступ – 1,25 см, все поля – 2 см.

2 На первой странице должны быть указаны:

- **УДК** – в левом верхнем углу;
- интервал;
- **инициалы и фамилии авторов** – по центру, курсивом;
- интервал;
- **название статьи** – заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру, без переносов;
- интервал;
- **аннотация** (80–150 слов);
- **ключевые слова** (5–10 слов);
- интервал;
- **текст статьи** – печатается с переносами.
- интервал;
- **список литературы** на русском и английском языках (не менее 10 источников).

3 **Статья** должна содержать вводную часть, цель научной разработки, основную часть и выводы. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки журнала на компьютере.

4 **Буквы** латинского алфавита набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5 **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6 **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисуночная подпись обязательны.

7 **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8 **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9 **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

Условия и порядок публикации статей в журнале

- 1** Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.
- 2** Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.
- 3** Автор может прислать статью в адрес редакции:
 - по почте;
 - по электронной почте;
 - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4** Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

5 Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

6 На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.

7 Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.

Краткая информация о журнале

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный сериальный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В.И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» (www.pressa-rg.ru под индексом 53720).

Подписаться на журнал можно в любом отделении связи, 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:

344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2.

Ростовский государственный университет путей сообщения.

Редакция журнала «Вестник РГУПС».

Телефон: +7 (863) 272-62-74. Факс: +7 (863) 255-37-85.

E-mail: pmv_nis@rgups.ru ; nis@rgups.ru (дополнительный).

Архив журнала и требования по оформлению статей размещены на сайте <http://vestnik.rgups.ru>.

Научное издание

**ВЕСТНИК
Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

**№ 1 (89)
2023**

Уважаемые читатели!
Вы можете подписаться на наш журнал на сайте www.pressa-rgf.ru.
Индекс журнала по каталогу 53720

Полнотекстовая версия статей находится в открытом доступе на сайте
Российской научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru
Журнал обрабатывается в системах индексов научного цитирования
РИНЦ и Science Index

Требования к оформлению статей размещены на сайте
<http://vestnik.rgups.ru>

Редакторы: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова, К.И. Паханова,
А.П. Кононенко (английский текст)

Корректоры: А.В. Артамонов, Т.В. Бродская,
Т.И. Исаева, Т.М. Чеснокова, К.И. Паханова,
А.П. Кононенко (английский текст)

Оригинал-макет журнала подготовлен А.О. Полуниной

Подписано в печать 30.03.2023.
Дата выхода в свет 31.03.2023.
Печать офсетная.
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 33,0.
Тираж 510 экз.
Цена свободная.

Бумага офсетная.
Изд. № 18.
Заказ 45.

Учредитель:

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

**Адрес университета, издателя, редакции:
344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 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.**