

ISSN 0201–727X

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

ВЕСТНИК

**Ростовского государственного университета
путей сообщения**

Научно-технический журнал

№ 2 (90)

Ростов-на-Дону
2023

ВЕСТНИК

Ростовского государственного университета путей сообщения

2023
№ 2 (90)

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. Свиццов, 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

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЯ

Балалаев А.Н., Жебанов А.В., Коркина С.В. Распределение теплоты между колесом, рельсом и тормозной колодкой при различных режимах торможения грузового состава.....	8
Охотников А.Л., Костюков А.В. Калибровка датчиков системы технического зрения тягового подвижного состава.....	20
Соломин В.А., Соломин А.В., Трубицина Н.А., Замшина Л.Л., Чехова А.А. Исследование процесса нагрева индуктора тягового линейного асинхронного двигателя для экспериментального стенда.....	30
Чаплыгин В.С., Аксенов В.А. Анализ используемых инструментов оценки профессиональных рисков для работников хозяйства электрификации и электроснабжения.....	38
Шантаренко С.Г., Савинкин С.В. Влияние расположения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания локомотива на параметры упругой поперечной связи кузова с тележкой.....	45

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Окост М.В. Корреляционные соотношения физико-механических характеристик грунтов, использованных при сооружении железнодорожного земляного полотна для развития транспортного комплекса в Азово-Черноморском регионе России.....	51
--	----

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Середов Е.А. Имитационное моделирование выполнения маневров на вытяжных путях.....	73
---	----

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Волчек Т.В. Снижение потребления электроэнергии на тягу поездов за счет плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей.....	79
Гаранин М.А., Блинкова С.А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии.....	85
Доманский В.В. Параметры электроснабжения тяги поездов для наполнения баз данных имитационных моделей.....	91
Илюхин Н.Н., Авдеева К.В., Елизарова Ю.М., Чертолысова Н.А. Определение переходных параметров в месте повреждения подземных кабелей электроснабжения железнодорожного транспорта.....	100
Костюков А.В., Верескун В.Д. Методология исследований источников вибрации и шума системы охлаждения силовых трансформаторов.....	110
Курилкин Д.Н., Грачев В.В., Танаев В.Ф. Расчет нагрузочных характеристик тяговых электродвигателей постоянного тока по данным микропроцессорных систем управления и диагностики.....	124
Риполь-Сарагоси Т.Л., Риполь-Сарагоси Л.Ф. Исследование энергоэффективности процессов осушки сжатого воздуха с использованием цеолитов различных марок.....	132

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Васин С.А., Евсеев А.В., Першин В.Ф., Юраскова И.А. Управление качеством некоторых композитных и гетерогенных материалов модификацией наноконпонентами... ..	139
Васин С.А., Пантюхина Е.В. Разработка конструктивных ограничений на параметры усовершенствованных дисковых бункерных загрузочных устройств для деталей с неявной асимметрией.....	146

Гусев С.С., Макаров В.В. Исследование и создание универсальных циклов течения торцевых и продольных канавок.....	155
Кравченко М.А. Методика расчета выбора рациональных вариантов систем звукопоглощения для систем шумозащиты операторов компрессорных станций.....	167
Савенкова М.А., Воляник С.А., Сычев А.П., Авилов В.В., Иваночкин П.Г. Эффективная полимерная фосфоромолибдатная присадка для смазочных материалов.....	172
Шаповалов В.В., Коваленко О.И., Колодяжный И.А., Кручинин К.А., Озябкин А.Л. Разработка алгоритма управления автоматической силовой трансмиссией.....	180

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

Абдуллаев И.С. Кластеризация сети железных дорог как инструмент оптимизации параметров проектирования объектов инфраструктуры.....	189
Зубков В.Н., Мусиенко Н.Н., Ворон О.А., Долгий И.Д. Анализ и меры по сокращению оборота вагона на Северо-Кавказской железной дороге.....	197
Корнев А.С., Хайруллин Р.З. К разработке программ среднесрочного и долгосрочного планирования развития парка средств измерений ОАО «РЖД».....	206
Ли Т.Е., Король Р.Г. Оценка эффективности этапного развития транспортного узла Пусан.....	217

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Верескун В.Д., Притыкин Д.Е., Дагдьян Б.Д., Решетов А.В., Мищенко А.В. Разработка подсистемы имитации движения поездов в режиме исполнения нормативного графика движения в рамках учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога».....	231
Долгий А.И., Ковалев С.М., Гуда А.Н. Интеллектуальный мониторинг перевозочных процессов на основе динамического метода главных компонент.....	240

CONTENTS

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY AND ENVIRONMENT

Balalaev A.N., Zhebanov A.V., Korkina S.V. The distribution of heat between the wheel, rail and brake pad under different modes of braking of a freight train.....	8
Okhotnikov A.L., Kostyukov A.V. Calibration of the vision system sensors of the traction rolling stock.....	20
Solomin V.A., Solomin A.V., Trubitsina N.A., Zamshina L.L., Chekhova A.A. Investigation of the inductor heating process of the traction linear asynchronous motor for the experimental stand.....	30
Chaplygin V.S., Aksenov V.A. Analysis of the tools used to assess occupational risks for employees of the electrification and Power Supply Economy	38
Shantarenko, S.G., Savinkin S.V. Influence of the location of the end coils of the springs body spring suspension of the locomotive on the parameters of elastic transversal coupling body with bogie	45

RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

Okost M.V. Correlation relations of physical and mechanical characteristics of soils used in the construction of a railway subgrade for the development of the transport complex in the Azov-Black Sea region of Russia.....	51
---	----

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

Seredov E.A. Simulation modeling of maneuvers on exhaust Tracks.....	73
---	----

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

Volchek T.V. The reduced electricity consumption for traction driving due to smooth control of the current excitation in traction electric motors	79
Garanin M.A., Blinkova S.A. The traction power supply system modeling using the energy storage.....	85
Domansky V.V. Train traction power supply parameters for filling simulation model databases.....	91
Ilyukhin N.N., Avdeeva K.V., Elizarova Yu.M., Chertolysova N.A. Determination of transient parameters at the point of damage underground cables for power supply of the railway transport.....	100
Kostyukov A.V., Vereskun V.D. Methodology of research of vibration and noise sources of the cooling system for power transformers	110
Kurilkin D.N., Grachev V.V., Tanaev V.F. Calculation of load characteristics of DC Traction motors according to microprocessor control and Diagnostic systems.....	124
Ripol-Saragosi T.L., Ripol-Saragosi L.F. Investigation of the energy efficiency of Compressed Air Drying processes using various brand zeolites	132

MECHANICAL ENGINEERING

Vasin S.A., Evseev A.V., Pershin V.F., Yuraskova I.A. Quality control of some composite and heterogeneous materials by modification with nanocomponents	139
Vasin S.A., Pantyukhina E.V. Development of design limits on parameters of the improved disk hopper loading devices for parts with implicit asymmetry	146
Gusev S.S., Makarov V.V. Research and creation of universal turning cycles of end and longitudinal flutes.....	155

Kravchenko M.A. Calculation methodology of the choice of rational option systems of sound absorption for operator sound protection systems of the compressor stations	167
Savenkova M.A., Volyanik S.A., Sychev A.P., Avilov V.V., Ivanochkin P.G. The efficient polymer phosphor-molybdenum additive for lubricants.....	172
Shapovalov V.V., Kovalenko O.I., Kolodyazhny I.A., Kruchinin K.A., Ozyabkin A.L. Development of an automatic power transmission control algorithm	180

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

Abdullaev I.S. Railway network clustering as a tool for optimizing design parameters of the infrastructure objects	189
Zubkov V.N., Musienko N.N., Voron O.A., Dolgiy I.D. Analysis and measures to reduce the turnover of wagons on the North Caucasus Railway.....	197
Kornev A.S., Khayrullin P.Z. To formation of medium-term and long-term planning programs development of the fleet of JSC “Russian Railways” measuring instruments.....	206
Lee T.Y., Korol R.G. Assessment of the effectiveness of the phased development of the Busan transport hub.....	217

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION AND TELECOMMUNICATIONS

Vereskun V.D., Pritikin D.E., Dagldiyan B.D., Reshetov A.V., Mishchenko A.V. Development of a subsystem for simulation of train traffic in the mode of performance of the normative traffic schedule at the educational and laboratory complex “Virtual Railway”.....	231
Dolgiy A.I., Kovalev S.M., Guda A.N. Intelligent monitoring of the transportation processes based on the dynamic method of principal components	240

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 629.4.077–592 : 629.463

DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_8

*А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов, С. В. Коркина***РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ МЕЖДУ КОЛЕСОМ, РЕЛЬСОМ И ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКОЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТОРМОЖЕНИЯ ГРУЗОВОГО СОСТАВА**

Аннотация. При торможении грузового железнодорожного поезда с помощью тормозных колодок кинетическая энергия преобразуется за счет трения в тепловую, часть из которой переходит в тормозные колодки, другая часть переходит в колеса, а из колес теплота переходит в рельсы и окружающую среду. Цель работы состоит в определении доли теплоты в колесах грузовых вагонов при различных режимах торможения и различных скоростях движения поезда, а также различной загрузке вагонов. В работе выполнялось моделирование процесса торможения колесной пары с помощью метода конечных элементов в среде SolidWorks. Выполненные расчеты позволили установить доли тепловых потоков, направленных в тормозную колодку и в рельс при различных режимах торможения грузового состава. Установлено влияние на эти доли температуры окружающей среды и загрузки вагона. Полученные результаты позволяют более точно прогнозировать температуру поверхности катания и боковой поверхности обода колеса, что позволит диагностировать тормозную систему грузового состава в движении.

Ключевые слова: грузовой состав, тормозная система, колесо, рельс, тормозная колодка, тепловой поток, моделирование торможения вагона.

Для цитирования: Балалаев, А. Н. Распределение теплоты между колесом, рельсом и тормозной колодкой при различных режимах торможения грузового состава / А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов, С. В. Коркина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 8–19. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_8.

Введение

Эффективность тормозных средств является одним из важнейших условий, определяющих возможность повышения веса и скорости движения поездов, пропускной и провозной способности железных дорог. От свойств и состояния тормозного оборудования вагонов в значительной степени зависит и безопасность движения, которая должна оставаться на высоком уровне при усиливающейся интенсивности эксплуатации [1–3].

В грузовом составе тормозные силы создаются с помощью прижатия тормозных колодок к поверхности катания колес. При этом замедление движения создается вследствие трения тормозных колодок о поверхность катания колес вагонов. В этом случае кинетическая энергия поезда преобразуется в теплоту нагреваемых трущихся деталей, которая перераспределяется между колесом, тормозной колодкой и рельсом и рассеивается в окружающую среду.

В настоящее время разрабатываются методы дистанционного диагностирования тормозной системы вагонов, основанные на измерении температуры колеса после ступенчатого торможения и сравнении результатов измерений с результатами имитационного моделирования теплового состояния колеса после торможения [4]. Точность имитационного моделирования теплового состояния колеса зависит от правильности определения доли теплоты, перешедшей из колеса в рельс. Поэтому актуальной является задача определения этой доли тепла в зависимости от режима торможения, скоростях движения поезда, величины загрузки вагона и температуры окружающей среды.

Основная часть

Цель данной работы состоит в определении доли теплоты, оставшейся в колесах грузовых вагонов, от всей теплоты, выделившейся от трения между колесом и тормозной колодкой, при различных режимах торможения, различных скоростях движения поезда, различной загрузке вагонов и разной температуре окружающей среды.

Для достижения данной цели будут использоваться методика тормозных расчетов [5], общепринятая в настоящее время гипотеза о том, что вся кинетическая энергия заторможенного поезда переходит в тепловую энергию в зоне «колесо – тормозная колодка» [6, 7], а также выдвинутая авторами гипотеза о зависимости пятна контакта «колесо – рельс» от нагрузки на ось.

При торможении процесс трения тормозной колодки и колеса происходит в точках фактического контакта. Суммарная площадь этих контактов незначительна по сравнению с площадью, перекрываемой тормозной колодкой. Так как выделение тепла происходит лишь в точках фактического контакта, то плотности тепловых потоков и температурные всплески в них могут достигать больших величин, вызывающих свечение поверхности трения и переход металла в этих точках в пластическое состояние. При этом происходит деформация металла либо его быстрый износ и место температурной всплески перемещается в соответствии с изменением контактных удельных давлений.

Распространение теплового потока на всю площадь трения происходит вблизи от поверхности контакта, и его плотность резко снижается по сравнению с точками фактического контакта, приобретая значение, соответствующее геометрическим значениям контактирующих тел. Соответственно изменяется и температура в поверхностных слоях.

Следует также иметь в виду, что температура любой точки поверхности катания колеса за каждый его оборот имеет некоторые колебания, являющиеся следствием того, что при выходе рассматриваемой точки из зоны контакта в ней происходит некоторое снижение температуры за счет отвода тепла внутрь колеса и в окружающую среду, при прохождении точки в зоне контакта колеса и тормозной колодки ее температура повышается и превышает расчетное среднее значение. Однако при решении тепловых задач этим явлением можно пренебречь ввиду инерционности процессов и считать подвод тепла по всей поверхности трения колеса непрерывным.

Для моделирования процесса распространения теплового потока от взаимодействия колеса с колодкой при торможении рассматривается движение грузового поезда на каком-либо участке пути с заданными параметрами количества вагонов, скорости движения и температурными условиями окружающей среды. Примем, что поезд состоит из 58 грузовых вагонов. Начальная скорость движения перед применением тормозов поезда $V_0 = 60$ км/ч, после она уменьшилась до $V_k = 40$ км/ч, при этом измерение температуры дисков колес у 56 вагонов показало, что после ступени торможения менее 10° , из которых $N_1 = 47$ порожних вагонов, воздухораспределители которых настроены на порожний режим, $N_2 = 7$ груженых вагонов, воздухораспределители которых настроены на средний режим, и $N_3 = 2$ груженых вагонов, воздухораспределители которых настроены на груженый режим. Температуру окружающей среды примем в одной поездке равной $+25,9^\circ\text{C}$ (реальная поездка 13.07.2022 на участке Дема – Косяковка – Аллагуват) и в другой поездке -12°C (гипотетическая поездка зимой).

Для расчета нестационарных тепловых процессов в колесе вагона необходимо определить время подготовки тормозов $\Delta\tau_p$; время от начала торможения в первом вагоне до начала торможения в последнем вагоне $\Delta\tau_t$, время от начала торможения в последнем вагоне до достижения конечной скорости $\Delta\tau$ и время от достижения конечной скорости до момента замера температуры дисков колес $\Delta\tau_k$.

Согласно [5], время подготовки тормозов равно $\Delta\tau_p = 10$ с.

Время $\Delta\tau_t$ может быть найдено из выражения:

$$\Delta\tau_t = \frac{(N_1 + N_2 + N_3) \cdot L_{cp}}{V_{top}}, \quad (1)$$

где N_1 , N_2 и N_3 – число порожних и груженых вагонов; L_{cp} – средняя длина вагонов поезда, м; V_{top} – скорость прохождения тормозной волны при первой ступени торможения.

Для рассматриваемой поездки средняя длина всех вагонов $L_{cp} = 14$ м. Скорость прохождения тормозной волны при снижении давления в тормозной магистрали на $\Delta P = 0,5 \cdot 10^5$ Па (I ступень торможения) может быть приближенно подсчитана по известной формуле газовой динамики для течения идеального газа без трения:

$$V_{top} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT \left[1 - \left(\frac{P_{top} - \Delta P}{P_{top}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (2)$$

где $k = 1,4$ – коэффициент адиабаты; R – индивидуальная газовая постоянная для воздуха; T – температура окружающей среды; P_{top} – давление в тормозной магистрали перед торможением.

Скорость тормозной волны, подсчитанная по формуле (2) при $\Delta P = 0,5 \cdot 10^5$ Па, равна $V_{top} = 118$ м/с. Время от начала торможения в первом вагоне до начала торможения в последнем вагоне, подсчитанное по формуле (1) при $\Delta P = 0,5 \cdot 10^5$ Па, равно $\Delta\tau_t = 6,8$ с.

Согласно [5], тормозной путь грузового состава при первой ступени торможения ΔL может быть оценен по формуле:

$$\Delta L = \sum_{i=0}^{N_v} \frac{500 \cdot \left[(V_0 - 0,1 \cdot i)^2 - (V_0 - 0,1 \cdot (i+1))^2 \right]}{\zeta \cdot (1000 \cdot \vartheta_p \cdot \varphi_{кр} + \omega_0 + \omega_c)}, \quad (3)$$

где N_v – число интервалов, на которые разбивается диапазон скоростей, $N_v = (V_0 - V_k)/0,1$; $\zeta = 12,2$ – замедление поезда под действием удельной замедляющей силы (1 Н/т), км/час²; ϑ_p – расчетный тормозной коэффициент поезда, кН/т; $\varphi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения; ω_0 – основное удельное сопротивление поезда при холостом движении локомотива в расчетном интервале скоростей, Н/т; ω_c – дополнительное удельное сопротивление поезда от спрямленного уклона, Н/т.

Расчетный тормозной коэффициент поезда ϑ_p на уклонах до 20 ‰ может быть найден, согласно [8, с. 17], по формуле:

$$\vartheta_p = \frac{\sum_{i=1}^N (n_i \cdot K_{pi} \cdot m_i)}{\sum_{i=1}^N (n_i \cdot M_i)}, \quad (4)$$

где N – число однотипных групп вагонов; n_i – число вагонов i -й группы вагонов; K_{pi} – расчетная сила нажатия на колодку, кН; m_i – количество колодок на вагоне i -й группы.

Расчетная сила нажатия на композиционную колодку для грузовых вагонов зависит от включенного режима воздухораспределителя. Согласно [5, с. 18], на груженом режиме $K_p = 34$ кН; на среднем режиме $K_p = 28$ кН; на порожнем режиме $K_p = 13$ кН.

По формуле (4) определяется максимальный тормозной коэффициент поезда при торможении до остановки. Если применяется ступень торможения, то вместо максимального значения ϑ_p используется произведение максимального тормозного коэффициента грузового поезда на процент от полного тормозного коэффициента при заданном режиме воздухораспределителя (согласно [2, с. 22], на груженом и среднем режиме – это 30 %, на порожнем режиме – это 50 %). Если в составе поезда есть и груженые, и порожние вагоны, то используется осреднение по формуле:

$$\vartheta_p = \frac{(0,5 \cdot \vartheta_{p \max} \cdot N_{пор} + 0,3 \cdot \vartheta_{p \max} \cdot N_{ср} + 0,3 \cdot \vartheta_{p \max} \cdot N_{гр})}{N_{пор} + N_{ср} + N_{гр}}, \quad (5)$$

где $\vartheta_{p \max}$ – максимальный тормозной коэффициент поезда при торможении до остановки, рассчитанный по формуле (4); $N_{пор}$, $N_{ср}$, $N_{гр}$ – число воздухораспределителей вагонов, настроенных на порожний, средний и груженный режим соответственно.

Расчетный коэффициент трения $\varphi_{кр}$ может быть определен по рекомендованной в [5, с. 12] формуле для композиционных колодок:

$$\varphi_{кр} = 0,36 \cdot \frac{V_i + 150}{2 \cdot V_i + 150}, \quad (6)$$

где V_i – средняя скорость интервала формулы (3), $V_i = V_0 - 0,15 \cdot i$ км/ч.

Основное удельное сопротивление поезда ω_0 находится по рекомендованной в [5, с. 4] формуле для четырехосных вагонов (кроме цистерн):

$$\omega_0 = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785 \cdot V_i + 0,027 \cdot V_i^2}{q_0}, \quad (7)$$

где q_0 – средняя осевая нагрузка состава, т/ось.

В отсутствие уклона на участке пути дополнительное удельное сопротивление поезда от спрямленного уклона $\omega_c = 0$.

Расчеты по формулам (3)–(7) дали значение тормозного пути $\Delta L = 143,4$ м.

Время от начала торможения в последнем вагоне до достижения конечной скорости Δt может быть найдено, если в знаменатель формулы (3) добавить сомножителем среднюю скорость интервала:

$$\Delta\tau = \sum_{i=0}^{N_V} \frac{500 \cdot \left[(V_0 - 0,1 \cdot i)^2 - (V_0 - 0,1 \cdot (i+1))^2 \right]}{\zeta \cdot (1000 \cdot g_p \cdot \varphi_{кр} + \omega_0 + \omega_c) \cdot (V_0 - 0,15 \cdot i) \cdot \frac{1000}{3600}}. \quad (8)$$

Расчеты по формуле (8) дали значение времени торможения $\Delta\tau = 11,5$ с.

Время от достижения конечной скорости до момента замера температуры дисков колес $\Delta\tau_k$ можно найти, если определить расстояние ΔL_k , пройденное составом от момента окончания торможения до момента замера температуры дисков колес. Время $\Delta\tau_k$ равно частному от деления расстояния ΔL_k на конечную скорость после торможения V_k .

Расстояние ΔL_k можно определить как разность между расстоянием, проходимым поездом от пункта начала торможения (43 км перегона) до пункта контроля температуры колеса (44 км перегона), и расстояниями, пройденными за промежутки времени $\Delta\tau_p$ и $\Delta\tau$.

Длина пути подготовки тормозов находится по формуле, рекомендуемой в [5, с. 29]:

$$\Delta L_p = 0,278 \cdot V_0 \cdot \Delta\tau_p. \quad (9)$$

Подготовительный путь равен $\Delta L_p = 166,8$ м.

Для нахождения скоростей движения состава на участке торможения ΔL необходимо задаться видом аналитической зависимости скорости движения состава от времени.

Снижение скорости поезда с течением времени можно приближенно задать следующим уравнением:

$$V = 60,126 - 1,916 \cdot \tau + 0,016 \cdot \tau^2, \quad (10)$$

где τ – время, с.

Коэффициенты уравнения (10) подбирались по методу наименьших квадратов при аппроксимировании зависимости (8). На рис. 1 показан график изменения скорости состава в соответствии с уравнением (10).

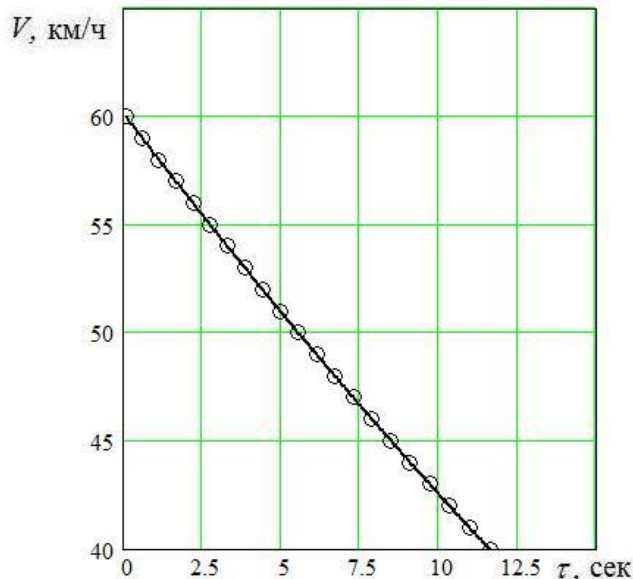


Рис. 1. Зависимость скорости поезда от времени при торможении от 60 до 40 км/ч

Для середины интервала времени прохождения тормозной волны до конца поезда $\Delta\tau$, средняя скорость этого интервала равна 53,7 км/ч, для конца этого интервала скорость движения поезда, при которой включаются тормоза в хвостовом вагоне, равна 47,8 км/ч.

Расчеты по формуле (3) с учетом (10) дали значение тормозного пути $\Delta L = 163,4$ м.

Так как расстояние между пк. 43 км и пк. 44 км равно $\Delta L_0 = 1000$ м, то расстояние от момента окончания торможения до момента замера температуры колеса $\Delta L_k = \Delta L_0 - \Delta L_p - \Delta L = 1000 - 166,8 - 163,4 = 689,8$ м. Время прохождения расстояния ΔL_k равно $\Delta\tau_k = \Delta L_k / V_k \cdot 1000/3600 = 689,8 / 40 \cdot 1000/3600 = 62$ с.

Так же, как в [6], далее делается допущение, что кинетическая энергия вагона переходит в тепловую через тормозные колодки по поверхностям катания колес. Часть этого тепла переходит в колодку и башмак, часть переходит в колесо и часть – от колеса в рельс. Таким образом, тепловой поток, переходящий с поверхности тормозной колодки в колесо, может быть найден по формуле:

$$q = \frac{M \cdot (V_{0i}^2 - V_k^2) \cdot \left(\frac{1000}{3600}\right)^2 \cdot (1 - \alpha_p) \cdot (1 - \alpha_k)}{2 \cdot \Delta\tau \cdot m}, \quad (11)$$

где M – масса вагона, кг; V_{0i} – скорость вагона при прохождении через его тормозную магистраль тормозной волны, км/час; V_k – скорость поезда в конце процесса торможения, км/час; α_p – коэффициент распределения тепловых потоков в системе «колесо – колодка» (доля теплового потока, направленного в колодку); α_k – коэффициент распределения тепловых потоков в системе «колесо – рельс» (доля теплового потока, направленного в рельс); m – количество тормозных колодок вагона.

Доля теплового потока, направленного в колодку, α_p может быть найдена путем моделирования нестационарного теплового процесса в модели колесной пары с тормозной колодкой, тормозным башмаком. В модель также включен тепловыделяющий элемент в виде кольца малой толщины, моделирующий выделение тепла от трения.

Нагретые колеса и тормозные колодки охлаждаются воздухом окружающей среды, для коэффициента теплоотдачи этого воздуха, обычно, используются эмпирические выражения. Авторы работы [8] рекомендовали следующую эмпирическую формулу для коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции, используемую в зарубежной практике:

$$\alpha_{кн} = 9 + 3,5V^{0,66}, \quad (12)$$

где V – скорость поезда, м/с. При скорости поезда равной конечной скорости после ступени торможения V_k коэффициент теплоотдачи равен 26,15 Вт/(м² К). При средней скорости на тормозном пути коэффициент теплоотдачи равен 28,87 Вт/(м² К).

Начальное распределение температуры в данной модели задавалось в стационарном тепловом исследовании, выполненном в SolidWorks Simulation, где задавались условия конвективного теплообмена с окружающей средой, причем, коэффициент теплоотдачи принимался равным 28,87 Вт/(м² К), а температура окружающей среды равнялась 298,9 К (25,9 °С). В расчете по методу конечных элементов (МКЭ) во всех узлах сетки моделей колеса и тормозной колодки температура равнялась температуре окружающей среды.

После выполнения решения для стационарных условий теплообмена запускалось исследование для нестационарного процесса, в котором кроме конвективного теплообмена с окружающей средой устанавливалась мощность тепловыделения на тепловыделяющем элементе, который представлял собой кольцо толщиной 0,1 мм и шириной, равной ширине конического участка поверхности катания колеса с уклоном 1:10. Тепловыделяющий элемент моделировал процесс тепловыделения при трении колеса и тормозной колодки, он имел такую же конусность и прилегал к коническому участку поверхности катания колеса. Величина мощности тепловыделения рассчитывалась по формуле (11) для груженого вагона в голове состава при задании коэффициентов $\alpha_p = 0$, $\alpha_k = 0$. Она составила 76050 Вт. В нестационарном тепловом исследовании, выполненном в SolidWorks Simulation, задавался временной интервал $\Delta\tau = 11,5$ сек., рассчитанный по формуле (8), и шаг по времени 0,5 сек. В расчете по МКЭ во всех узлах сетки моделей колеса и тормозной колодки температура рассчитывалась из уравнения нестационарной теплопроводности с граничными условиями третьего рода (конвективный теплообмен на границе тел). Все свободные внешние поверхности моделей колеса и тормозной колодки участвовали в конвективном теплообмене с окружающей средой, причем, коэффициент теплоотдачи принимался равным 28,87 Вт/(м² К), а температура окружающей среды равнялась 298,9 К (25,9 °С).

После проведения решения на нестационарном режиме в тепловом исследовании была получена эпюра распределения плотности теплового потока в модели. Эту эпюру можно зондировать для заданной поверхности, получая распределение плотности теплового потока на этой поверхности.

На рис. 2 представлены результаты зондирования эпюры плотности теплового потока, направленного в колесо, на поверхности катания колеса.

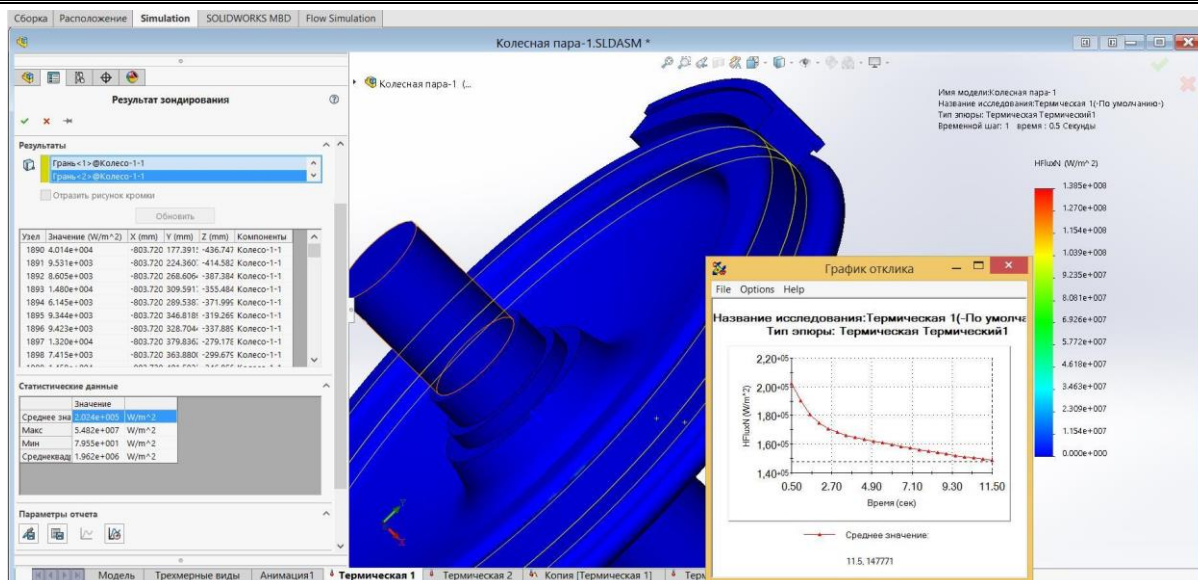


Рис. 2. Результаты расчета величины плотности теплового потока на поверхности катания колеса

Как видно на рис. 2, величина плотности теплового потока на поверхности катания колеса в конце периода торможения составила $q_1 = 147771 \text{ Вт/м}^2$. При умножении этой величины на площадь поверхности катания колеса, которая определялась измерением модели колеса в SolidWorks и равнялась $0,1872 \text{ м}^2$, была получена величина мощности теплового потока, входящего в колесо $Q_{\text{кат}} = 27662,7 \text{ Вт}$.

На рис. 3 представлены результаты зондирования эпюры плотности теплового потока, направленного в тормозную колодку, выполненную из материала, имеющего параметры: плотность – 2200 кг/м^3 , коэффициент теплопроводности – $0,8 \text{ Вт/(м К)}$, удельная теплоемкость – 900 Дж/(кг К) .

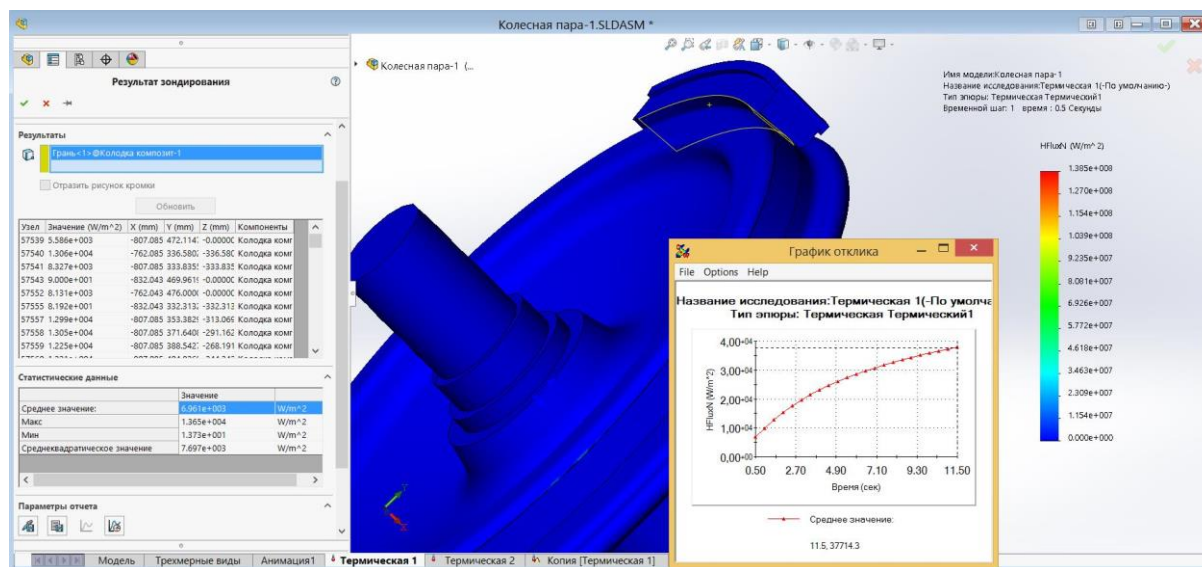


Рис. 3. Результаты расчета величины плотности теплового потока на поверхности тормозной колодки

Как видно на рис. 3, величина плотности теплового потока на поверхности тормозной колодки в конце периода торможения составила $q_2 = 37714,3 \text{ Вт/м}^2$. При умножении этой величины на площадь рабочей поверхности тормозной колодки, которая определялась измерением модели тормозной колодки в SolidWorks и равнялась $0,0261 \text{ м}^2$, была получена величина мощности теплового потока, входящего в колодку $Q_{\text{колод}} = 984,3 \text{ Вт}$.

Делается допущение, что часть теплового потока, направленного в колодку, $\alpha_p = Q_{\text{колод}} / Q_{\text{кат}} = 984,3 / 27662,7 = 0,0356$.

Для нахождения доли теплового потока, направленного в рельс, α_k моделировался нестационарный тепловой процесс в модели колесной пары и имитатора рельса. Данная модель «колесо – рельс» показана на рис. 4.

В модель «колесо – рельс» включено тепловыделяющее кольцо 2 толщиной 0,1 мм, моделирующее процесс выделения теплоты при взаимодействии колеса и тормозной колодки [9, 10]. Для моделирования передачи теплоты от колеса к рельсу по пятну контакта за счет теплопроводности в модель «колесо – рельс» включен имитатор пятна контакта, показанный на рис. 4 как кольцо – приемник тепла 3. Ширина кольца составляла 12 мм, что соответствует ширине плоского пятна контакта «колесо – рельс» площадью 2,56 см² (см. [11, с. 83]).

Так как при повороте колеса положение плоского пятна контакта перемещается по окружности колеса, то имитатор пятна контакта выполнен в виде кольца 3, а имитатор рельса 4 примыкает к имитатору пятна контакта 3 и также выполнен в виде кольца.

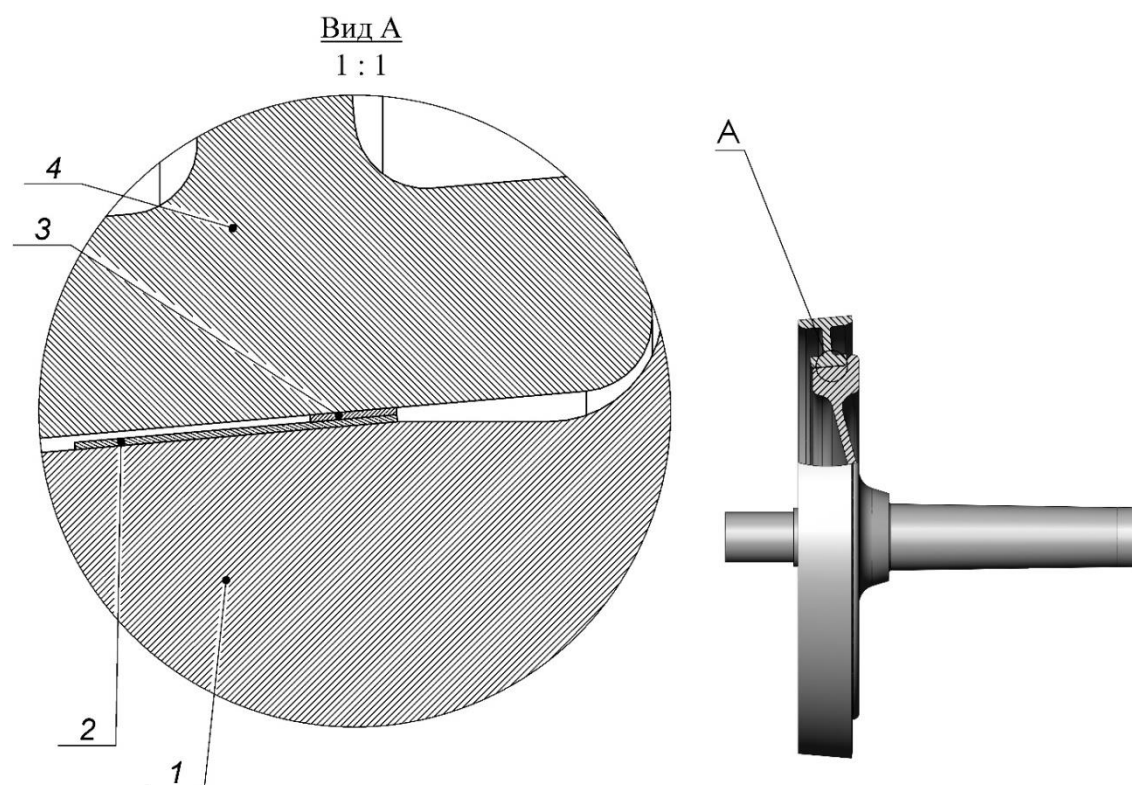


Рис. 4. Модель «колесо – рельс»:

1 – колесо, 2 – тепловыделяющее кольцо, 3 – кольцо – приемник тепла, 4 – имитатор рельса

Начальное распределение температуры в модели колеса, тепловыделяющего кольца и кольцевого имитатора рельса задавалось в стационарном тепловом исследовании. Как и ранее, коэффициент теплоотдачи принимался равным 28,87 Вт/(м² К), а температура окружающей среды равнялась 298,9 К (25,9 °С). В расчете по МКЭ во всех узлах сетки моделей колеса и рельса температура в начальный момент времени равнялась температуре окружающей среды.

Для нестационарного термического исследования этой модели задавались параметры переходного процесса, аналогичные сделанным ранее, а именно, задавался временной интервал $\Delta t = 11,5$ с, рассчитанный по формуле (8), и шаг по времени 0,5 с. Величина мощности теплового потока на тепловыделяющем кольце задавалась равной 73340 Вт, что соответствует величине мощности тепловыделения, рассчитанной по формуле (11) для груженого вагона в голове состава при задании коэффициентов $\alpha_p = 0,0356$ и $\alpha_k = 0$. Кроме того, для свободных поверхностей модели колеса задавались условия конвективного теплообмена с окружающей средой и условия равенства температуры рельса температуре окружающей среды. В расчете по МКЭ во всех узлах сетки моделей колеса и имитатора рельса температура рассчитывалась из уравнения нестационарной теплопроводности с граничными условиями третьего рода (конвективный теплообмен на границе тел). Все свободные внешние поверхности модели колеса участвовали

в конвективном теплообмене с окружающей средой, причем, коэффициент теплоотдачи, как и ранее, принимался равным $28,87 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, а температура окружающей среды равнялась $298,9 \text{ К}$ ($25,9 \text{ }^\circ\text{C}$).

На рис. 5 представлены результаты зондирования полученной в нестационарном исследовании эпюры плотности теплового потока, направленного в колесо, на поверхности катания колеса.

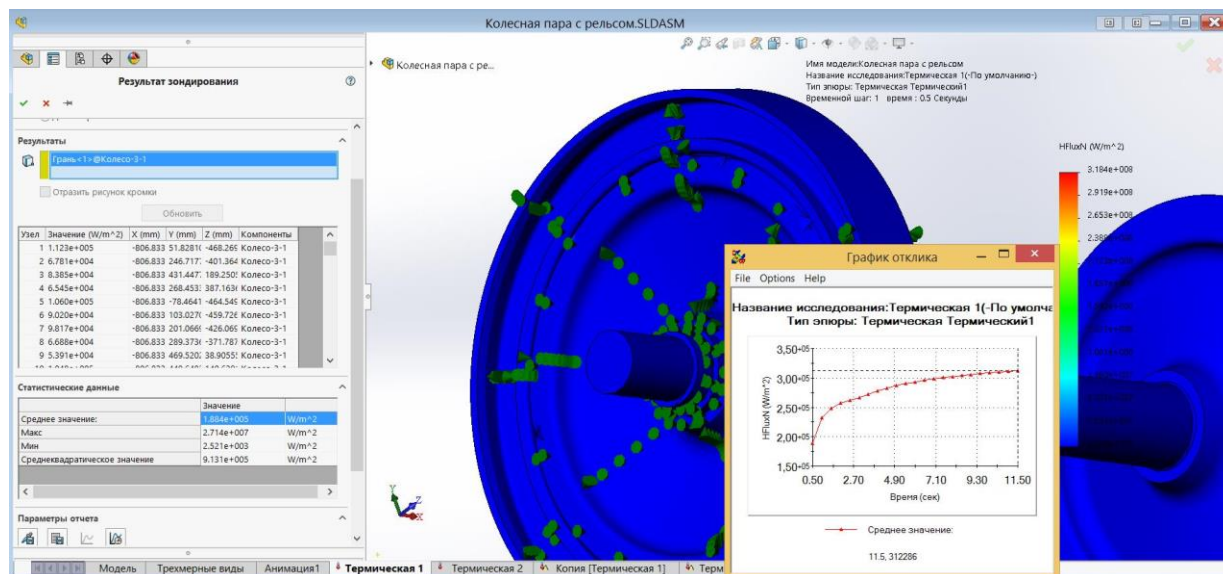


Рис. 5. Результаты расчета плотности теплового потока на поверхности катания колеса в конце процесса торможения в модели «колесо – рельс»

Как видно на рис. 5, величина плотности теплового потока на поверхности катания колеса в конце периода торможения составила $q_3 = 312286 \text{ Вт}/\text{м}^2$. При умножении этой величины на площадь поверхности катания колеса $0,1872 \text{ м}^2$ была получена величина мощности теплового потока, входящего в колесо $Q_{\text{колесо}} = 58459,9 \text{ Вт}$.

На рис. 6 представлены результаты зондирования эпюры плотности теплового потока, направленного в рельс, на рабочей поверхности рельса.

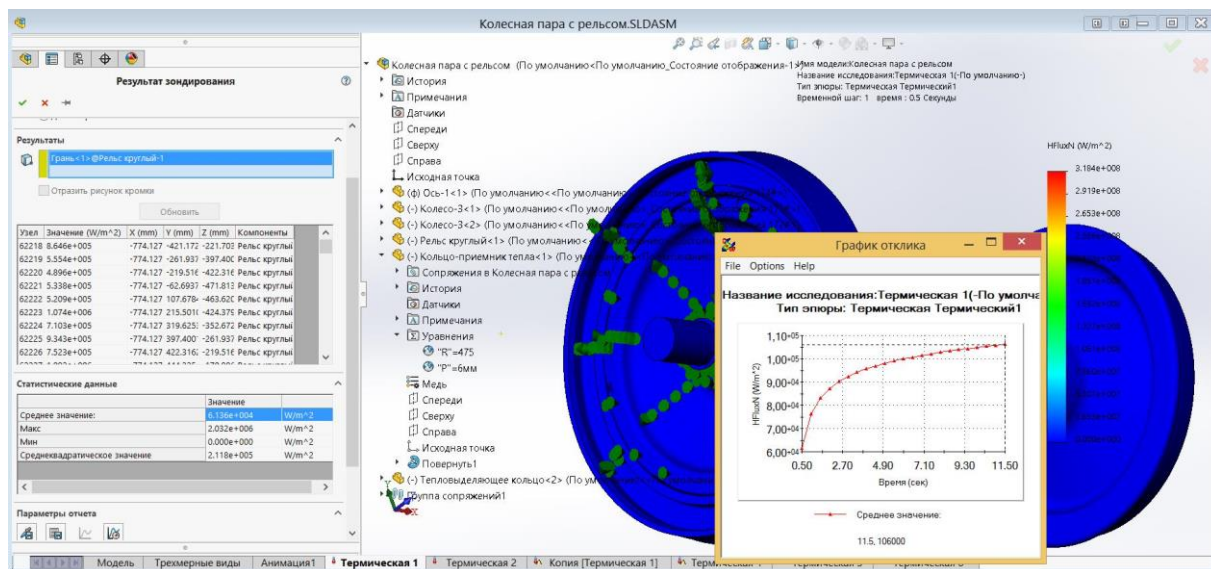


Рис. 6. Результаты расчета плотности теплового потока на поверхности рельса в конце процесса торможения в модели «колесо – рельс»

Как видно на рис. 6, величина плотности теплового потока на поверхности рельса в конце периода торможения составила $q_4 = 106000 \text{ Вт}/\text{м}^2$. При умножении этой величины на площадь рабочей поверхности рельса, которая определялась измерением модели рельса в SolidWorks и равнялась $0,2024 \text{ м}^2$, была получена величина мощности теплового потока, выходящего из колеса и входящего в рельс $Q_{\text{рельс}} = 21454,4 \text{ Вт}$.

Делается допущение, что часть теплового потока, направленного в рельс, $\alpha_k = Q_{\text{рельс}} / Q_{\text{колесо}} = 21454,4 / 58459,9 = 0,367$. Данное значение получено для максимальной площади пятна контакта, рассчитанной в [11] для осевой нагрузки $q_{0 \max} = 23,5$ т. Если осевая нагрузка q_0 меньше максимальной, то коэффициент α_k умножается на отношение $q_0 / q_{0 \max}$. Таким образом, авторы предлагают гипотезу о пропорциональности площади пятна контакта величине осевой нагрузки вагона.

Для порожнего вагона в начале состава со средней величиной тары 22000 кг величина мощности теплового потока, рассчитанная по формуле (11), составляет 17790 Вт. Согласно предложенной гипотезе ширина тепловыделяющего элемента в модели «колесо – рельс» была уменьшена в соответствии с осевой нагрузкой порожнего вагона $q_0 = 5,5$ т, то есть прежняя ширина 12 мм была умножена на $q_0 / q_{0 \max}$ и составила 2,8 мм. Аналогичные исследования в SolidWorks Simulation для величины мощности теплового потока 17790 Вт дали следующие значения плотности тепловых потоков: $q_1 = 33086$ Вт/м², $q_2 = 8448$ Вт/м², $q_3 = 205429$ Вт/м², $q_4 = 68400$ Вт/м². При этих значениях в модели «колесо – тормозная колодка» величина мощности теплового потока, входящего в колесо $Q_{\text{кат}} = 6193,7$ Вт, величина мощности теплового потока, входящего в колодку $Q_{\text{колод}} = 220,5$ Вт, часть теплового потока, направленного в колодку, $\alpha_p = Q_{\text{колод}} / Q_{\text{кат}} = 220,5/6193,7 = 0,0356$, а в модели «колесо – рельс» величина мощности теплового потока, входящего в колесо $Q_{\text{колесо}} = 38456,3$ Вт, величина мощности теплового потока, выходящего из колеса и входящего в рельс $Q_{\text{рельс}} = 13844,2$ Вт, часть теплового потока, направленного в рельс, $\alpha_k = Q_{\text{рельс}} / Q_{\text{колесо}} = 13844,2 / 38456,3 = 0,36$.

Еще один цикл аналогичных исследований нестационарного теплового процесса был выполнен для порожнего вагона в начале состава со средней величиной тары 22000 кг при температуре наружного воздуха 261 К (–12 °С). Расчеты дали следующие значения плотности тепловых потоков: $q_1 = 32971,4$ Вт/м², $q_2 = 8390,8$ Вт/м², $q_3 = 206571$ Вт/м², $q_4 = 68400$ Вт/м². При этих значениях в модели «колесо – тормозная колодка» величина мощности теплового потока, входящего в колесо $Q_{\text{кат}} = 6172,2$ Вт, величина мощности теплового потока, входящего в колодку $Q_{\text{колод}} = 219$ Вт, часть теплового потока, направленного в колодку, $\alpha_p = Q_{\text{колод}} / Q_{\text{кат}} = 219/6172,2 = 0,0355$, в модели «колесо – рельс» величина мощности теплового потока, входящего в колесо $Q_{\text{колесо}} = 38670,1$ Вт, величина мощности теплового потока, выходящего из колеса и входящего в рельс $Q_{\text{рельс}} = 13844,2$ Вт, часть теплового потока, направленного в рельс, $\alpha_k = Q_{\text{рельс}} / Q_{\text{колесо}} = 13844,2 / 38670,1 = 0,358$.

Таким образом, выполненные расчеты показали, что температура окружающей среды оказывает слабое влияние на величины долей тепловых потоков, входящих в тормозную колодку и рельс, доля теплового потока, направленного в колодку, составляет $\alpha_p = 0,0355$ для зимнего периода и $\alpha_p = 0,0356$ для летнего периода, доля теплового потока, выходящего из колеса и входящего в рельс, составляет для порожнего вагона $\alpha_k = 0,358$ для зимнего периода и $\alpha_k = 0,36$ для летнего периода, а для груженого вагона летом $\alpha_k = 0,367$. Несмотря на принятую авторами гипотезу об уменьшении ширины пятна контакта пропорционально уменьшению фактической осевой нагрузки, что было реализовано в модели «колесо – рельс», доля теплового потока, выходящего из колеса и входящего в рельс, составляет для порожнего вагона меньше аналогичной величины для груженого вагона менее, чем на 2 %.

Выводы

Для обоснования доли теплоты составлена методика расчета нестационарных тепловых процессов в колесе во время торможения, позволяющая определять удельные тепловые потоки в колесо, в тормозную колодку и в рельс при задании скорости движения поезда, величины снижения скорости при торможении, массы брутто вагона и температуры наружной среды. В исследованиях модели «колесо – тормозная колодка» были получены величины доли теплового потока, входящего в тормозную колодку $\alpha_p = 0,0355$ для зимнего периода и $\alpha_p = 0,0356$ для летнего периода. В исследованиях модели «колесо – рельс» для груженого вагона была получена величина доли теплового потока, выходящего из колеса и входящего в рельс, $\alpha_k = 0,367$ для летнего периода. Для порожнего вагона эта величина составила $\alpha_k = 0,36$ для зимнего периода и $\alpha_k = 0,356$ для летнего периода.

Значительная величина доли теплового потока, переходящего из колеса в рельс, указывает на необходимость ее учета при прогнозировании температуры поверхности катания и боковой поверхности обода колеса, что повысит точность диагностирования тормозной системы грузового состава на ходу поезда.

Список литературы

- 1 **Жебанов, А. В.** Современные тенденции в обеспечении бесперебойности перевозочного процесса железнодорожного транспорта / А. В. Жебанов, С. В. Коркина // Вызовы и решения для бизнеса : ВЭД в новых реалиях : Сборник материалов III Международного внешнеэкономического научно-практического форума, Москва, 14 декабря 2022 года. – Москва : Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, 2023. – С. 119–122. – ISBN 978-5-7307-1974-3.
- 2 **Коркина, С. В.** Цифровые технологии в обеспечении безопасности движения железнодорожного транспорта / С. В. Коркина, А. В. Жебанов, И. А. Краснова // Проблемы безопасности на транспорте : Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. В 2-х частях, Гомель, 24–25 ноября 2022 года / Под общей редакцией Ю. И. Кулаженко. Т. 1. – Гомель : Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2022. – С. 128–130. – ISBN 978-985-891-070-9.
- 3 **Жебанов, А. В.** Анализ применения современных средств диагностики подвижного состава на сортировочной станции с целью повышения экономических показателей и объема ремонта грузовых вагонов / А. В. Жебанов, С. В. Коркина // Наука и образование транспорту. – 2021. – № 1. – С. 27–29. – EDN AJKKLM.
- 4 **Салтыков, Д. Н.** О необходимости создания инфракрасных напольных систем для контроля работоспособности тормозов на железных дорогах России / Д. Н. Салтыков, П. И. Шалупина // Транспорт Урала. – 2018. – № 2(57). – С. 47–51. – DOI 10.20291/1815-9400-2018-2-47-51.
- 5 Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12.05.2016 г. № 867р.
- 6 **Ефимов, Р. А.** Оценка тепловых нагрузок цельнокатаного колеса вагона при торможении : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. А. Ефимов. – Москва : МИИТ, 2017. – 24 с.
- 7 **Яицков, И. А.** Влияние жесткости элементов тормозных колодок на динамические нагрузки при торможении / И. А. Яицков, П. А. Поляков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1(85). – С. 36–45. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_36.
- 8 **Афонин, Г. С.** Устройство и эксплуатация тормозного оборудования подвижного состава /

References

- 1 **Zhebanov, A. V.** Modern trends in ensuring the continuity of the transportation process of railway transport / A. V. Zhebanov, S. V. Korkina // Challenges and solutions for business : Foreign economic activity in new realities : Collection of materials of the III International Foreign Economic Scientific and Practical Forum, Moscow, December 14, 2022. – Moscow : Plekhanov Russian University of Economics, 2023. – P. 119–122. – ISBN 978-5-7307-1974-3.
- 2 **Korkina, S. V.** Digital technologies in ensuring the safety of railway transport / S. V. Korkina, A. V. Zhebanov, I. A. Krasnova // Problems of transport safety: Materials of the XII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 160th anniversary of the Belarusian Railway. In 2 parts, Gomel, November 24–25, 2022 / Under the general editorship of Yu. I. Kulazhenko. Vol. 1. – Gomel : Educational Institution "Belarusian State University of Transport", 2022. – P. 128–130. – ISBN 978-985-891-070-9.
- 3 **Zhebanov, A. V.** Analysis of the use of modern diagnostic tools for rolling stock at a marshalling yard in order to increase economic indicators and the volume of repair of freight cars / A. V. Zhebanov, S. V. Korkina // Science and education transport. – 2021. – No. 1. – P. 27–29. – EDN AJKKLM.
- 4 **Saltykov, D. N.** On the need to create infrared floor systems for monitoring the performance of brakes on the railways of Russia / D. N. Saltykov, P. I. Shalupina // Transport of the Urals. – 2018. – No. 2(57). – P. 47–51. – DOI 10.20291/1815-9400-2018-2-47-51.
- 5 Rules of traction calculations for train work. Approved by the Order of JSC "Russian Railways" No. 867r on 12.05.2016.
- 6 **Efimov, R. A.** Assessment of thermal loads of a solid-rolled wagon wheel during braking : sciences in the specialty 05.22.07 «Railway rolling stock, train traction and electrification» : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Engineering / R. A. Efimov. – Moscow : MIIT, 2017. – 24 p.
- 7 **Yaitskov, I. A.** The influence of stiffness of brake pad elements on dynamic loads during braking / I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1(85). – P. 36–45. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_36.
- 8 **Afonin, G. S.** Device and operation of braking equipment of rolling stock / G. S. Afonin,

Г. С. Афонин, В. Н. Барщенков, Н. В. Кондратьев. – 3-е изд., стереотип. – Москва : Академия, 2007. – 304 с.

9 **Левенталь, Л. Я.** Энергетика рефрижераторных и пассажирских вагонов : учебное пособие / Л. Я. Левенталь, А. В. Костин. – Москва : МИИТ, 1998. – 91 с.

10 Устойчивость колес против схода с рельсов и мероприятия по их предотвращению с использованием компьютерных технологий / Е. М. Плохов, С. В. Коркина, В. В. Корбан, А. В. Жебанов // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 6(54). – С. 50–52. – EDN VIUXNT.

11 Определение параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации полувагона / А. М. Орлова, А. А. Воробьев, А. В. Саидова, Д. Е. Керенцев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 2(43). – С. 74–84. – ISSN 1815-588X.

V. N. Barshchenkov, N. V. Kondratiev. – 3rd ed., stereotype. – Moscow : Academy, 2007. – 304 p.

9 **Leventhal, L. Ya.** Power engineering of refrigerated and passenger cars : A textbook / L. Ya. Leventhal, A. V. Kostin. – Moscow : MIIT, 1998. – 91 p.

10 Stability of wheels against derailment and measures to prevent them using computer technologies / E. M. Plokhov, S. V. Korkina, V. V. Korban, A. V. Zhebanov // Bulletin of Transport of the Volga region. – 2015. – No. 6(54). – P. 50–52. – EDN VIUXNT.

11 Determination of the parameters of the wheel-rail contact for various operating conditions of a gondola car / A. M. Orlova, A. A. Vorobyov, A. V. Saidova, D. E. Kerentsev // Izvestiya Peterburgskogo universiteta of Railways. – 2015. – No. 2(43). – P. 74–84. – ISSN 1815-588X.

A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov, S. V. Korkina

THE DISTRIBUTION OF HEAT BETWEEN THE WHEEL, RAIL AND BRAKE PAD UNDER DIFFERENT MODES OF BRAKING OF A FREIGHT TRAIN

Abstract. When braking a freight train using brake pads, kinetic energy is converted by friction into thermal energy, part of which goes into the brake pads, the other part goes into the wheels, and from the wheels the heat goes into the rails and the environment. The purpose of the work is to determine the proportion of heat in the wheels of freight cars under different braking modes and different train speeds, as well as different loading of cars. In the work, the wheelset braking process was simulated using the finite element method in the SolidWorks environment. The calculations made it possible to establish the proportion of heat flows directed into the brake pad and into the rail under different braking modes of the freight train. The influence of ambient temperature and car loading on these fractions has been established. The results obtained make it possible to more accurately predict the temperature of the rolling surface and the side surface of the wheel rim, which will allow diagnosing the braking system of a freight train in motion.

Keywords: freight train, brake system, wheel, rail, brake pad, heat flow, car braking simulation.

For citation: Balalaev, A. N. The distribution of heat between the wheel, rail and brake pad under different modes of braking of a freight train / A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov, S. V. Korkina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_8.

Сведения об авторах

Балалаев Анатолий Николаевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Вагоны»,
доктор технических наук, доцент, профессор,
e-mail: wagon.samgaps@mail.ru

Жебанов Александр Владимирович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Вагоны»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: zhebanov@inbox.ru

Information about the authors

Balalaev Anatoly Nikolaevich

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Wagons»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Professor,
e-mail: wagon.samgaps@mail.ru

Zhebanov Alexander Vladimirovich

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Wagons»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: zhebanov@inbox.ru

Коркина Светлана Владимировна

Самарский государственный университет путей
сообщения (СамГУПС),
кафедра «Вагоны»,
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой,
e-mail: korkina70@mail.ru

Korkina Svetlana Vladimirovna

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Wagons»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of The Chair,
e-mail: korkina70@mail.ru

А. Л. Охотников, А. В. Костюков

КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Рассматривается алгоритм автоматической калибровки датчиков системы технического зрения, который применяется для всех видов сенсоров с различными физическими принципами. Система технического зрения в данном случае выступает как элемент системы автоматического управления движением поездов и служит для обнаружения препятствий на пути движения поезда. Отдельно приводятся схемы и описание калибровки для камер видимого диапазона и тепловизоров с различными фокусными расстояниями. Для лидаров приведены описание и схема расчета внешних параметров с учетом преобразования 3D-облака точек в 2D-псевдоизображения для поиска маркеров по расстоянию, координате и рефлексивности с одновременной фильтрацией псевдоизображений по глубине и по рефлексивности. Использование автоматической калибровки датчиков системы технического зрения при подготовке поезда в депо и при осуществлении поездки на станциях калибровки позволит повысить точность измеряемых параметров поезда, снизить время реакции на внештатные ситуации, оптимизировать энергозатраты, снизить расходы на зарплатный фонд и уменьшить влияние человеческого фактора на работу поездов, а, следовательно, повысить безопасность движения.

Ключевые слова: автоматическая калибровка, внешние параметры датчиков, автономный транспорт, система технического зрения, обнаружение препятствий, смещение, угол поворота.

Для цитирования: Охотников, А. Л. Калибровка датчиков системы технического зрения тягового подвижного состава / А. Л. Охотников, А. В. Костюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 20–29. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_20.

Введение

В последнее время доступность недорогих и производительных сенсоров и вычислительных устройств привела к повсеместному их внедрению. В свою очередь, это позволило нарастить уровень автоматизации в различных отраслях, в том числе и на железной дороге. Появилась возможность внедрения полностью автономных поездов. Однако для надежной работы таких поездов требуются высокоточные датчики, формирующие системы технического (машинного) зрения, что, безусловно, приводит к необходимости создания средств для точной настройки и калибровки таких датчиков.

Автоматическое управление транспортными средствами в сложной неопределенной среде как сложная техническая задача решается современными научными подходами с применением оптимального управления и использованием средств технического зрения. Автономные транспортные средства помимо точного определения своего пространственного положения, как любые киберфизические системы, осуществляют оценку внешней среды в части идентификации и классификации окружающих объектов, обмениваются информацией с другими транспортными средствами, а также должны учитывать погрешности измерений датчиков и расчетов бортовым вычислителем измеряемых параметров, чтобы в итоге рассчитать оптимальную траекторию движения [1]. Сценарии управления ряда классов таких средств входят в число задач бортовых систем, которые используют технологии искусственного интеллекта и средства машинного обучения. Тогда необходимая точность определения внешних параметров движения (скорость, координата, расстояние до объекта) должна быть максимальной, а корректные определение и идентификация объектов (людей, животных, машин, зданий) могут непосредственно повлиять на безопасность движения автономного транспортного средства.

Успешная реализация задачи управления автономным объектом зависит от правильного подбора аппаратно-программной части системы технического зрения (СТЗ), которая включает в себя множество разнообразных датчиков (сенсоров) различной физической природы, а сбор, анализ и обработку данных делегирует специальному программному обеспечению с использованием сверхточных искус-

ственных нейронных сетей [2]. Для точного определения своего позиционирования (координат) относительно других объектов и ориентации в пространстве используется только часть сенсоров СТЗ. Эта группа датчиков, как правило, включает в себя инерциальные датчики, приемники ГНСС, акселерометры и одометры. Для сканирования окружающей обстановки применяют сенсоры СТЗ, такие как лидары, оптические и тепловые камеры, радары. При этом чем большее количество датчиков с разным диапазоном действия применяется, тем лучше обеспечивается обзор внешней среды вокруг объекта управления [3].

Для получения точных значений измеряемых параметров при движении транспортного объекта необходимо учитывать технические и инструментальные погрешности датчиков (сенсоров) СТЗ, с помощью которых определяются данные параметры. Эти погрешности можно учитывать программными средствами, учитывая их при расчете таких параметров, как расстояние до объекта, скорость, тормозной путь и т. д.

Данный вид калибровки получил распространение с недавних пор, когда стало актуальным использование систем компьютерного и технического зрения в целях решения задач управления автономными транспортными объектами [4]. Исследований на эту тему в России еще немного, гораздо большее распространение получили данные разработки в Соединенных Штатах Америки, что подтверждается всплеском изобретательской активности по этому направлению. За последние пять лет получено патентов: в США – 26 шт., в Китае – 16 шт., России – 3 шт.

Наиболее активно проявляют себя такие известные в части разработки датчиков для СТЗ и обработки цифровых изображений мировые компании, как Robert Bosch GmbH (Германия), Huawei Technologies Co. Ltd. (Китай), DeepMap Inc. (США), Dassault Systemes SE (Франция). Данные разработчики имеют серьезные планы по развитию бизнеса цифровой трансформации и выходу на рынок сбыта в странах Европы, Азии и Америки, которые определяются как географическим положением фирм-разработчиков, так и используемыми на территории патентования железнодорожными системами.

К сожалению, российские компании только начинают проявлять активность в данном направлении и, в связи с международными ограничениями, работают в основном на внутреннем рынке, причем используя пока в основном элементную базу импортного производства. Из основных отечественных разработчиков в данном направлении можно выделить ООО «Яндекс Беспилотные технологии», ООО «Когнитив Роботикс», АО «НИИАС» и др.

Таким образом, на сегодняшний день для проведения калибровки любых средств измерений необходимо подготовить методику калибровки согласно принятому в стране Национальному стандарту (ГОСТ Р 8.879-2014) [5].

Постановка задачи

Задачей исследования является создание системы автоматической калибровки датчиков систем технического зрения на различных физических принципах, используемых для железнодорожного транспорта.

Согласно [9] задачей калибровки является определение внешних и внутренних параметров датчиков (сенсоров) по имеющимся изображениям, фотографиям, видеоряду, а также облаку точек, полученным в процессе сканирования внешней среды средствами технического зрения.

Калибровка датчиков часто используется для сохранения валидности данных, получаемых СТЗ в задачах автоматического управления беспилотными транспортными объектами. Также калибровка позволяет исправить оптические искажения на изображениях при использовании видеокамер.

В последнее время задачам калибровки уделяется повышенное внимание, т. к. возрастают требования к использованию средств технического зрения. Анализ применяемых вариантов калибровки [6–9] показывает, что в большинстве случаев они имеют недостаточную эффективность и низкую достоверность, что приводит к снижению точности и увеличению погрешностей работы датчиков [10].

Необходимо иметь в виду следующие типы датчиков для проведения калибровки и валидации параметров СТЗ:

- 1) оптические камеры с разным фокусным расстоянием;
- 2) тепловизоры – тепловизионные камеры с разным фокусным расстоянием;
- 3) лидары.

Для всех перечисленных сенсоров обязательны для калибровки внешние параметры:

- для камер – вращение (R), перевод или перемещение (T);
- для лидаров – вращение по крену x , по тангажу y , по рысканию z .

Для видеокамер характерны и важны внутренние параметры:

1) *матрица внутренних параметров* (K), содержащая фокусные расстояния по каждой оси координат; координаты x и y оптического центра на плоскости изображения; признак наличия наклона между осями координат;

2) *дисторсия* (D) – искажение изображения, связанное с особенностями оптической системы (объектива) камеры или аберрацией.

Чаще всего искажение встречается у широкоугольных объективов. Максимальное искажение проявляется при минимальном фокусном расстоянии и широком угле обзора. Различают бочкообразную (отрицательную) и подушкообразную (положительную) дисторсию.

В настоящее время внешние параметры датчика автономного транспортного объекта (ТО) калибруются путем наблюдения за некоторыми установленными вручную маркерами в контрольном поле или в закрытой лаборатории в фиксированной области. Когда автономный ТО используется в течение определенного периода времени, относительная связь между пространственным расположением датчиков смещается из-за внешних факторов, таких как длительная высокочастотная вибрация, столкновения, резкие рывки и торможение. В этом случае требуется повторная калибровка. С постепенным продвижением рынка автономных транспортных средств растущее количество пользователей неизбежно создает растущий спрос на повторную калибровку, а далее – на автоматическую периодическую калибровку.

Самой сложной задачей при калибровке датчиков является необходимость сопоставления полученных данных от сенсоров разной физической природы: от лидара – это набор пространственных точек (3D-облако), от камер – оптические видеоизображения. В связи с этим для точной калибровки необходимо использовать специализированный калибровочный стенд. Стенд может включать один или несколько калибровочных объектов (маркеров), которые одинаково хорошо идентифицируются как в облаке точек, так и на изображении. Такая конфигурация позволяет получать более качественные результаты и использовать данные съемки в качестве исходных данных для калибровки как лидаров, так и камер. В качестве объектов (маркеров) для калибровки принято выбирать предметы правильных геометрических форм в виде сферы, кубов, прямоугольников, кругов. На маркерах выделяют особые точки, которые являются контурами калибровочных объектов или же находятся по центру, которые точно определяются как камерами, так и лидарами. На стенде изображения часто снабжаются дополнительными метками, такими, как ArUco-маркеры. Для калибровки тепловизоров используются подогреваемые элементы, совмещенные с геометрическими формами маркеров.

Чаще используют алгоритмы для калибровки одного вида датчиков – камер видимого диапазона, лидаров или тепловизионных камер. Одновременная калибровка всех перечисленных сенсоров является нетривиальной задачей, которую возможно решить в рамках данного исследования.

Для создания систем по настройке и поддержанию рабочего состояния датчиков СТЗ прежде всего следует подобрать комплекс необходимого оборудования. Можно выделить следующие этапы подготовки:

- выбор и разработка оснастки для калибровки в условиях депо и станций калибровки (калибровочные шаблоны, маркеры, актуаторы для подготовки шаблонов к работе, испытательные стенды, рабочие места операторов);

- выбор и разработка дополнительной аппаратуры для подстройки и/или оценки качества работы систем датчиков, размещаемых вдоль путей и/или на станциях (вспомогательные стационарные калибровочные шаблоны, специальные метки, эталонные объекты, системы освещения и подогрева);

- выбор станций калибровки и разработка схемы расположения калибровочных шаблонов для настройки датчиков различной дальности действия;

- разработка аппаратной части, устанавливаемой непосредственно в поезде (вычислительное устройство, система визуализации, система связи и передачи данных);

- разработка оборудования для рабочего места оператора в центре управления и контроля (система хранения и визуализации, в т. ч. интеграция с системами связи и передачи данных).

Кроме того, в дополнение к аппаратной части необходимо решить ряд организационных моментов и подобрать соответствующее программное обеспечение для настройки датчиков СТЗ. Работы в этом направлении также можно разбить на следующие этапы:

- определение оптимальных критериев состояния и качества настройки для каждого типа используемых датчиков;

- разработка необходимых программных пакетов для предобработки изображений (улучшения качества) и автоматизации процесса калибровки с учетом выбранных критериев для депо и станций калибровки;

- разработка необходимых программных пакетов для контроля за качеством работы датчиков СТЗ с учетом выбранных критериев для рабочего места оператора в центре управления и контроля;
- разработка алгоритмов программной коррекции настроек датчиков в режиме онлайн для работы с бортовым вычислительным устройством и блоком обнаружения препятствий;
- определение порядка действий при критическом отклонении датчиков от нормированного положения хотя бы в одной плоскости системы координат транспортного объекта и при невозможности калибровки программными средствами.

Использование автоматической калибровки датчиков СТЗ при подготовке поезда к работе в депо и при осуществлении поездки на станциях калибровки позволит повысить точность измеряемых параметров поезда, сократить время реакции на внештатные ситуации, оптимизировать энергозатраты, снизить расходы на зарплатный фонд и уменьшить влияние человеческого фактора на работу поездов, а, следовательно, повысить безопасность движения.

Алгоритм калибровки датчиков СТЗ

Необходимый результат предложенного технического решения достигается за счет автоматической калибровки датчиков СТЗ тягового подвижного состава (ТПС). Процедуру автоматической калибровки датчиков можно провести в депо или на станциях калибровки с использованием стационарных тестовых объектов, установленных на прямолинейном участке по обе стороны от оси пути на заданном расстоянии от знака «Остановка первого вагона» в зоне видимости датчиков. Каждый тестовый объект выполняется в виде шаблона заданного размера с нанесенным на его поверхность изображением соответствующего маркера в виде черных и белых прямоугольников известного размера. Каждый маркер имеет свой рисунок изображения, идентификатор и снабжается подогревом (для тепловизора). В зоне видимости каждого датчика устанавливаются шаблоны с разными маркерами, причем рекомендуемые расстояния расположения маркеров от места остановки ТПС составляют 30, 60 и 90 м. Данные расстояния приняты для калибровки сенсоров: 30–60 м для ближней зоны действия (до 50–200 м), а 60–90 м для дальней зоны действия (300–700 м).

База данных бортового вычислителя СТЗ ТПС содержит информацию о размерах шаблона, рисунках изображений маркеров и их идентификаторах, а также трехмерных координатах как минимум одной характерной точки каждого маркера и о внешних параметрах каждого датчика, полученных по результатам предыдущей калибровки. Координаты установки знака «Остановка первого вагона» и каждого шаблона на станциях калибровки также содержатся в вычислителе для определения точного расстояния до каждого маркера.

Начало процесса калибровки начинается после остановки ТПС и определения его точного местоположения относительно знака «Остановка первого вагона». Все датчики СТЗ проводят в течение заданного времени множественную съемку сцен с шаблонами, которые вычислитель предварительно обрабатывает. По результатам обработки каждой сцены на изображении выделяют маркеры с последующей их идентификацией на основе информации из базы данных вычислителя. По результатам идентификации не менее трех разных маркеров для каждого из них находятся трехмерные координаты не менее одной характерной точки. В случае если в результате съемки датчиком выявлено менее трех разных маркеров, вычислитель дает команду на проведение повторных съемок.

Далее вычислитель определяет внешние параметры датчика и использует их для определения валидности внешних параметров, полученных по результатам предыдущей калибровки. Если после проведения сравнения внешних параметров датчика определяется, что данные валидны, то калибровка не проводится, иначе – принимается решение о необходимости проведения калибровки, причем внешние параметры датчиков, полученные при проведении калибровки, вычислитель передает по каналам беспроводной связи в центр дистанционного контроля и управления (ЦДКУ) для отображения на мониторе рабочего места машиниста-оператора и для дальнейшего хранения результатов калибровки в его базе данных.

Отличие калибровки для тепловизоров заключается в обработке изображений шаблонов с маркерами, полученных в результате съемок тепловизором, с использованием оператора Лапласа и/или морфологических операций и нормализации. После чего осуществляется поиск тепловых контуров каждого тестового объекта, из которых выделяются области маркера, полученные в результате съемок каждой камерой. Далее маркеры идентифицируются путем поиска их в базе данных вычислителя.

Для камер видимого диапазона изображения шаблонов вычислитель фильтрует для улучшения изображения (в случае засветки или в условиях недостаточного освещения), при этом выделяются маркеры как непосредственно на изображении шаблонов без обработки, так и на изображении после их фильтрации, а результаты выделения каждого маркера объединяются и идентифицируются.

В случае обработки съемки сцен с шаблонами лидаром вычислитель из полученного 3D-облака точек формирует 2D-псевдоизображения для поиска на них маркеров по расстоянию, координате и рефлексивности. Для этого осуществляется процесс фильтрации псевдоизображений по глубине, а также фильтрация псевдоизображений по рефлексивности с выбранным шагом интенсивности (набором пороговых значений). В результате объединения полученных после фильтрации 2D-псевдоизображений формируется 3D-облако точек, которое затем кластеризуется с выбранным предельным шагом для каждого кластера. Причем каждому кластеру соответствует участок псевдоизображения по рефлексивности для кадрирования маркера, после чего осуществляется проверка идентификатора маркера.

Для повышения качества съемки датчиками при недостаточном уровне освещенности тестовых объектов возможно дополнительное освещение в зоне их установки, а для корректной настройки тепловизоров при температуре маркеров ниже установленной нормы включается подогрев шаблонов.

Описание алгоритмов приведено на рис. 1 и 2. На рис. 1 представлен алгоритм калибровки тепловизора и камер оптического диапазона, а на рис. 2 – алгоритм калибровки лидара.

В обоих вариантах для более точной калибровки датчиков при установке шаблонов осуществляется предварительный промер их координат, а также положения знака «Остановка первого вагона» с помощью геодезического оборудования. Полученные данные сверяются с координатами опорных объектов, расположенных на цифровой модели пути (ЦМП) [11].

Процесс калибровки датчиков СТЗ начинается только после полной остановки транспортного средства. В случае если проводится калибровка датчиков СТЗ пассажирского электропоезда при его работе на линии, процесс на станции калибровки осуществляется во время посадки/высадки пассажиров. Станции калибровки выбираются исходя из возможности установки тестовых объектов с маркерами на платформах, имеющих расстояние от места установки до края платформы от 60 до 90 м.

При проведении калибровки в депо вычислитель дает команду датчикам СТЗ о начале съемки сцен с изображениями маркеров после того, как получит соответствующие данные от аппаратно-программного устройства автоматизированного рабочего места оператора верификационного стенда, а в случае калибровки на станциях – после поступления данных о точном местоположении ТПС и команды вычислителя о начале съемки датчиками СТЗ в автоматическом режиме.

Скорректированные в результате калибровки внешние параметры каждого датчика сохраняются в базе данных вычислителя СТЗ и используются в дальнейшем блоком определения препятствий (БОП) для определения точного расстояния и идентификации объектов-препятствий вдоль железнодорожных линий.

При вычислении внешних параметров как тепловизора, так и каждой камеры видимого диапазона осуществляется решение задачи, называемой Perspective-n-Point (PnP), обеспечивающее оценку их положения с учетом набора из n 3D-точек в системе координат ТПС и соответствующих 2D-проекций на изображении [12]. Как известно, положение тепловизора и каждой камеры состоит из шести степеней свободы (DOF), которые складываются из вращения (крена, тангажа и рыскания) и 3D-трансляции камеры относительно системы координат ТПС. Внутренние параметры камеры считаются выходными данными алгоритма. После получения внешних параметров камер и лидаров данные смещений (погрешностей) учитываются при обработке данных от датчиков для работы БОП СТЗ. Внесение данных поправок повышает точность расчета измеряемых параметров, критичных для движения автономных транспортных объектов, таких, в частности, как беспилотные поезда.

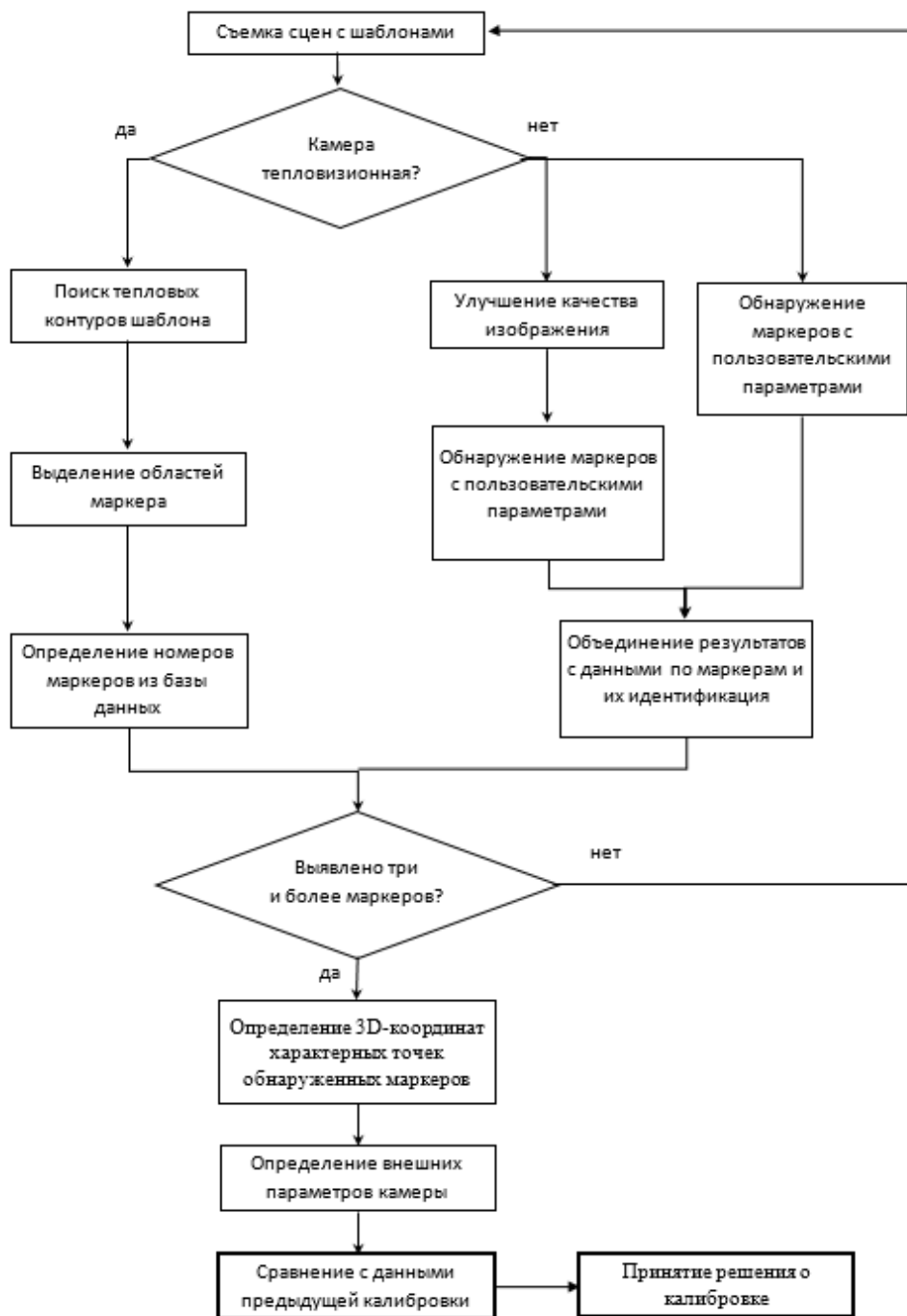


Рис. 1. Алгоритм калибровки видео- и тепловизионных камер

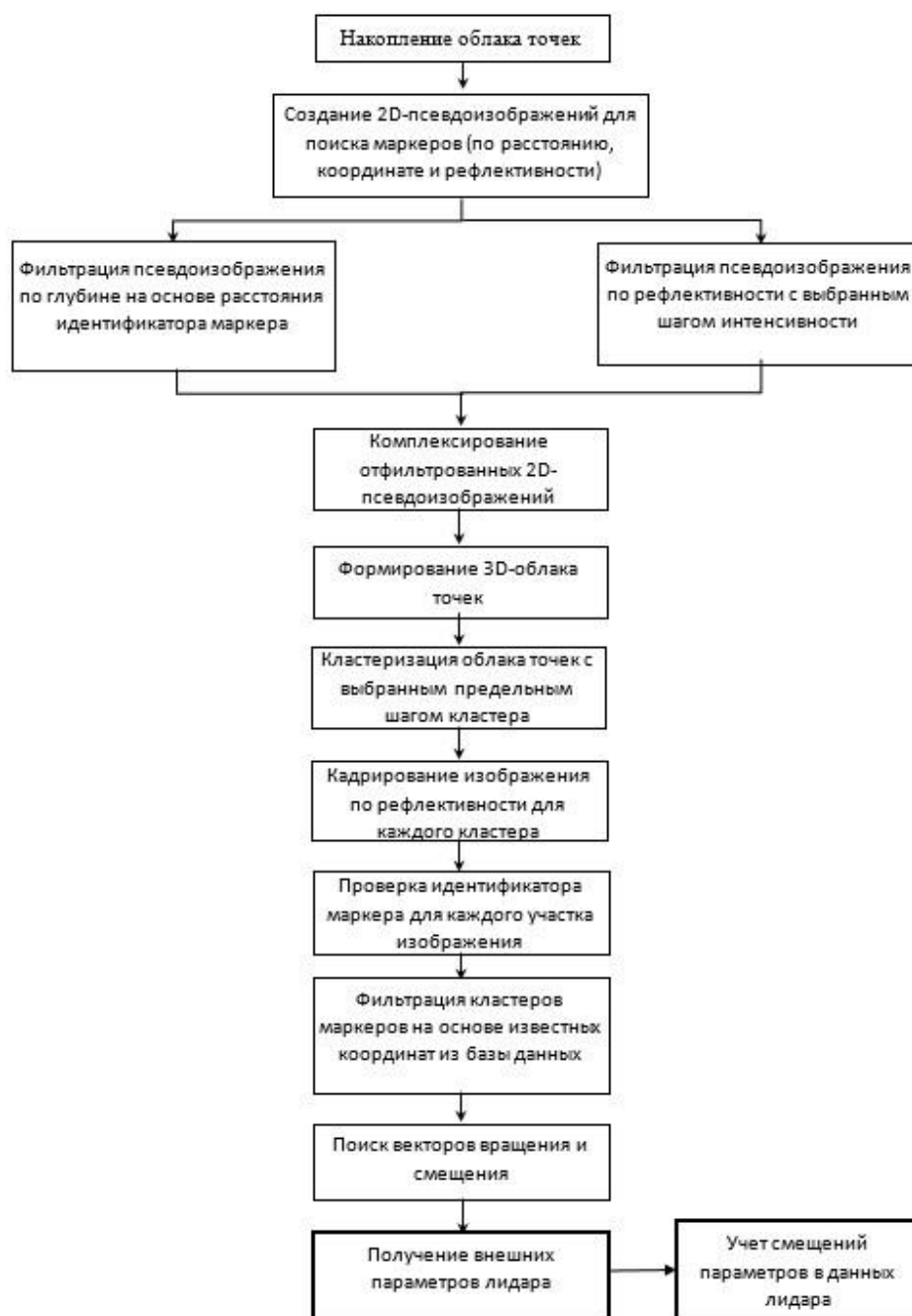


Рис. 2. Алгоритм калибровки лидаров

Вывод

Приведенный алгоритм учитывает возможность калибровки всех видов используемых датчиков СТЗ, которые осуществляют свою основную функцию по определению и идентификации объектов-препятствий на пути движения ТПС и обеспечивают безопасное движение поезда по участку. Применяемые вычислительные операции по оптимизации полученных изображений для поиска и идентификации маркеров учитывают минимально возможную загрузку процессора бортового вычислителя и максимальную точность определения координат характерных точек маркера для определения внешних параметров датчиков. Решение о проведении калибровки принимается вычислителем после сравнения полученных данных внешних параметров с данными предыдущей калибровки. Если во время движения поезда датчик(-и) изменил(-и) свое положение относительно системы координат ТПС, то внесение поправки в программу расчета измеряемых параметров (скорость, расстояние до объекта, кривая торможения) важно для соблюдения безопасного движения автономного транспортного объекта. В случае критического отклонения датчика от шаблонного положения в любой из оси координат, когда программными средствами поправку учесть не

возможно, может быть принято решение о необходимости калибровки датчиков в условиях депо на специальном стенде с рабочего места оператора. Проведение калибровочных работ крайне необходимо в случаях применения высокоточных измерительных сенсоров, особенно в условиях автоматического управления транспортными объектами, которые все чаще появляются в нашей жизни.

Неточности в расчетах измеряемых параметров для таких объектов могут повлечь за собой опасные последствия как для безопасности пассажиров и сохранности грузов, так и для целостности транспортной инфраструктуры. В итоге такие последствия могут сказаться на графике движения поездов и даже привести к полной остановке движения, что повлечет огромные финансовые потери и срыв обязательств по доставке.

Список литературы

1 Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения и прогноза пути торможения в беспилотных системах управления движением поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, А. Л. Охотников // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 6(97). – С. 6–12. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-6-1.

2 **Розенберг, Е. Н.** Построение системы адаптивного планирования пропуска поездов с использованием цифровых методов обработки данных Data Science и Big data / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, А. М. Ольшанский // Интеллектуальные транспортные системы : материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. – Москва : Российский университет транспорта, 2022. – С. 285–289. – ISBN 978-5-00204-191-6.

3 Автоматическая калибровка системы видеокamera и лидаров для автономных мобильных комплексов / Ю. Б. Блохинов, Е. Э. Андриенко, К. К. Казахмедов, Б. В. Вишняков // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 3. – С. 382–393. – DOI 10.18287/2412-6179-CO-812.

4 **Охотников, А. Л.** Транспортный объект как элемент системы автоматического управления / А. Л. Охотников // Наука и технологии железных дорог. – 2022. – Т. 6, № 3(23). – С. 45–52. – ISSN 2587-5752.

5 **ГОСТ Р 8.879-2014.** Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 ноября 2014 г. № 1701-ст. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 6 с.

6 **Здоровцов, А. А.** Разработка и исследование алгоритма калибровки монокулярной камеры контроля скорости / А. А. Здоровцов // Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования : материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Краснодар, 21–24 апреля 2021 года. – Краснодар : ФГБУ «Российское

References

1 Errors in measuring the distance to an obstacle by means of technical vision and braking path prediction in unmanned train traffic control systems / L. A. Baranov, P. F. Bestemyanov, E. P. Balakina, A. L. Okhotnikov // Mir Transporta (World of Transport and Transportation). – 2021. – Vol. 19, No. 6 (97). – P. 6–12. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-6-1.

2 **Rozenberg, E. N.** Building an adaptive planning system for trains using digital data processing methods Data Science and Big data / E. N. Rozenberg, A. V. Ozerov, A. M. Olshansky // Intelligent transport systems : materials International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 26, 2022. – Moscow : Russian University of Transport, 2022. – P. 285–289. – ISBN 978-5-00204-191-6.

3 Automatic calibration of multiple cameras and lidars for autonomous vehicles / Yu. B. Blokhinov, E. E. Andrienko, K. K. Kazakhmedov, B. V. Vishnyakov // Computer optics. – 2021. – Vol. 45, No. 3. – P. 382–393. – DOI 10.18287/2412-6179-CO-812.

4 **Okhotnikov, A. L.** Transport object as an element of the automatic control system / A. L. Okhotnikov // Science and Technology of Railways. – 2022. – Vol. 6, No. 3(23). – P. 45–52. – ISSN 2587-5752.

5 **GOST R 8.879-2014.** State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of calibration of measuring instruments. General requirements for content and presentation : National Standard of the Russian Federation: official publication: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 20, 2014 No. 1701-st. – Moscow : Standartinform, 2015. – 6 p.

6 **Zdorovtsov, A. A.** Development and study of the calibration algorithm for a monocular speed camera / A. A. Zdorovtsov // Applied Mathematics: Modern Problems of Mathematics, Informatics and Modeling : Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Krasnodar, 21 – April 24, 2021. – Krasnodar : FSBI “Russian Energy

энергетическое агентство» Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2021. – С. 150–155. – ISBN 978-5-91221-511-7.

7 **Polyakov, A. R.** Auto-calibration and synchronization of camera and MEMS-sensors / A. R. Polyakov, A. V. Kornilova, I. A. Kirilenko // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. – 2018. – Vol. 30, No. 4. – P. 169–182. – DOI 10.15514/ISPRAS-2018-30(4)-11.

8 **Сенченко, П. В.** Задача автоматической калибровки проектора и сенсора глубины / П. В. Сенченко, Д. А. Ознабихин, В. Ф. Тарасенко // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 2(35). – С. 71–77. – DOI 10.17223/19988605/35/8.

9 **Курохтин, В. Ю.** Определение внешних параметров калибровки камеры системы технического зрения / В. Ю. Курохтин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 1(53). – С. 132–136. – ISSN 1813-9108.

10 **Курохтин, В. Ю.** Определение внешних параметров калибровки камеры системы технического зрения / В. Ю. Курохтин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 1(53). – С. 132–136. – ISSN 1813-9108.

11 **Якушев, Д. А.** Цифровая модель пути для беспилотного управления движением поездов / Д. А. Якушев // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 4. – С. 35–39. – DOI 10.34649/AT.2021.4.4.005.

12 **Terzakis, G.** A Consistently Fast and Globally Optimal Solution to the Perspective-n-Point Problem / G. Terzakis, M. Lourakis // In Computer Vision – ECCV 2020 : Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12346 / A. Vedaldi, H. Bischof, T. Brox, J. M. Frahm (eds). – Springer, Cham, 2020. – DOI 10.1007/978-3-030-58452-8_28.

Agency” of the Ministry of Energy of Russia Krasnodar CNTI – branch of the FGBU “REA” of the Ministry of Energy of Russia, 2021. – P. 150–155. – ISBN 978-5-91221-511-7.

7 **Polyakov, A. R.** Auto-calibration and synchronization of camera and MEMS-sensors / A. R. Polyakov, A. V. Kornilova, I. A. Kirilenko // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. – 2018. – Vol. 30, No. 4. – P. 169–182. – DOI 10.15514/ISPRAS-2018-30(4)-11.

8 **Senchenko, P. V.** The problem of automatic calibration of the projector and depth sensor / P. V. Senchenko, D. A. Ozabikhin, V. F. Tarasenko // Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. – 2016. – No. 2(35). – P. 71–77. – DOI 10.17223/19988605/35/8.

9 **Kurokhtin, V. Yu.** Determination of external calibration parameters of a vision system camera / V. Yu. Kurokhtin // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. – 2017. – No. 1(53). – P. 132–136. – ISSN 1813-9108.

10 **Kurokhtin, V. Yu.** Determination of external calibration parameters of the vision system camera / V. Yu. Kurokhtin // Modern technologies. System Analysis. Modeling. – 2017. – No. 1(53). – P. 132–136. – ISSN 1813-9108.

11 **Yakushev, D. A.** Digital track model for unmanned train traffic control / D. A. Yakushev // Automation, Communication, Informatics. – 2021. – No. 4. – P. 35–39. – DOI 10.34649/AT.2021.4.4.005.

12 **Terzakis, G.** A Consistently Fast and Globally Optimal Solution to the Perspective-n-Point Problem / G. Terzakis, M. Lourakis // In Computer Vision – ECCV 2020 : Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12346 / A. Vedaldi, H. Bischof, T. Brox, J. M. Frahm (eds). – Springer, Cham, 2020. – DOI 10.1007/978-3-030-58452-8_28.

A. L. Okhotnikov, A. V. Kostyukov

CALIBRATION OF THE VISION SYSTEM SENSORS OF THE TRACTION ROLLING STOCK

Abstract. The paper considers an algorithm for automatic calibration of sensors of a vision system, which is used for all types of sensors with different physical principles. The vision system in this case acts as an element of the automatic train traffic control system and serves to detect obstacles in the way of the train. Separately, diagrams and descriptions of calibration are given for cameras in the visible range and thermal imagers with different focal lengths. For lidars, a description and a scheme for calculating external parameters are given, taking into account the transformation of a 3D point cloud into 2D pseudo-images to search for markers by distance, coordinate, and reflectivity with simultaneous filtering of pseudo-images by depth and reflectivity. The use of automatic calibration of vision system sensors during train preparation at the depot and when traveling at calibration stations will improve the accuracy of the measured train parameters, reduce response time to emergency situations, optimize energy costs, reduce payroll costs and reduce the impact of the human factor on train operation, and consequently improve traffic safety.

Keywords: automatic calibration, external parameters of sensors, autonomous transport, vision system, obstacle detection, displacement, rotation angle.

For citation: Okhotnikov, A. L. Calibration of the vision system sensors of the traction rolling stock / A. L. Okhotnikov, A. V. Kostyukov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 20–29. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_20.

Сведения об авторах

Охотников Андрей Леонидович

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»),
заместитель начальника Департамента информационных технологий – начальник отдела стратегического развития,
e-mail: a.ohotnikov@vnias.ru

Костюков Александр Владимирович

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

Information about the authors

Okhotnikov Andrey Leonidovich

Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport (JSC “NIAS”),
Deputy Head of the Information Technology Department – Head of the Strategic Development Department,
e-mail: a.ohotnikov@vnias.ru

Kostyukov Alexander Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Foundations of Electrical Engineering»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kav@rgups.ru

В. А. Соломин, А. В. Соломин, Н. А. Трубицина, Л. Л. Замшина, А. А. Чехова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ИНДУКТОРА ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

Аннотация. Наряду с исследованием электромагнитных и тяговых характеристик линейных асинхронных двигателей важное значение имеет изучение тепловых процессов в них, которые оказывают значительное влияние на эксплуатационные показатели и надежность работы линейных электрических машин. В данной статье представлены результаты стендовых тепловых испытаний индуктора тягового линейного асинхронного двигателя с дискретной конструкцией магнитопровода и трехфазной обмотки, предназначенного для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта, в стационарном режиме работы. Приведены результаты тепловых испытаний для двух значений токовой нагрузки обмотки индуктора тягового линейного асинхронного двигателя, определены значения постоянных времени нагрева обмотки, графоаналитическим путем установлено значение часового тока для номинального режима работы двигателя.

Ключевые слова: индуктор тягового линейного асинхронного двигателя, метод сопоставлений, установившийся нагрев, постоянная времени нагрева, часовой ток.

Для цитирования: Исследование процесса нагрева индуктора тягового линейного асинхронного двигателя для экспериментального стенда / В. А. Соломин, А. В. Соломин, Н. А. Трубицина [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 30–37. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_30.

Введение

Развитие современного общества неразрывно связано с техническим прогрессом в области транспортных коммуникаций и новыми видами транспорта, в первую очередь железнодорожного, обеспечивающего значительную часть грузовых и пассажирских перевозок. Свою роль в повышении эффективности и качества перевозок будут играть новые виды высокоскоростного транспорта – магнитолевитационный и вакуумный. Одной из главных составляющих нового высокоскоростного транспорта является система тягового электрического привода. Для магнитолевитационного и вакуумного транспорта тяговый электропривод содержит линейные двигатели, преобразующие электрическую энергию непосредственно в поступательное перемещение транспортного средства. Линейные асинхронные двигатели способны обеспечить скорости передвижения новых транспортных средств в диапазоне 400–500 км/ч, и их исследование представляет собой актуальную задачу [1, 2]. Электромагнитные процессы в линейных электродвигателях исследованы достаточно глубоко [3]. На нынешнем этапе развития новых систем высокоскоростного подвижного состава тепловые процессы в линейных асинхронных двигателях, в первую очередь с дискретным строением магнитных систем индукторов, изучены недостаточно и являются актуальными для исследования. Один из этапов таких исследований выполнен в Ростовском государственном университете путей сообщения.

Исследование нагрева индуктора

При создании принципиально нового магнитолевитационного транспорта (МЛТ) возникает ряд проблем и научно-технических задач, требующих обязательного решения и изучения. Одна из таких задач – исследование тепловых процессов в индукторе тягового линейного асинхронного двигателя (ТЛАД), предназначенного для магнитолевитационного транспорта. Процессы нагревания и охлаждения электрических машин, в том числе и линейных, и электрооборудования рассматривались в ряде научных работ [1–10]. Вопросы нагревания и охлаждения электрических машин с дискретным строением магнитной системы индуктора ТЛАД с поперечным магнитным потоком ранее не исследовались, и изучение этих процессов является актуальной задачей. Для первого этапа исследований был разработан и изготовлен индуктор ТЛАД мощностью 36 кВт для среднеразмерного испытательного стенда магнитолевитационного транспорта. Индуктор ТЛАД состоит из отдельных, поперечно шихтованных сердечников, на зубцах которых установлены катушки обмотки, расположенных один за другим в направлении движения. Индуктор ТЛАД имеет естественную воздушную систему охлаждения и представляет собой асинхронную машину с поперечным замыканием магнитного потока. Принципиальная электрическая схема для изучения тепловых процессов в индукторе ТЛАД показана на рис. 1

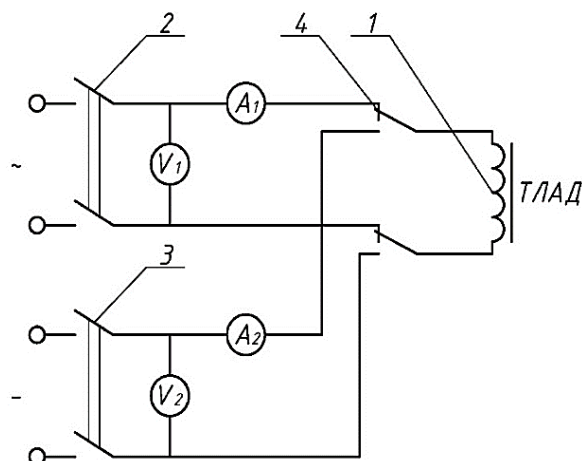


Рис. 1. Принципиальная схема для тепловых испытаний индуктора ТЛАД:

I – индуктор; 2 – рубильник; 3 – рубильник; 4 – переключатель

Тепловые испытания проводились в стационарном режиме, т.е. при неподвижном индукторе. Экспериментальные исследования выполнялись в лаборатории с однофазным источником напряжения, поэтому обмотки трех фаз соединены последовательно исходя из предположения, что в условиях эксплуатации высокоскоростного экипажа токовая нагрузка фаз будет симметричной, при которой в каждой фазе индуктора двигателя токи будут одинаковыми.

Вначале было определено активное сопротивление обмотки индуктора в холодном состоянии методом амперметра и вольтметра на постоянном токе при температуре окружающей среды, пересчитанное затем на температуру 20 °С.

Результаты измерений и вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Определение активного сопротивления обмотки индуктора в холодном состоянии

<i>I</i> , А	<i>U</i> , мВ	<i>R</i> , Ом	<i>R</i> _{ср} , Ом	<i>t</i> _{окр} , °С	<i>R</i> _{20°} , Ом
3,56	155	0,0435	0,043	23	0,0425
4,42	188	0,0425			
5,1	219,5	0,043			

При экспериментальных исследованиях определялась величина среднего значения превышения температуры обмотки индуктора над температурой охлаждающей среды.

Измерения выполнены для двух значений тока нагрузки *I* = 98,75 А и *I* = 190 А. Максимальная величина тока обмотки определена с учетом мощности источника питания, имеющегося в лаборатории. Среднее значение перегрева обмотки индуктора найдено методом амперметра и вольтметра. При измерении сопротивления обмотка отключалась от источника переменного напряжения и подключалась к измерительной цепи постоянного тока.

Во избежание погрешности измерений, связанных с отключением обмотки индуктора от источника переменного напряжения и подключением ее к сети постоянного тока, контроль температуры осуществлялся и при помощи хромель-копелевых термопар, встроенных в обмотку. Значения температуры фиксировались при помощи термопар. При достижении установившегося нагрева обмотки индуктор отключался от источника переменного напряжения и методом амперметра и вольтметра измерялось активное сопротивление обмотки в горячем состоянии *r*_Г.

Превышение температуры обмотки индуктора тягового линейного асинхронного двигателя над температурой окружающей среды определялось по формуле

$$\tau = t_G - t_C = 250 \frac{r_G - r_X}{r_X} + 20 - t_0,$$

где *t*₀ = 20 °С – температура окружающей среды.

Результаты исследования нагрева обмотки индуктора при токе $I = 98,75$ А сведены в табл. 2 и 3, а при токе $I = 190$ А – в табл. 4 и 5.

Таблица 2

Температура обмотки, измеренная термопарой, при $I = 98,75$ А

t , мин	E , мВ	τ , °С	$t_{\text{окр}}$, °С	$t_{\text{обм}}$, °С
0	0	0	23,5	23,5
15	0,3	4,5	23,5	28
25	0,52	8	23,5	31,5
45	0,82	12,5	23,5	36
63	1,03	16,5	24	39,5
77	1,19	18	24	42
90	1,31	20	24	44
105	1,41	21,5	24	45,5
120	1,48	22,5	24	46,5
143	1,58	24	24,5	48,5
150	1,63	25	24,3	49,3
180	1,63	25	24,3	49,3

Таблица 3

Температура обмотки, определенная при установившемся нагреве методом амперметра и вольтметра, при $I = 98,75$ А

U , мВ	I , А	R , Ом	$R_{\text{ср}}$, Ом	$t_{\text{окр}}$, °С	τ , °С
230	4,81	0,0479	0,0479	24,3	26,7
180	3,72	0,0482			
295	6,22	0,0474			

Таблица 4

Температура обмотки, измеренная термопарой, при $I = 190$ А

t , мин	E , мВ	τ , °С	$t_{\text{окр}}$, °С	$t_{\text{обм}}$, °С
0	0	0	24	24
15	1,2	18,5	24	42,5
20	1,68	25,5	24,5	50
30	2,28	34,5	24,5	59
40	2,89	43	25	68
63	4,05	60	25	85
82	4,7	69	25	94
100	5,15	75	25	100
122	5,5	80	25	105
140	5,72	83,5	25	108,5
160	5,92	86	25	111,5
170	6,07	88	25	113
180	6,07	88	25	113

По данным табл. 2 и 4 построены кривые нагрева обмотки индуктора ТЛАД при ее токовых нагрузках 98,75 и 190 А (рис. 2).

По кривым (см. рис. 2) определена постоянная времени нагрева обмотки индуктора, значения которой составили соответственно 60 и 61 мин.

Таблица 5

**Температура обмотки, определенная при установившемся нагреве
методом амперметра и вольтметра, при $I = 190$ А**

U , мВ	I , А	R , Ом	$R_{ср}$, Ом	$t_{окр}$, °С	τ , °С
290	5,09	0,0575	0,0575	25	83
200	3,49	0,0575			
320	5,4	0,057			

Как видно из рис. 2 и 3, постоянная времени нагрева обмотки индуктора составляет практически 60 мин, поэтому в течение часа температура обмотки достигает значения, определяемого соотношением:

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где τ_{∞} – установившееся значение температуры; t – время работы индуктора; T – постоянная времени нагрева.

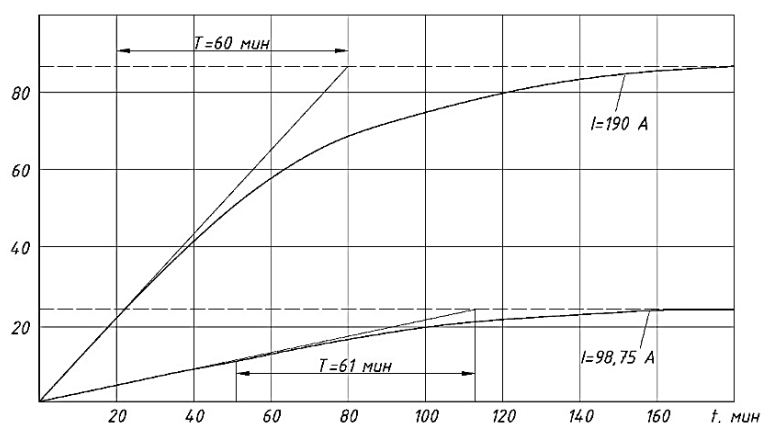


Рис. 2. Кривые нагревания обмотки индуктора ТЛАД

При работе индуктора в течение часа температура его обмотки достигнет значения, равного 0,64 от ее установившегося значения при заданной нагрузке.

Для тяговых электрических машин важное значение имеет часовой ток нагрузки. Для определения номинального часового тока индуктора ТЛАД по условиям его нагрева построим зависимость температуры нагрева обмотки от квадрата ее тока (см. рис. 3).

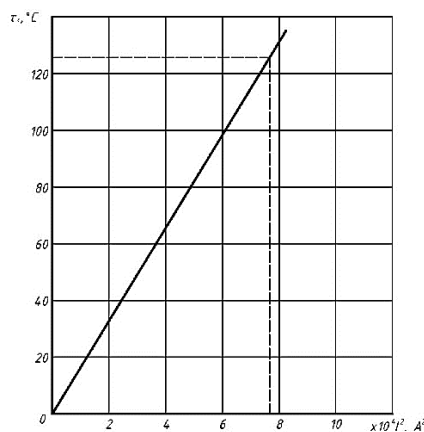


Рис. 3. Зависимость температуры обмотки индуктора в часовом режиме от квадрата тока нагрузки

По рис 3 определим значение квадрата часового тока, соответствующего максимальному перегреву обмотки в 125 °С при классе изоляции F. Это значение составляет $I^2 = 7,7 \times 10^4$ А, а ток обмотки индуктора ТЛАД в часовом режиме $I = 277$ А.

Данная методика определения тока в часовом режиме рекомендована в [11] для случаев, когда по условиям отсутствия источника питания соответствующей мощности необходимо определить значение часового тока, соответствующего номинальной мощности двигателя.

Заметим, что, поскольку тепловые испытания проходили в стационарном режиме (при неподвижном индукторе), теплоотдача от индуктора в окружающую среду осуществлялась только путем естественной конвекции.

В последующем планируются выполнить тепловые испытания индуктора ТЛАД при его движении на линейном стенде. В этом случае будет осуществляться, обдув индуктора двигателя воздухом, а это приведет к увеличению коэффициента теплоотдачи и соответственно к уменьшению температуры обмотки.

При движении индуктора ТЛАД (транспортного экипажа) с номинальной скоростью 13,88 м/с коэффициент обдува машины составит $k = 0,1$. Для этого случая коэффициент теплоотдачи индуктора составит

$$\alpha = \alpha_0(1 + kV_s) = 14(1 + 0,1 \cdot 13,88) = 33,43 \text{ Вт / (град м}^2\text{)},$$

где α_0 – коэффициент теплоотдачи при $V_s = 0$.

Установлено, что коэффициент теплоотдачи при движении индуктора ТЛАД возрос в 2,39 раза. Очевидно, что при этом установившееся значение температуры перегрева обмотки индуктора ТЛАД значительно уменьшится. Из этого следует, что часовой ток экспериментального индуктора будет больше, чем определенный на основании тепловых испытаний при неподвижном индукторе.

Оценим значение часового тока при возрастании коэффициента теплоотдачи в 2,39 раза. Для этого нами рассматривался индуктор ТЛАД в качестве однородного твердого тела. В этом случае значение установившегося перегрева обмотки индуктора уменьшится пропорционально увеличению коэффициента теплоотдачи в соответствии с соотношением

$$\tau_\infty = \frac{Q}{\alpha S},$$

где τ_∞ – установившаяся температура перегрева; Q – количество выделившегося тепла; α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь тепловыделяющей поверхности.

Следует отметить, что постоянная времени нагрева уменьшится во столько же раз, так как

$$\tau_\infty = \frac{MC}{\alpha S},$$

где M – масса индуктора; C – теплоемкость.

В этом случае в соответствии с формулой

$$\tau_p = \tau_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

получим

$$\tau_r = 0,418\tau_\infty \left(1 - e^{-\frac{60}{25}} \right) = 0,38\tau_\infty.$$

Установлено, что при возрастании коэффициента теплоотдачи в 2,39 раза температура перегрева индуктора ТЛАД в часовом режиме уменьшается в 1,68 раза. Это позволяет увеличить токовую нагрузку индуктора в 1,3 раза до 360 А. При увеличении скорости движения индуктора коэффициент эффективности его обдува воздухом будет расти. Увеличение коэффициента эффективности обдува индуктора, при необходимости, позволит повышать его токовую нагрузку и соответственно мощность тягового линейного асинхронного двигателя для магнитолевитационного транспорта.

Выводы

1 В результате стендовых тепловых испытаний индуктора ТЛАД двигателя для магнитолевитационного транспорта определены установившиеся значения температуры обмотки при разных значениях токовых нагрузок и установлены значения постоянных времени нагрева при отсутствии обдува индуктора воздухом.

2 Графоаналитическим методом определена величина тока индуктора в часовом режиме, при котором превышение температуры обмотки достигнет 125 °С, предусмотренного классом изоляции F.

3 Установлено, что при минимальном коэффициенте обдува индуктора воздухом, равном 0,1, коэффициент теплоотдачи индуктора возрастает в 2,39 раза и это позволит увеличить токовую нагрузку в 1,3 раза.

Список литературы

1 **Бочаров, В. И.** Основы проектирования электроподвижного состава с магнитным подвесом и линейным тяговым электроприводом. Ч. 2 / В. И. Бочаров, Ю. А. Бахвалов, И. И. Талья – Ростов-на-Дону : Издательство РГУ, 1992. – 296 с. – ISBN 5-7507-0853-5.

2 Магнитолевитационная транспортная технология : монография / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев [и др.] ; под ред. В. А. Гапановича. – Москва : Физматлит. – 2014. – 476 с. – ISBN 978-5-9221-1540-7.

3 **Веселовский, О. Н.** Линейные асинхронные двигатели / О. Н. Веселовский, А. Ю. Коняев, Ф. Н. Сарапулов. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 256 с. – ISBN 5-283-00559-3.

4 **Соломин, В. А.** Тепловые исследования линейного асинхронного двигателя / В. А. Соломин, А. В. Соломин, Н. А. Трубицина // Актуальные проблемы и перспективы развития, транспорта, промышленности и экономики : сборник научных трудов международной научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – Том 1. – С. 216–219. – ISBN 978-5-88814-994-2.

5 **Винокуров, В. А.** Исследование процесса нагревания обмотки фазного вторичного элемента ОЛАД / В. А. Винокуров, В. И. Бочаров, Б. Н. Минаев // Известия вузов. Серия «Электромеханика», 1987. – № 7. – С. 48–56.

6 **Бочаров, В. И.** Нагревание реактивной шины линейного асинхронного двигателя ВСНТ / В. И. Бочаров, В. А. Винокуров, Б. Н. Минаев // Известия вузов. Серия «Электромеханика». – 1985. – № 8. – С. 61–67.

7 **Борисенко, А. И.** Охлаждение промышленных электрических машин / А. И. Борисенко, О. Н. Костиков, А. И. Яковлев. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

8 **Тубис, Я. Б.** Методы исследования и расчета нагрева и пути интенсификации охлаждения асинхронных двигателей / Я. Б. Тубис, М. С. Фанарь // Электротехническая промышленность. Серия «Электрические машины». – 1979. – № 12. – С. 12–15.

References

1 **Bocharov, V. I.** Fundamentals of designing electric rolling stock with magnetic suspension and linear traction electric drive. Part 2 / V. I. Bocharov, Yu. A. Bakhvalov, I. I. Talya. – Rostov-on-Don : Ed. RGU, 1992. – 296 p. – ISBN 5-7507-0853-5.

2 Maglev transport technology: monograph / Yu. F. Antonov, A. A. Zaitsev [et al.] ; ed. V. A. Gapanovich. – Moscow : Fizmatlit. – 2014. – 476 p. – ISBN 978-5-9221-1540-7.

3 **Veselovsky, O. N.** Linear asynchronous motors / O. N. Veselovsky, A. Yu. Konyaev, F. N. Sarapulov. – Moscow: Energoatomizdat, 1991. – 256 p. – ISBN 5-283-00559-3.

4 **Solomin, V. A.** Thermal research of a linear asynchronous engine / V. A. Solomin, A. V. Solomin, N. A. Trubitsina // Actual problems and prospects of development, transport, industry and economy : sat. scientific tr. intl. n.-t. conf. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – Vol. 1. – P. 216–219. – ISBN 978-5-88814-994-2.

5 **Vinokurov, V. A.** Investigation of the process of heating the winding of the phase secondary element OLAD / V. A. Vinokurov, V. I. Bocharov, B. N. Minaev // Proceedings of universities "Electromechanica". – 1987. – No. 7. – P. 48–56.

6 **Bocharov, V. I.** Heating of the reactive bus of a linear asynchronous motor VSNT / V. I. Bocharov, V. A. Vinokurov, B. N. Minaev // Proceedings of universities "Electromechanica". – 1985. – No. 8. – P. 61–67.

7 **Borisenko, A. I.** Cooling of industrial electrical machines / A. I. Borisenko, O. N. Kostikov A. I. Yakovlev. – Moscow : Energoatomizdat, 1983. – 296 p.

8 **Tubis, Ya. B.** Methods of research and calculation of heating and ways of intensification of cooling of asynchronous engines / Tubis, Ya. B., Fanar, M. S. // Electrotechnical industry. Series "Elektricheskiye Mashiny". – 1979. – No. 12. – P. 12–15.

9 **Андреев, М. А.** Исследование температурных режимов индукционных электромагнитных насосов / М. А. Андреев, Е. Д. Болотова, В. А. Дивани // Магнитная гидродинамика. – 1982. – № 2. – С. 97–102.

10 **Фигурнов, Е. П.** Определение длительно допустимых токов проводов систем электроснабжения железных дорог / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, В. И. Харчевников // Вестник ВНИИЖТ. – 2019. – Том 78. – № 2. – С. 90–95. – ISSN 2223-9731.

11 **Жерве, Г. К.** Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Москва : Энергоиздат, 1984. – 408 с.

9 **Andreev, M. A.** Study of temperature regimes of induction electromagnetic pumps / M. A. Andreev, E. D. Bolotova, V. A. Divani // Magnitnaya hydrodynamics. – 1982. – No. 2. – P. 97–102.

10 **Figurnov, E. P.** Determination of long-term permissible currents of wires of railway power supply systems / E. P. Figurnov, Yu. I. Zharkov, V. I. Kharchevnikov // Vestnik VNIIZhT. – 2019. – Vol. 78. – No. 2. – P. 90–95. – ISSN 2223-9731.

11 **Gervais, G. K.** Industrial testing of electrical machines / G. K. Gervais. – Moscow : Energoizdat, 1984. – 408 p.

V. A. Solomin, A. V. Solomin, N. A. Trubitsina, L. L. Zamshina, A. A. Chekhova

INVESTIGATION OF THE INDUCTOR HEATING PROCESS OF THE TRACTION LINEAR ASYNCHRONOUS MOTOR FOR THE EXPERIMENTAL STAND

Abstract. Along with the study of the electromagnetic and traction characteristics of linear induction motors, it is important to study the thermal processes in them, which have a significant impact on the performance and reliability of the linear electric machines. This paper presents the results of bench thermal tests of the inductor of a traction linear asynchronous motor with a discrete design of the magnetic circuit and a three-phase winding, designed for high-speed magnetic levitation transport, in a stationary mode of operation. The results of thermal tests for two values of the current load of the inductor winding of a traction linear asynchronous motor are given, the values of the time constants for heating the winding are determined, and the value of the hourly current for the nominal mode of operation of the motor is determined by graphic-analytical means.

Keywords: traction linear asynchronous motor inductor, resistance method, steady state heating, heating time constant, clock current.

For citation: Investigation of the inductor heating process of the traction linear asynchronous motor for the experimental stand / V. A. Solomin, A. V. Solomin, N. A. Trubitsina [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 30–37. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_30.

Сведения об авторах

Соломин Владимир Александрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Электрические машины и аппараты»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ema@rgups.ru

Соломин Андрей Владимирович

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

Трубицина Надежда Анатольевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Электрические машины и аппараты»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ema@rgups.ru

Information about the authors

Solomin Vladimir Alexandrovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Electric Machines and Apparatuses»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ema@rgups.ru

Solomin Andrey Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Cars and Car Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: vag@rgups.ru

Trubitsyna Nadezhda Anatolievna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Electric Machines and Apparatuses»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: ema@rgups.ru

Замшина Лариса Леонидовна

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Электрические машины и аппараты»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ema@rgups.ru

Чехова Анастасия Алановна

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Электрические машины и аппараты»,
аспирант,
e-mail: ema@rgups.ru

Zamshina Larisa Leonidovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Electric Machines and Apparatuses»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: ema@rgups.ru

Chekhova Anastasia Alanovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Electric Machines and Apparatuses»,
Postgraduate Student,
e-mail: ema@rgups.ru

В. С. Чаплыгин, В. А. Аксёнов

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ ДЛЯ РАБОТНИКОВ ХОЗЯЙСТВА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Исследована система управления профессиональными рисками в хозяйстве электрификации и электроснабжения. Рассмотрены основные опасные и вредные производственные факторы, воздействующие на работников в отрасли энергетики. Анализ производственного травматизма позволил сделать вывод, что человеческий фактор в большей степени является причиной травмирования работников хозяйства электрификации и электроснабжения и именно его необходимо исследовать с целью формирования достаточных, эффективных мер, направленных на предупреждение травм и аварий в перспективе. Действующая система управления профессиональными рисками не учитывает в должной степени человеческий фактор при оценке рисков. Представлены меры по модернизации системы в части учета человеческого фактора при оценке профессиональных рисков, позволившие значительно повлиять на снижение производственного травматизма.

Ключевые слова: система управления охраной труда, оценка профессиональных рисков, повышенная опасность.

Для цитирования: Чаплыгин, В. С. Анализ используемых инструментов оценки профессиональных рисков для работников хозяйства электрификации и электроснабжения / В. С. Чаплыгин, В. А. Аксёнов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 38–44. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_38.

Введение

Система управления охраной труда на сегодняшний день является неотъемлемой частью трудового процесса работников хозяйства электрификации и электроснабжения [1]. Одним из приоритетных направлений лежит единая структура системы управления профессиональными рисками [2].

Начиная с 2022 года, обязательным требованием для всех работодателей в Российской Федерации стала процедура оценки профессиональных рисков [3, 12].

В рамках риск-ориентированного подхода в подразделениях ОАО «РЖД» оценка рисков проводилась и ранее, но теперь данный инструментарий в области охраны труда получила законодательные обязательства. Выявление профессиональных рисков позволяет своевременно выявлять на рабочих местах различные по уровню ситуации, создающие угрозу для персонала [4], а также сокращает возможные финансовые потери, связанные с травматизмом работников.

Система управления рисками [2] представляет собой структурированный комплекс методов анализа и процедур выявления, оценки, ранжирования, разработки качественных и действенных мер для снижения рисков [5].

В системе управления рисками можно установить ключевые цели:

- повышение компетенции руководства в ведении политики управления подразделением путем определения эффективности и стабильности методов;
- улучшение показателей эффективности компании за счет снижения возможных потерь [6];
- обеспечение безаварийности, безотказности и снижения случаев травматизма на предприятиях (производственных участках) за счет приведения уровня риска к допустимым нормам;
- безопасность взаимодействия людей различных профессий;
- повышение действенности применяемых внутри предприятий систем контроля и аудитов.

Основными направлениями политики Трансэнерго являются уменьшение прогнозируемых рисков при осуществлении трудовых функций, обновление технических устройств и защитных средств, повышающих степень защищенности персонала в условиях повышенной опасности, актуализация нормативно-технической документации, повышение качества и снижение трудоемкости ремонта технических устройств.

Основная часть

Персонал в хозяйстве электроснабжения выполняет работы в условиях повышенной опасности. Трудовые обязанности и характер работы электромонтеров контактной сети, довольно специфичны и сопряжены с дополнительными рисками. Большое количество факторов производственной деятельности оказывают влияние на условия труда.

В ходе выполнения производственных задач для работников, связанных с обслуживанием контактной сети, существует ряд потенциальных опасностей (рисков):

- электрический ток, включая термическое воздействие электрической дуги и ток, обусловленный наличием наведенного напряжения;
- повышенная напряженность электрического и магнитного полей;
- высокое напряжение в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека, наличия на участках переменного тока опасных наведенных напряжений (на отключенных и незаземленных проводах, нейтральных элементах);
- расположение рабочей зоны на высоте 1,8 м и более, а также угроза, связанная с возможным падением работника с высоты;
- падающие с высоты предметы и инструменты;
- движущийся железнодорожный подвижной состав и другие транспортные средства;
- физические перегрузки;
- нервно-психические перегрузки при выполнении работ с ограничением времени на контактной сети, при выполнении работ под напряжением, а также на железнодорожных путях во время движения поездов, выполнении работ при повышенном уровне шума.

Проведенным анализом производственного травматизма за период с 2018 по 2023 год установлено, что 67 % погибших в филиале работников травмированы электрическим током. Наиболее травмоопасным периодом является II квартал, на который приходится 31 % всех допущенных травм и 43 % погибших работников (рис. 1).

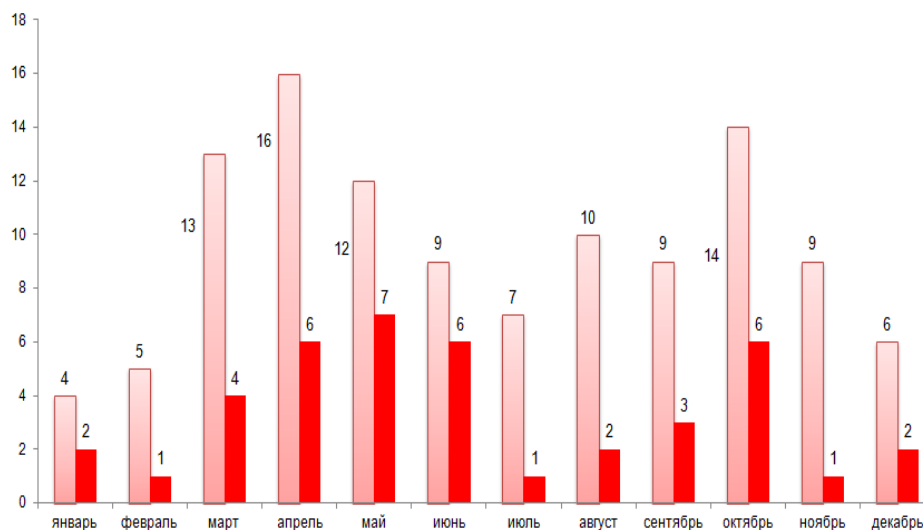


Рис. 1. Анализ травматизма в хозяйстве электрификации и электроснабжения, допущенного за период с 2018 по 2023 год

Основными причинами несчастных случаев, допущенных за период с 2018 по 2023 год в хозяйстве электрификации и электроснабжения, явились неудовлетворительный уровень организации и непосредственного контроля производства работ; нарушения технологии выполнения работ; трудовой и производственной дисциплины; невыполнение организационных и технических мероприятий при подготовке рабочего места в требуемом объеме и расширение места работы.

При выполнении работы в выходные, праздничные дни в указанный период травмированы 27 работников, из них 13 (48 % от всех смертельно травмированных работников) – погибли, следовательно, данные условия работы являются дополнительными факторами риска и требуют повышенного внимания при их организации (рис. 2).

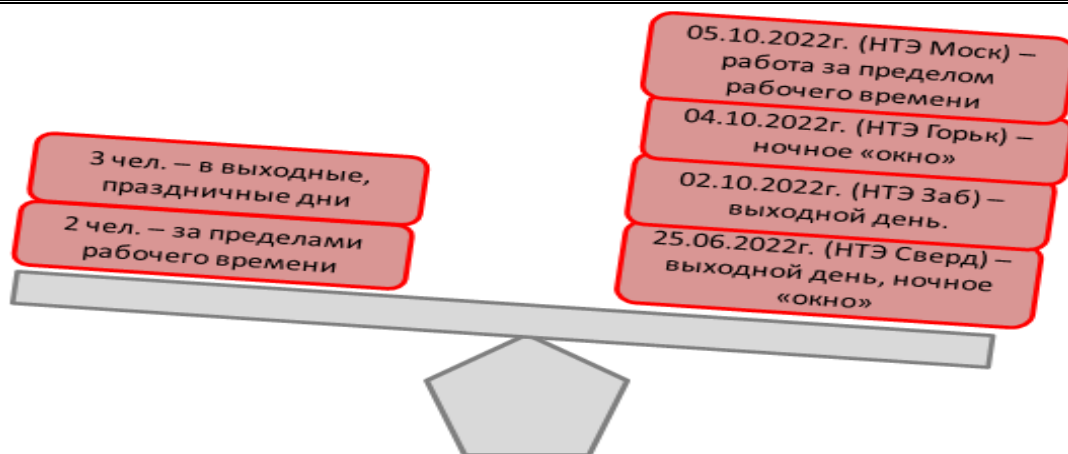


Рис. 2. Дополнительные факторы риска, влияющие на уровень травматизма работников хозяйства электрификации и электроснабжения

Проведенным анализом установлено, что (78 %) работников, смертельно травмированных в период с 2020 по 2023 год, на момент заключения трудового договора отсутствовало профильное (электротехническое) образование: 3 работника имели среднее полное (общее образование), 3 – начальное профессиональное (тракторист, водитель, автомеханик), 5 – среднее профессиональное (сварщик, механизатор, машинист крана), 3 – высшее образование (менеджер, инженер ЭВМ). Это является непосредственным доказательством того, что качеству приема на работу, подготовки, повышения квалификации и обучению персонала необходимо уделять повышенное внимание.

Вопросам профессионального обучения, квалификации персонала в Трансэнерго предъявляются повышенные требования, так как технология выполнения работ на объектах Трансэнерго связана с наличием трех опасных факторов: высоты, электрического напряжения, опасности наезда подвижного состава, также присутствует фактор эмоциональной напряженности труда из-за выполнения работы в ограниченный период времени.

Кроме плановой подготовки, переподготовки, повышения квалификации, для электротехнического персонала в Трансэнерго организовано профессиональное обучение в рамках технической учебы [7, 8].

В хозяйстве электрификации и электроснабжения применяется мультифункциональный набор методов и инструментов управления рисками с различной степенью детализации, которые применимы для планирования, с горизонтом на год и более, а также для формирования мероприятий, направленных на предупреждение травм и аварий в перспективе.

При выборе метода оценки уровня профессиональных рисков [9] в хозяйстве электрификации и электроснабжения учитывались различные факторы, в том числе доступность ресурсов, характер и степень неопределенности данных и информации. Модель процесса управления профессиональными рисками представлена на рис. 3.

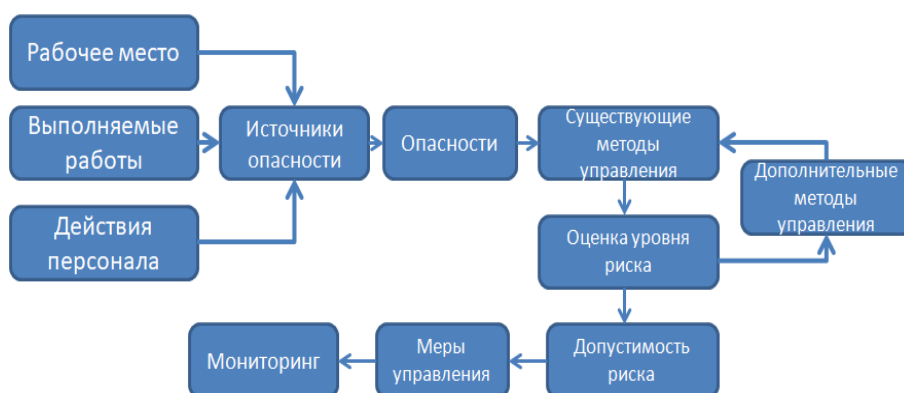


Рис. 3. Модель процесса управления профессиональными рисками

Определение и оценка профессиональных рисков в хозяйстве электрификации осуществляется матричным методом [10–12] и включает в себя механизм оценивания рисков, состоящий из следующих процедур:

- количественная оценка профессиональных рисков (исходными данными являются статистика причин и количество травм);
- экспертная оценка профессиональных рисков (для подразделений, с нулевым травматизмом);
- интегральная оценка профессиональных рисков, проводимая по результатам количественной и экспертной оценок.

Результатом оценки является матрица, с наложенными на нее координатами.

Матрица оценки рисков для наиболее травмоопасной группы профессий представлена на рис. 4.

Событие		Оценка количества травм за период в год	Уровень риска			
			Легкие травмы	Тяжелые травмы	Смертельные травмы	Грозный случай
Частое	Групповые травмы	более 3,30				
	Смертельные травмы	более 3,13				
	Тяжелые травмы	более 14,31				
Вероятное	Групповые травмы	от 3,90 до 5,30				
	Смертельные травмы	от 6,83 до 9,11				
	Тяжелые травмы	от 10,73 до 14,31				
Случайное	Групповые травмы	от 2,60 до 3,90				
	Смертельные травмы	от 4,55 до 6,83			Поражение током	
	Тяжелые травмы	от 7,28 до 10,73				
Редкое	Групповые травмы	от 12,03 до 17,24				
	Смертельные травмы	от 1,30 до 2,00				
	Тяжелые травмы	от 2,28 до 4,55				
Крайне редкое	Групповые травмы	от 3,58 до 7,15				
	Смертельные травмы	от 6,83 до 12,03				
	Тяжелые травмы	менее 1,30				Удар, придавливание, наезд, удар, зажатие
	Легкие травмы	менее 2,28				Поражение током Воздействие разряда Падение с высоты ДТП
Крайне редкое	Смертельные травмы	менее 2,28				Падение с высоты Удар, придавливание, наезд, удар, зажатие Поражение током Воздействие разряда Падение с высоты ДТП
	Тяжелые травмы	менее 3,58				ДТП Падение с высоты Удар, придавливание, наезд, удар, зажатие Поражение током Воздействие разряда Падение с высоты ДТП
	Легкие травмы	менее 6,83				ДТП Падение с высоты Удар, придавливание, наезд, удар, зажатие Поражение током Воздействие разряда Падение с высоты ДТП
Уровень риска			Средний	Допустимый	Нежелательный	Критический

Рис. 4. Матрица профессиональных рисков по группе профессий: электромонтер, электромеханик, слесарь по ремонту электрооборудования

По результатам оценки профессиональных рисков, в хозяйстве электрификации и электроснабжения активно осуществляется внедрение организационных и технических мероприятий, современных защитных средств, повышающих степень защищенности персонала в условиях повышенной опасности (рис. 5).

Ликвидация опасных мест, монтаж и ремонт блокировок безопасности, замена деревянных опор, усиление контура заземления силовых опор, оснащение учебно-тренировочных полигонов и другие организационно-технические мероприятия направлены на снижение травматизма и других негативных последствий в области электроэнергетики.



Рис. 5. Технические мероприятия по охране труда Трансэнерго, направленные на снижение производственного травматизма

Наряду с тем, из-за наличия физических и нервно-психических перегрузок у работников филиала Трансэнерго, действия различных вредных и опасных факторов, большую роль играют мероприятия по выявлению персонала с неустойчивым психическим состоянием в стрессовых ситуациях выполнения работы, оптимальной расстановке кадров с учетом профессионально важных качеств, созданию устойчивого психологического климата в коллективе, в том числе повышения качества условий труда.

Выводы

Действующая в Трансэнерго оценка профессиональных рисков не в полной мере учитывает риски влияния человеческого фактора на производственный процесс работников хозяйства электрификации и электроснабжения.

Для получения полного объема информации о рисках, влияющих на безопасность труда, существует необходимость проводить подробный анализ, по каждому вероятному риску, в том числе и действиям персонала в ходе производственного процесса. Это позволит создать более контролируемые сложные решения, которые не может установить анализ затрат и выгод.

Проведенное исследование указывает на необходимость модернизации системы оценки профессиональных рисков в хозяйстве электрификации и электроснабжения, в части выявления опасных действий работников, влияющих на возникновение аварий и травм на производстве.

Для сокращения негативного влияния человеческого фактора при производственных и эксплуатационных отказах, необходимо сформировать систематизированный, задокументированный подход по оценке и управлению человеческим фактором по всей иерархии выполняемых работ. Эффективным решением по снижению риска наступления нежелательных и недопустимых инцидентов является реализация следующих задач:

- разработка методики оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения;
- внедрение мер, направленных на приведение поведенческих реакций работников к параметрам, необходимым для обеспечения безопасности труда;
- формирование алгоритма определения оценки соответствия фактических параметров требуемым характеристикам человеческого фактора;
- разработка методов оценки качеств и компетенций работников в производственных участках, с учетом их трудовых функций.

Список литературы

- 1 Статья 217 Трудового кодекса Российской Федерации // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2002. – № 1, ст. 3; 2021. – № 21, ст. 5139.
- 2 **ГОСТ Р 12.0.010-2009.** Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков : утвержден и введен в действие приказом Ростехрегулирования от 10 декабря 2009 г. N 680-ст. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 19 с.
- 3 Статья 218 Трудового кодекса Российской Федерации // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2002. – № 1, ст. 3. – 2021. – № 21, ст. 5139.
- 4 Управление профессиональными рисками и методика их оценки : сборник трудов молодых ученых и специалистов транспортной отрасли // Современные подходы к обеспечению гигиенической, санитарно-эпидемиологической и экологической безопасности на железнодорожном транспорте. – Москва, 2019. – 237 с. – ISBN 978-5-907090-56-9.
- 5 **Федорец, А. Г.** Методы анализа рисков в техносфере / А. Г. Федорец // Менеджмент техносферной безопасности : учебное издание. – Москва : АНО «ИБТ», 2016. – С. 596. – ISBN 978-5-905531-03-3.

References

- 1 Article 217 of the Labor Code of the Russian Federation // Collection of Legislation of the Russian Federation. – 2002. – No. 1, Article 3; 2021. – No. 21, Article 5139.
- 2 **GOST R 12.0.010-2009.** National Standard of the Russian Federation. The system of occupational safety standards. Occupational health and safety management systems. Hazard identification and risk assessment : approved and put into effect by the Order of Rostec Regulation dated December 10, 2009 N 680-art. – Moscow : Standartinform, 2011. – 19 p.
- 3 Article 218 of the Labor Code of the Russian Federation (Collection of Legislation of the Russian Federation, 2002, N 1, Article 3; 2021, N 21, Article 5139). – 19 p.
- 4 Management of occupational risks and methods of their assessment : collection of works of young scientists and specialists of the transport industry // Modern approaches to ensuring hygienic, sanitary-epidemiological and environmental safety in railway transport. – Moscow, 2019. – 237 p. – ISBN 978-5-907090-56-9.
- 5 **Fedorets, A. G.** Methods of risk analysis in the technosphere / A. G. Fedorets // Technosphere Safety Management : educational publication. – Moscow : ANO "IBT", 2016. – P. 596. – ISBN 978-5-905531-03-3.

6 Экономическая эффективность технических решений: учебное пособие / С. Г. Баранчикова, Т. Е. Дашкова, И. В. Ершова [и др.] ; Уральский университет, 2016. – 140 с. – ISBN 978-5-7996-1835-3.

7 Техническое обучение как сервис / Д. В. Ефанов, Д. Г. Плотников, Г. В. Осадчий, В. В. Хорошев // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 5. – С. 46–49. – ISSN 1994-831X.

8 Техническая учеба – путь повышения квалификации / Т. А. Филюшкина // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 11. – С. 14–15. – ISSN 0005-2329.

9 **ГОСТ Р 58771-2019.** Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Технологии оценки риска : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства от 17 декабря 2019 г. N 1405-ст. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 90 с.

10 **ГОСТ 12.0.230.5-2018.** Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ : принят и введен в действие от 1 июня 2019 г. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 23 с.

11 **ГОСТ Р МЭК 31010-2021.** Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Методы оценки риска : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 сентября 2021 г. N 1011-ст. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 29 с.

12 **Кузнецова, Д. А.** Сравнительный анализ методов оценки риска / Д. А. Кузнецова // XI век : итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – № 3(59). – С. 154–158. – ISSN 2221-951X.

6 Economic efficiency of technical solutions: textbook / S. G. Baranchikova, T. E. Dashkova, I. V. Ershova [et al.] ; Ural University, 2016. – 140 p. – ISBN 978-5-7996-1835-3.

7 Technical training as a service / D. V. Efanov, D. G. Plotnikov, G. V. Osadchy, V. V. Khoroshev // Transport of the Russian Federation. – 2018. – No. 5. – P. 46–49. – ISSN 1994-831X.

8 Technical studies – the path of advanced training / T. A. Filyushkina // Automation, communications, informatics. – 2011. – No. 11. – P. 14–15. – ISSN 0005-2329.

9 **GOST R 58771-2019.** National Standard of the Russian Federation. Risk management. Risk assessment technologies: approved and put into effect by Order of the Federal Agency dated December 17, 2019 N 1405-art. – Moscow : Standartinform, 2020. – 90 p.

10 **GOST 12.0.230.5-2018.** Interstate standard. The system of occupational safety standards. Occupational health and safety management systems. Risk assessment methods to ensure the safety of work : adopted and put into effect on June 1, 2019 – Moscow : Standartinform, 2019. – 23 p.

11 **GOST R IEC 31010-2021.** National Standard of the Russian Federation. Reliability in technology. Risk assessment methods : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 24, 2021 N 1011-art. – Moscow : Standartinform, 2019. – 29 p.

12 **Kuznetsova, D. A.** Comparative analysis of risk assessment methods / D. A. Kuznetsova // XI century : results of the past and problems of the present plus. – 2022. – No. 3(59). – P. 154–158. – ISSN 2221-951X.

V. S. Chaplygin, V. A. Aksenov

ANALYSIS OF THE TOOLS USED TO ASSESS OCCUPATIONAL RISKS FOR EMPLOYEES OF THE ELECTRIFICATION AND POWER SUPPLY FACILITIES

Abstract. This paper is devoted to the study of the occupational risk management system in the electrification and power supply sector. The main dangerous and harmful production factors affecting workers in the energy industry are considered. The analysis of industrial injuries allowed us to conclude that the human factor is to a greater extent the cause of injury to workers of the electrification and power supply facilities and it is necessary to investigate it in order to form sufficient, effective measures aimed at preventing injuries and accidents in the future. The current professional risk management system does not adequately take into account the human factor when assessing risks. The paper presents measures to modernize the system in terms of taking into account the human factor in the assessment of occupational risks, which made it possible to significantly affect the reduction of occupational injuries.

Keywords: occupational safety management system; occupational risk assessment, increased danger.

For citation: Chaplygin, V. S. Analysis of the tools used to assess occupational risks for employees of the electrification and Power Supply Economy / V. S. Chaplygin, V. A. Aksenov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 38–44. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_38.

Сведения об авторах

Чаплыгин Владимир Сергеевич

Российский университет транспорта (РУТ МИИТ),
кафедра «Техносферная безопасность»,
аспирант,

ОАО «РЖД»,
главный специалист Департамента экологии и
техносферной безопасности,
e-mail: waxchaplygin@mosk.ru

Аксёнов Владимир Алексеевич

Российский университет транспорта (РУТ
МИИТ),
кафедра «Техносферная безопасность»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

Information about the authors

Chaplygin Vladimir Sergeevich

Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Technosphere Safety»,
Postgraduate Student,

JSC "Russian Railways",
Chief Specialist of the Ecology and
Technosphere Safety Department,
e-mail: waxchaplygin@mosk.ru

Aksenov Vladimir Alekseevich

Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Technosphere Safety»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Department,
e-mail: vl.aksenov@yandex.ru

С. Г. Шантаренко, С. В. Савинкин

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ КОНЦЕВЫХ ВИТКОВ ПРУЖИН КУЗОВНОГО РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ЛОКОМОТИВА НА ПАРАМЕТРЫ УПРУГОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ СВЯЗИ КУЗОВА С ТЕЛЕЖКОЙ

Аннотация. Рассмотрены внутренние силовые факторы, возникающие в поперечном сечении рабочего витка кузовной пружины при воздействии на нее вертикальной динамической нагрузки. Проанализировано их влияние на распределение нагрузки по осям колесных пар, а также на параметры упругой поперечной связи тележки с кузовом. Приведен и обоснован рациональный вариант установки кузовных пружин с точки зрения уравнивания внутренних силовых факторов и обеспечения благоприятного вписывания тележки локомотива в кривые участки пути.

С использованием критериального подхода при движении двухтележного симметричного локомотива в кривом участке пути рассмотрено влияние вариантов расположения концевых витков кузовных пружин на боковую силу, воздействующую на колесную пару и являющуюся основным фактором износа гребней бандажей.

Ключевые слова: кузовное подвешивание, поперечная связь, кузовная пружина, рабочий виток, момент изгиба, момент кручения, концевой виток, боковая сила.

Для цитирования: Шантаренко, С. Г. Влияние расположения концевых витков пружин кузовного рессорного подвешивания локомотива на параметры упругой поперечной связи кузова с тележкой / С. Г. Шантаренко, С. В. Савинкин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 45–50. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_45.

В последнее время в рессорном подвешивании тягового подвижного состава применяются компоновочные решения, использование которых связано с работой пружин на поперечные (сдвигающие) нагрузки. Примером может служить используемое на электровозах серии 2ЭС6 кузовное подвешивание, выполненное через четыре пружины типа «flexicoil» на каждой тележке (по две с каждой стороны), установленные с ориентированными наружу тележки концевыми витками на направляющие нижние чаши, вставленные в фиксирующие кольца на боковинах рамы тележки и связанные с рамой кузова через верхние стаканы, закрепленные на приваренных к раме бонках болтами, которые зафиксированы от отвинчивания стопорной планкой. Тележки связаны с кузовом через пружины типа «flexicoil», упоры-ограничители и наклонные тяги [1, 2].

Связи кузова с рамой тележки предназначены для передачи всех видов усилий между рамой кузова и тележкой. Поворот тележки относительно кузова в кривых участках пути вызывает поперечную деформацию концевых витков пружин, при этом на тележку действует возвращающий момент [1, 2].

Изменение регламентированного положения концевых витков пружин снижает возвращающий момент от поперечной деформации пружин, действующий на тележку, что, в свою очередь, негативно влияет на параметры упругой поперечной связи кузова с тележкой при вписывании локомотива в кривые участки пути, способствует перекосу кузова относительно рамы тележки и вызывает неравномерное распределение вертикальных нагрузок по осям колесных пар.

В период эксплуатации не исключены случайные изменения заданного положения концевых витков пружин при их монтаже и в процессе работы локомотива из-за поворота пружин вокруг своей вертикальной оси относительно направляющей нижней чаши тележки.

Характерные следы смещения опорных поверхностей пружин при их неправильной установке (концевые витки были ориентированы внутрь рамы тележки) представлены на рис. 1.



Рис. 1. Следы взаимодействия и смещения кузовной пружины на нижней чаше тележки

Происходит это из-за того, что при динамическом взаимодействии колесной пары с рельсом пружины испытывают деформации растяжения, сжатия, изгиба и кручения, обусловленные их назначением и конструктивными особенностями [3]. При этом возможны комбинации этих деформаций в зависимости от условий эксплуатации (кривые участки пути) и режимов ведения поезда (начало движения, разгон, торможение).

Под воздействием вертикальной силы F , определяемой массой кузова локомотива, которая с учётом коэффициента динамики [4, 5] может составлять 83 кН, в поперечном сечении рабочего витка пружины возникают внутренние силовые факторы: продольная F_1 и поперечная F_2 силы, изгибающий $M_{и}$ и крутящий $M_{к}$ моменты (рис. 2).

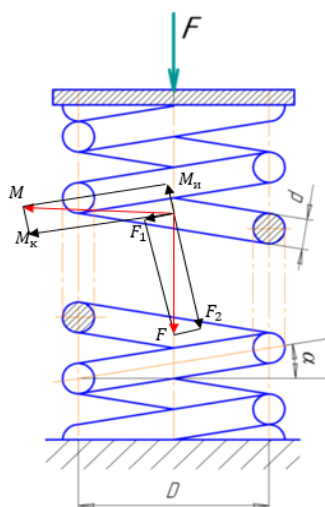


Рис. 2. Расчётная схема силовых факторов в рабочем витке кузовной пружины

Усилия, действующие в любом поперечном сечении рабочего витка пружины, сводятся к моменту \vec{M} , являющемуся суммой векторов $\vec{M}_{и}$ и $\vec{M}_{к}$, величина которого определяется как

$$M = FD/2, \quad (1)$$

где F – вертикальная сила, определяемая массой кузова локомотива, приходящаяся на одну пружину, кН; D – средний диаметр пружины, м.

С учетом угла подъёма витка α получим $F_1 = F \sin \alpha$, $F_2 = F \cos \alpha$, $M_{и} = \frac{FD}{2} \sin \alpha$, $M_{к} = \frac{FD}{2} \cos \alpha$.

Следует отметить, что продольная сила и момент от деформации кручения, возникающие в поперечном сечении рабочих витков, будут совпадать с направлением навивки пружины.

Для $\alpha = 14^\circ$, расчётной статической вертикальной нагрузки $F = 66,2$ кН и $D = 0,197$ м получаем: $F_1 = 15,9$ кН, $F_2 = 63,9$ кН, $M_{и} = 1,6$ кН·м, $M_{к} = 6,3$ кН·м.

Следовательно, при воздействии на пружину только одной вертикальной силы (статическая нагрузка) от массы кузова локомотива в поперечном сечении каждого рабочего витка пружины возникают: продольная сила, действующая вдоль прутка, поперечная сила, изгибающий момент и момент кручения, величины которых зависят от значения угла подъема витка α , диаметра прутка пружины d , среднего диаметра пружины D и вертикальной силы, действующей на пружину, причём направление вектора момента кручения совпадает с направлением навивки пружины.

Для обеспечения благоприятного вписывания тележки в кривые участки пути необходимо уравновесить моменты кручения, возникающие в поперечном сечении рабочих витков каждой из четырех пружин комплекта кузовного подвешивания.

Условие равновесия для комплекта кузовных пружин одной тележки определяется уравнением

$$\vec{M}_{к1} + \vec{M}_{к2} + \vec{M}_{к3} + \vec{M}_{к4} = 0, \quad (2)$$

где $\vec{M}_{к1}$, $\vec{M}_{к2}$, $\vec{M}_{к3}$, $\vec{M}_{к4}$ – векторы моментов кручения соответствующих пружин, кН·м.

С учетом правой навивки всех четырех пружин и их конструктивных особенностей условие равновесия будет выполнено при симметричном расположении точек крайних рабочих витков, продолжением которых являются концевые витки.

Такая симметрия достигается лишь в одном случае, когда кузовные пружины по боковинам рамы тележки установлены концевыми витками наружу.

Следует отметить, что величиной момента изгиба можно пренебречь ввиду небольшого угла навивки [6]. Действительно, в нашем случае при статической вертикальной нагрузке 66,2 кН, $M_{и} = 1,6$ кН м, что оказывает незначительное влияние на статический прогиб пружин по сторонам тележки.

Особое внимание необходимо уделить моменту кручения, который превышает момент изгиба в четыре раза.

Особенность конструкции пружин типа «flexicoil» заключается в их поперечной жесткости, которая в пять раз меньше продольной, что, в свою очередь, оказывает благоприятное влияние на вписывание тележки в кривые участки пути, не препятствуя ее повороту. В свою очередь, не уравновешенные внутренние моменты кручения рабочих витков пружинного комплекта изменяют (ухудшают) параметры упругой поперечной связи кузовного подвешивания локомотива.

На рис. 3 представлены варианты расположения концевых витков пружин кузовного подвешивания.

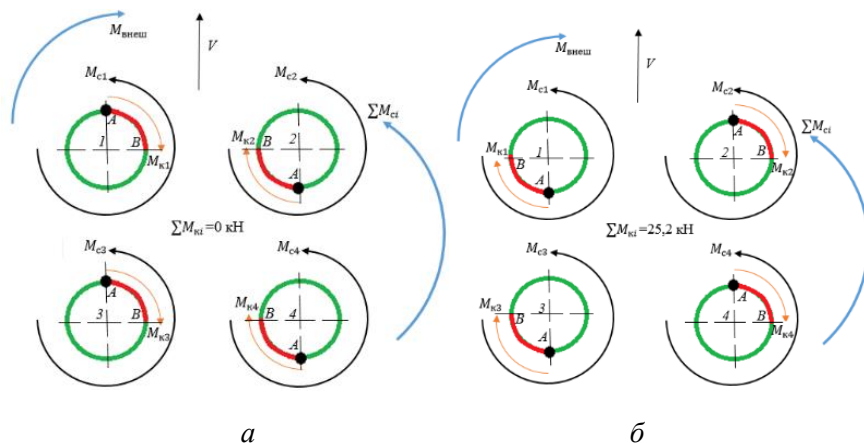


Рис. 3. Варианты расположения концевых витков кузовных пружин:

- а* – расположение концевых витков наружу рамы тележки;
- б* – расположение концевых витков внутрь рамы тележки

Длина окружности опорной поверхности концевой витка равна 3/4 длины окружности рабочего витка (линия зеленого цвета) [7]. Точка A – окончание концевой витка, B – окончание рабочего витка. Момент кручения $M_{ки}$ в дуге AB возникает от воздействия вертикальной силы и направлен по часовой стрелке (правая навивка пружины). При вписывании тележки в кривую на гребень бандажа колесной пары воздействует боковая сила, создающая момент поворота $M_{внеш}$. За счёт поперечного перемещения концевых витков в пружинном комплекте на тележку действует суммарный возвращающий момент $\Sigma M_{ci} = 11,75$ кН·м/град [2], направленный противоположно моменту поворота $M_{внеш}$.

Для исключения воздействия внутренних моментов кручения пружин M_{ki} , оказывающих значительное влияние на параметры упругой поперечной связи кузовного подвешивания, необходимо подобрать положение точки A таким образом, чтобы векторы \vec{M}_{ki} в дуге AB были направлены навстречу друг другу относительно боковин рам тележки. Этого можно достичь только в одном случае, когда концевые витки расположены наружу боковин рам тележек (см. вариант на рис. 3, *a*). В любом другом положении концевых витков пружин это условие не выполняется и моменты кручения пружин \vec{M}_{ki} сонаправлены, более того, в пружинном комплекте суммарный момент кручения $\sum M_{ki}$ совпадает с направлением момента поворота тележки $M_{внеш}$, что способствует перекосу тележки в кривой и значительным силовым воздействиям в пятне контакта колеса с рельсом.

Таким образом, внутренние силовые факторы в прутке пружины, возникающие при действии вертикальной статической нагрузки, оказывают значительное влияние на параметры упругой поперечной связи кузовного подвешивания. Для уравнивания моментов кручения в рабочих витках пружин типа «flexicoil» с правой навивкой, применяемых на электровозах серии 2ЭС6, возможен только один вариант их расположения – концевыми витками наружу рамы тележки.

Используя критериальный подход движения двухтележного симметричного локомотива в кривом участке пути [8], выполним оценку влияния сопротивления повороту тележки со стороны кузова на боковую силу F_b , действующую на колесную пару в кривой и являющуюся основополагающим фактором износа гребня бандажа:

$$F_b = P \cdot 0,42 \left(\frac{\mu_{тр}}{\mu_0}\right)^{0,8} \cdot K_1^{3 \cdot \left(\frac{\mu_0}{\mu_{тр}}\right)^{0,55}} \cdot K_2^{0,8} \cdot n_0^{0,75} \cdot \left(\frac{a_T}{2s}\right)^{-0,15}, \quad (3)$$

где P – нагрузка от колеса на рельс, кН; $\mu_{тр}$ – коэффициент трения в паре «колесо – рельс»; μ_0 – базовое значение коэффициента трения в контакте бандажей с рельсами; $K_1 = 1 + \frac{v^2}{(g \cdot R)} - \frac{h}{s}$ – критерий непогащенного поперечного ускорения; v – скорость движения локомотива, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; R – радиус кривой, м; h – возвышение наружного рельса над внутренним, м; $2s$ – расстояние между кругами катания колес, м; $K_2 = 1 + \frac{(M_{п} + M_{y})}{P \cdot 2a_T}$ – критерий сопротивления повороту тележки со стороны кузова; $M_{п} = \sum M_{ci} + \sum M_{ki}$ – момент упругих сил кузовных пружин, кН·м; M_{y} – момент упругих сил упоров-ограничителей поперечных перемещений тележки, кН·м; $2a_T$ – база тележки, м; n_0 – число осей в тележке.

Исходные данные представлены в таблице.

Исходные данные для расчета

Параметр	Значение	Размерность	Параметр	Значение	Размерность
P	122,5	кН	$2s$	1,58	м
$\mu_{тр}$	0,17		R	600	м
μ_0	0,25		$\sum M_{ci}$	11,75	кН·м/град
v	16,7	м/с	M_y	0	кН·м
g	9,81	м/с ²	$2a_T$	3	м
h	0,1	м	n_0	2	

Рассмотрим движение локомотива со скоростью 60 км/ч в кривой радиуса 600 м при повороте тележки на 2° относительно полюса поворота для двух вариантов расположения концевых витков кузовных пружин (см. рис. 3, *a*, *б*).

Для варианта схемы на рис. 3, *a* (суммарный момент комплекта кузовных пружин $\sum M_{ki}$ равен нулю) по формуле (3) получаем $F_b = 63$ кН; при установке пружин по схеме на рис. 3, *б* (суммарный момент комплекта кузовных пружин $\sum M_{ki}$ равен 25,2 кН·м) – $F_b = 67$ кН. По схеме на рис. 3, *б* сопротивляемость тележки повороту увеличилась на 25,2 кН·м, а боковая сила F_b – на 6 %.

В результате проведенных теоретических исследований установлено, что при воздействии на каждую из четырех пружин кузовного подвешивания вертикальной статической нагрузкой 66,2 кН суммарный момент кручения комплекта пружин $\sum M_{ki}$ может изменяться от нуля до 25,2 кН·м в зависимости от ориентации концевых витков относительно рамы тележки, что в свою очередь, при прочих равных условиях, приводит к увеличению на 6 % боковой силы при взаимодействии гребня колеса с рельсом.

Таким образом, только за счёт рациональной установки пружин кузовного подвешивания в соответствии с вариантом схемы на рис. 3, *a* можно уменьшить боковую силу на 6 %, тем самым создать более благоприятные условия для вписывания тележки в кривые участки пути, что будет способствовать снижению износа гребней бандажей колесных пар.

Список литературы

- 1 Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Часть 9. Техническое обслуживание. Текущий ремонт. 2ЭС6.00.000.00 РЭ8. – Екатеринбург : Издательство ООО «Уральские локомотивы», 2016. – 482 с.
- 2 Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Часть 6. Механическая часть. 2ЭС6.00.000.00 РЭ5. – Екатеринбург : Издательство ООО «Уральские локомотивы», 2011. – 97 с.
- 3 **ГОСТ 34628–2019.** Пружины и комплекты пружинные рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Методы расчёта на прочность при действии продольных и комбинированных нагрузок : введен 2020-09-01. – Москва : Издательство стандартов, 2020. – 24 с.
- 4 **ГОСТ Р 55513–2013.** Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам : введен 2014-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 46 с.
- 5 Механическая часть электрического подвижного состава : учебное пособие / И. В. Волков [и др.]. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2007. – 92 с.
- 6 **Козловский, А. Э.** Расчёт элементов конструкции на сдвиг и кручение : учебное пособие / А. Э. Козловский. – Иваново : Издательство Ивановского государственного химико-технологического университета, 2016. – 100 с.
- 7 **ГОСТ 13765–86.** Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Обозначение параметров, методика определения размеров : введен 1988-07-01. – Москва : Издательство стандартов, 1988. – 15 с.
- 8 **Евенко, В. В.** Критериальные уравнения движения локомотивов в кривых участках пути / В. В. Евенко // Вестник ВНИИЖТа. – 1976. – № 4. – С. 26–31.

References

- 1 Freight DC electric locomotive 2ES6 with collector traction motors. Manual. Part 9. Maintenance. Current repair. 2ES6.00.000.00 RE8. – Yekaterinburg : Publishing house of LLC «Ural locomotives», 2016. – 482 p.
- 2 Freight direct current electric locomotive 2ES6 with collector traction motors. Manual. Part 6. Mechanical part. 2ES6.00.000.00 RE5. – Yekaterinburg : Publishing house – in LLC «Ural locomotives», 2011. – 97 p.
- 3 **GOST 34628–2019.** Springs and spring sets for suspension of railway rolling stock. Methods for calculating strength under the action of longitudinal and combined loads : introduction 2020-09-01. – Moscow : Standards Publishing House, 2020. – 24 p.
- 4 **GOST R 55513–2013.** Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities : implemented. 2014-07-01. – Moscow : Standartinform, 2013. – 46 p.
- 5 Mechanical part of electric rolling stock : textbook / I. V. Volkov [et al.]. – Rostov-on-Don : RSTU, 2007. – 92 p.
- 6 **Kozlovsky, A. E.** Calculation of structural elements for shear and torsion : textbook / A. E. Kozlovsky. – Ivanovo : Publishing house of the Ivanovo State Chemical-Technological University, 2016. – 100 p.
- 7 **GOST 13765–86.** Helical cylindrical compression and tension springs made of steel of round section. Designation of parameters, method of sizing : implemented 1988-07-01. – Moscow : Publishing house – in standards, 1988. – 15 p.
- 8 **Evenenko, V. V.** Criterial equations of motion of locomotives in curved sections of the track / V. V. Evenko // Bulletin of VNIIZhT. – 1976. – No. 4. – P. 26–31.

S. G. Shantarenko, S. V. Savinkin

INFLUENCE OF THE LOCATION OF THE END COILS OF THE SPRINGS BODY SPRING SUSPENSION OF THE LOCOMOTIVE ON THE PARAMETERS OF ELASTIC TRANSVERSAL COUPLING BODY WITH BOGIE

Abstract. The paper considers the internal force factors that arise in the cross section of the working coil of the body spring when exposed to a vertical dynamic load. It is analyzed their influence on the distribution of the load along the axles of the wheel sets, as well as on the parameters of the elastic transverse connection of the bogie with the body. A rational option

for installing body springs is presented and substantiated in terms of balancing internal force factors and ensuring favorable fitting of the locomotive bogie into curved sections of the track.

Using the criteria approach when a two-bogie symmetrical locomotive moves in a curved section of the track, the article examines the influence of options for the location of the end coils of body springs on the lateral force acting on the wheelset and being the main factor in the wear of the tire ridges.

Keywords: body suspension, cross link, body spring, working coil, bending moment, torsion moment, end coil, lateral force.

For citation: Shantarenko, S. G Influence of the location of the end coils of the springs body spring suspension of the locomotive on the parameters of elastic transversal coupling body with bogie / S. G. Shantarenko, S. V. Savinkin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 45–50. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_45.

Сведения об авторах

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: nauka@omgups.ru

Савинкин Сергей Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава»,
аспирант,
e-mail: syava-sv@yandex.ru

Information about the authors

Shantarenko Sergey Georgievich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Technologies of Transport Engineering and Rolling Stock Repair»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: nauka@omgups.ru

Savinkin Sergey Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Technologies of Transport Engineering and Rolling Stock Repair»,
Postgraduate Student,
e-mail: syava-sv@yandex.ru

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.131 : 53 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_51

*М. В. Окост***КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ПРИ СООРУЖЕНИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДЛЯ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА В АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ ***

Аннотация. Работа посвящена изучению физико-механических свойств глинистых и песчаных грунтов, использованных при строительстве нового и реконструкции существующего земляного полотна железных дорог по направлению Котельниково – Тихорецкая – Крымская для развития портов в Азово-Черноморском регионе России и построению корреляционных соотношений, полученных по результатам корреляционно-регрессионного анализа свойств грунтов. Такие соотношения могут оказаться востребованными при контроле точности лабораторных испытаний свойств грунтовых материалов и повысить скорость инженерно-геологических изысканий и подборе карьера при дальнейшем развитии дорожной сети в заданном регионе. Кроме того, регрессионные соотношения могут повысить скорость принятия решения о применении определенного вида грунта для восстановления земляного полотна с использованием некоторых характеристик, которые могут быть определены с наименьшими временными затратами.

Ключевые слова: земляное полотно, испытания, классификация грунтов, физико-механические характеристики, регрессионные соотношения.

Для цитирования: Окост, М. В. Корреляционные соотношения физико-механических характеристик грунтов, использованных при сооружении железнодорожного земляного полотна для развития транспортного комплекса в Азово-Черноморском регионе России / М. В. Окост // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 51–72. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_51.

Введение

Земляное полотно является сложным грунтовым инженерным сооружением, которое воспринимает нагрузку поездную и от верхнего строения пути и перераспределяет ее на нижележащие слои. Оно является открытой системой, функционирующей во времени под влиянием факторов природно-климатической среды, таких как атмосферные осадки, температура, ветровые и сейсмические нагрузки и др. Земляное полотно должно обеспечивать долговременную стабильность железнодорожного пути и безопасность движения поездов. Повышение осевых нагрузок, массы поездов и их скорости [1–5] и техногенные факторы, связанные с нарушением процесса технического обслуживания, а также отступлением от технологий строительства и ошибками проектирования, приводят к проявлению деформаций, устранение которых влечет значительное увеличение эксплуатационных расходов на содержание железнодорожного пути [6–8].

Для обеспечения долговременной стабильности пути и безопасности движения поездов в современных условиях интенсификации перевозочного процесса нормативными документами заложены жесткие требования к качеству строительства, реконструкции и ремонта земляного полотна [9–14].

Постановка задачи

Повышение качества строительства железнодорожного пути должно гарантированно обеспечить эксплуатационную надежность объектов транспортной инфраструктуры на весь период жизненного цикла транспортного сооружения. Достижение показателей качества строительства во многом зависит от соответствия характеристик грунтовых материалов требованиям проектной и нормативной документации. На достижение требуемых качественных показателей влияет оперативность получения необходимых физико-механических характеристик грунтов и их расчетных показателей в процессе

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-20005).

подвоза, распределения и уплотнения многослойного грунтового сооружения, а также опыт и квалификация контролирующих специалистов.

Кроме того, можно отметить и некоторые недостатки традиционных лабораторных методов исследования свойств грунтов, которые являются весьма длительными и с невысокой точностью результатов [15], а также их зависимость от квалификации испытателей [16–18].

Вместе с этим проектирование строительства (реконструкции, усиления) линейных железнодорожных объектов включает расчеты и компьютерное моделирование работы таких объектов с определенным шагом вдоль развернутой длины предполагаемого строительства. Исходными данными для моделирования являются свойства грунтов для каждого отдельного объекта земляного полотна. Следовательно, научные подходы, которые позволяют сократить время проектирования за счет снижения времени лабораторных измерений [19] или прогнозирования свойств грунтов на период длительной эксплуатации [20–21], представляются актуальными.

Методология

Целью исследования является определение корреляционных соотношений между физико-механическими свойствами песчаных и глинистых грунтов, из которых было сооружено земляное полотно при строительстве новых или построены вторые пути при реконструкции существующих железнодорожных линий для развития транспортной инфраструктуры Азово-Черноморского региона России. Полученная информация о свойствах грунтовых материалов может оказаться востребованной при определении источников строительных материалов при продолжении работ по развитию транспортных сетей этого региона.

В данной работе задача решалась с использованием результатов определения физико-механических свойств грунтов, определенных традиционными лабораторными методами, которые обычно используются на стадии предпроектных инженерно-геологических изысканий.

Общая развернутая длина между точками отбора образцов грунта составила примерно 530 км, что априори позволяет ожидать широкий спектр свойств исследуемых образцов.

Вид и количество исследований, выполненных в данной работе, приведены в табл. 1 совместно с нормативными документами, согласно которым готовились образцы и выполнялись измерения. Под числом измерений следует понимать число усредненных результатов в сериях из 5–10 измерений, выполненных с грунтами одного керна или кернов, отобранных в непосредственной близости один от другого.

Таблица 1

Характеристики несвязных грунтов, определенные в данной работе

Наименование и обозначение величины	Число измерений		Стандарт
	песчаные	глинистые	
Плотность грунта ρ , г/см ³	–	41	ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик
Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	364	–	
Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	364	41	
Максимальная плотность сухого грунта $\rho_{d\max}$, г/см ³	364	133	ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности
Оптимальная влажность W_{opt} , %	364	133	ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация
Коэффициент пористости e_0 , ед.	364	34	
Коэффициент водонасыщения S_r , д. ед.	43	31	ГОСТ 25100-2020
Коэффициент фильтрации, K_f	43	27	ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации
Естественная влажность W , %.	364	47	ГОСТ 5180-2015
Влажность на границе текучести, W_L , %	–	133	
Влажность на границе раскатывания, W_p , %	–	133	

Окончание табл. 1

Наименование и обозначение величины	Число измерений		Стандарт
	песчаные	глинистые	
Число пластичности, I_p	–	133	ГОСТ 5180-2015
Показатель текучести, I_L	–	47	
Удельное сцепление c , кПа	12	31	ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия, ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза
Угол внутреннего трения φ , град.	12	31	ГОСТ 12248.3-2020, ГОСТ 12248.1-2020, ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия
Модуль крупности M_k , д. ед.	43	–	ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний
Степень неоднородности гранулометрического состава C_u , ед.	43	–	ГОСТ 25100-2020
Глина в комках Гл, %	43	--	ГОСТ 8735-88.
Пылевидные и глинистые частицы $P_{отм}$, %	43	--	ГОСТ 8735-88
Гранулометрический состав грунта	43	71	ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава

Как показал анализ результатов испытаний образцов грунта, отобранных как из карьеров, расположенных вдоль строящегося пути, так и непосредственно из насыпей при строительстве вторых путей по направлению Котельниково – Тихорецкая – Крымская и обхода Краснодарского транспортного узла в период 2017–2019 гг. в качестве материала для сооружения земляного полотна использовались глинистые и песчаные грунты, разновидности которых по типам представлены на рис. 1.

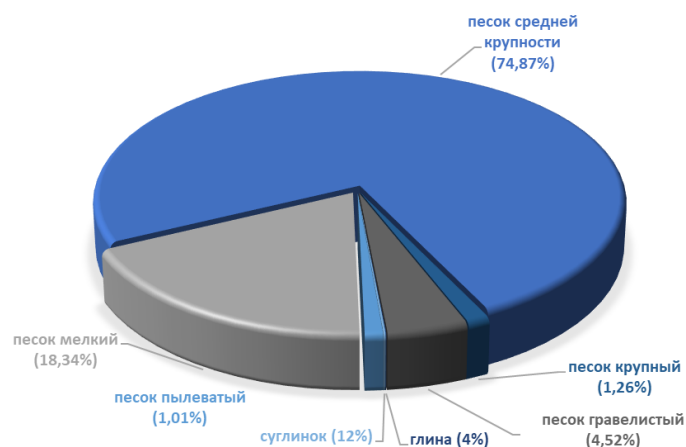


Рис. 1. Разновидности грунтов при строительстве вторых путей по направлению Котельниково – Тихорецкая – Крымская и обхода Краснодарского транспортного узла

Как видно из данных, приведенных на рис. 1, 16 % связных грунтов представлены в основном глинами и суглинками, которые использовались для сооружения основания насыпей и отсыпки нижних слоев земляного полотна. Сами насыпи отсыпались из песков различной крупности и частично из песчано-гравийных смесей. Наименования (по ГОСТ 25100-2020) и объемы используемых песков при строительстве новых путей в Азово-Черноморском регионе России следующие: пылеватый (1,01 %), мелкий (18,34 %), средней крупности (74,87 %), крупный (1,26 %), гравелистый (4,52 %).

Построение корреляционных соотношений для глинистых грунтов

Оптимальная влажность

Зависимость оптимальной влажности изученного глинистого грунта (W_{opt}) от влажности на границе текучести (W_L) приведена на рис. 2. Приведенные значения использованы для построения уравнения линейной регрессии, имеющего в данном случае вид

$$\widehat{W}_{opt} = 0,261 \cdot W_L + 10,29. \quad (1)$$

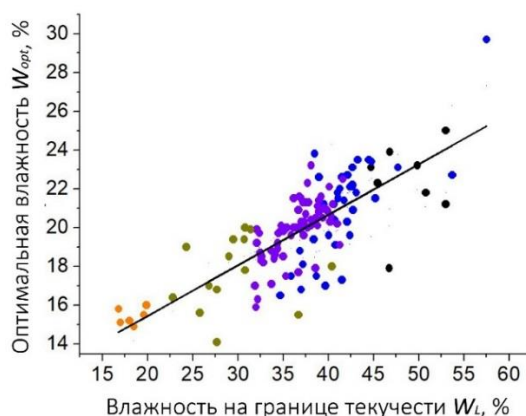


Рис. 2. Зависимость оптимальной влажности (W_{opt}) грунта от его влажности на границе текучести (W_L).

Сплошной черной линией изображена зависимость (1).

Условные обозначения: ● – супеси; ● – суглинки; ● – тяжелые суглинки; ● – глины; ● – тяжелые глины

Применение формулы (1) для аппроксимации результатов измерений приводит к коэффициенту детерминации $R^2 = 0,590$, среднеквадратичному отклонению $RMSE = 1,535$ и средней относительной погрешности $\delta = 6 \%$.

Экспериментальные значения W_{opt} , для которых имеются экспериментальные значения W_L , W_p , e_0 и I_L (табл. 1), были подвергнуты степенному регрессионному преобразованию:

$$\widehat{W}_{opt}(N) = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i W_L^i + c_i W_p^i + d_i e_0^i + e_i I_L^i). \quad (2)$$

Выбор независимых переменных в формуле (2) обусловлен желанием учесть размеры и поверхностные свойства частиц грунтов (W_L , W_p), потенциальную возможность грунта накапливать влагу (e_0), а также превышение естественной влажности W над W_p при уплотнении в естественных условиях (I_L). Результаты расчета коэффициентов регрессии (табл. 2) позволяют заключить, что с увеличением N коэффициент детерминации увеличивается и при $N = 3$ близок к 0,8.

Таблица 2

Коэффициенты регрессионного соотношения (формула (2))

i	a_N	b_i	c_i	d_i	e_i
1	-358,835	-3,847	44,5989	796,3052	0,511
2		0,147	-2,589	-1353,524	-1,404
3		-0,0017	0,0491	764,3705	-1,322
N	1		2		3

Окончание табл. 2

R^2	0,648	0,747	0,794
$RMSE$	1,409	1,193	1,078
$\delta, \%$	6	5	4

Максимальная плотность

Зависимость максимальной плотности ($\rho_{d \max}$) глинистого грунта от его влажности на границе текучести (W_L) приведена на рис. 3. Приведенные значения использованы для построения уравнения линейной регрессии аналогичного (1) и имеющего вид:

$$\hat{\rho}_{d \max} = -0,0049 \cdot W_L + 1,867. \quad (3)$$

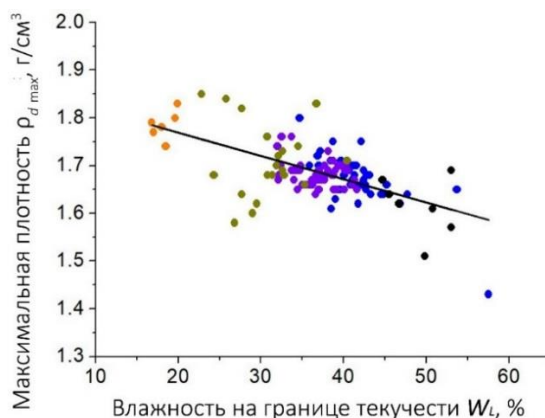


Рис. 3. Зависимость максимальной плотности сухого грунта ($\rho_{d \max}$) от влажности на границе текучести (W_L).

Сплошной черной линией изображена зависимость (3).

Условные обозначения: ● – супеси; ● – суглинки; ● – тяжелые суглинки; ● – глины; ● – тяжелые глины

Применение формулы (3) для аппроксимации результатов измерений приводит к коэффициенту детерминации $R^2 = 0,375$, среднеквадратичной ошибке $RMSE = 0,044$ и средней относительной погрешности $\delta = 2 \%$.

Экспериментальные значения $\rho_{d \max}$, для которых имеются экспериментальные значения W_L , W_p , ρ , ρ_d , e_0 и I_L (табл. 1), были подвергнуты степенному регрессионному преобразованию:

$$\hat{\rho}_{d \max}(N) = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i W_L^i + c_i W_p^i + d_i \rho^i + e_i \rho_d^i + f_i e_0^i + g_i I_L^i). \quad (4)$$

Учтенные независимые переменные в формуле (4) получены добавлением к переменным из формулы (3) плотности в естественном и сухом состояниях образцов. Результаты расчета коэффициентов регрессии (табл. 3) позволяют заключить, что при $N = 2$ коэффициент детерминации превышает 0,95, а достигнутая точность представления сравнима с точностью прямых лабораторных измерений. Дальнейшее повышение степени регрессионного выражения приводит к ошибкам вычисления из-за быстрого роста коэффициентов в формуле (4).

Таблица 3

Коэффициенты регрессионного соотношения (формула (4))

i	a_N	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	g_i
1	0,5793	0,0055	0,0442	-1,7038	2,7387	0,7229	0,0144
2		-0,0002	-0,0011	0,4921	-0,8458	-1,4988	0,0487
N		1			2		
R^2		0,898			0,951		
$RMSE$		0,022			0,015		
$\delta, \%$		1			0,5		

Коэффициент пористости

Зависимость начального коэффициента пористости изученного глинистого грунта (e_0) от плотности сухого грунта (ρ_d) приведена на рис. 4, а. Приведенные значения использованы для построения уравнения простой линейной регрессионной зависимости e_0 от ρ_d , аналогичной формуле (1). Полученные при этом коэффициенты регрессии и коэффициент детерминации сопоставлены с результатами других авторов в табл. 4, из которой видно, что наилучшее согласие полученных результатов наблюдается с результатами работы [22].

Экспериментальные значения e_0 , для которых имеются экспериментальные значения W_L , W_p , ρ_d и W (табл. 1), были подвергнуты степенному регрессионному преобразованию:

$$\hat{e}_0(N) = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i W_L^i + c_i W p^i + d_i \rho_d^i + e_i W^i), \quad (5)$$

где N – показатель степени независимых переменных.

Выбор независимых переменных в формуле (5) обусловлен желанием учесть размеры и поверхностные свойства частиц грунтов (W_L , W_p), объемные свойства частиц грунтов (ρ_d), а также способность накапливать влагу в естественных условиях (W). Результаты расчета коэффициентов регрессии приведены в табл. 4. Они позволяют заключить, что при $N = 2$ коэффициент детерминации близок к 0,7. Результаты регрессионного представления $\hat{e}_0(N)$ (5) сопоставлены с e_0 на рис. 4, а.

Строительство объектов земляного полотна базируется на обязательном лабораторном определении значений оптимальной влажности (W_{opt}) и максимальной плотности ($\rho_{d \max}$), Учет этих характеристики выполнен в формуле (6):

$$\hat{e}_0 = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i W_L^i + c_i W p^i + d_i \rho_{d \max}^i + e_i W_{opt}^i). \quad (6)$$

Приведенные значения использованы для построения уравнения простой линейной регрессионной зависимости e_0 от $\rho_{d \max}$, аналогичной формуле (1). Полученные при этом коэффициенты регрессии и коэффициент детерминации приведены в табл. 4, из которой видно, что переход от ρ_d к $\rho_{d \max}$ приводит к росту коэффициента детерминации от 0,390 до 0,810.

Результаты расчета коэффициентов регрессии (6) приведены в табл. 5, которые позволяют заключить, что при $N = 2$ коэффициент детерминации превышает 0,9. Результаты регрессионного представления $\hat{e}_0(N)$ (6) сопоставлены с e_0 на рис. 4, б.

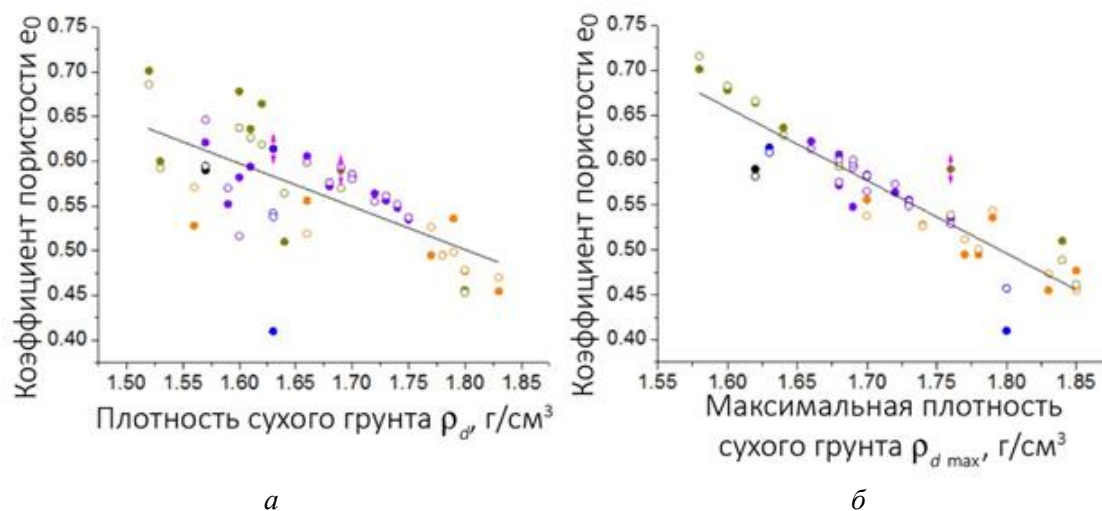


Рис. 4. Зависимость начального коэффициента пористости (e_0) от плотности сухого грунта ρ_d (а) и максимальной плотности сухого грунта $\rho_{d \max}$ (б).

Кружками показаны результаты прямого измерения, окружностями показаны результаты расчета по формулам (5) и (6) при $N = 2$. Сплошной черной линией изображены результаты простой регрессии

Условные обозначения: ● – супеси; ● – суглинки; ● – тяжелые суглинки; ● – глины;

● – тяжелые глины

Таблица 4

Сравнение эмпирических уравнений, аппроксимирующих зависимость $e_0(\rho_d)$

Литературный источник	k	a	R^2	$RMSE$	Тип грунта
[23]	-0,162	3,30	0,9799		Глина
[24]	0,088	-1,964	0,8281		Глина с пластичностью от низкой до высокой
[22]	-0,764	1,990	0,5929	0,076	Глина тяжелая, глина легкая, суглинок тяжелый, суглинок легкий
Проведенные расчеты (рисунок 4А)	-0,481	1,368	0,390	0,050	Супесь, глина тяжелая, глина легкая, суглинок тяжелый, суглинок легкий
Проведенные расчеты (рисунок 4В)	-0,810	1,956	0,810	0,027	Супесь, глина тяжелая, глина легкая, суглинок тяжелый, суглинок легкий

Таблица 5

Коэффициенты регрессионного соотношения формул (5) и (6)

Формула (5)					
i	a	b_i	c_i	d_i	e_i
1	3,6320	-0,0214	0,0212	-3,3160	0,0406
2		0,0003	-0,0002	0,7697	-0,0011
N	1		2		
R^2	0,619		0,670		
$RMSE$	0,040		0,037		
$\delta, \%$	4		4		
Формула (6)					
i	a	b_i	c_i	d_i	e_i
1	4,4738	-0,0007	-0,0030	-4,1771	0,0433
2		-0,0001	0,0002	0,9666	-0,0010
N	1		2		
R^2	0,821		0,922		
$RMSE$	0,027		0,018		
$\delta, \%$	3		2		

Сравнение данных, приведенных в табл. 5, позволяет отметить следующее: характеристики W_{opt} и $\rho_{d \max}$ определяются в лабораторных условиях всегда, поскольку необходимы для организации и контроля качества строительных работ. Их использование в регрессионном соотношении (9) по сравнению с формулой (8) позволяет повысить точность расчета e_0 , необходимого для расчетов в современных моделях грунтов (например, Hardening Soil) при численном моделировании свойств грунтовых конструкций. При этом отпадает необходимость определения W и ρ_d на всех объектах земляного полотна, что ограничивает соответствующие измерения карьерами или пунктами накопления строительных материалов.

Удельное сцепление и угол внутреннего трения

Зависимость удельного сцепления (c) от числа пластичности (I_p) приведена на рис. 5. Приведенные значения использованы для построения уравнения простой линейной регрессии, аналогичного (2) и имеющего в данном случае вид:

$$\hat{c} = 1,588 \cdot I_p + 6,718. \quad (7)$$

Применение формулы (7) для аппроксимации результатов измерений приводит к коэффициенту детерминации $R^2 = 0,732$, среднеквадратичной ошибке $RMSE = 3,553$ и средней относительной погрешности $\delta = 13\%$. Согласно нормативному документу СП 22.13330.2016 «Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» удельное сцепление (c) и угол внутреннего трения (φ) зависят от коэффициента пористости (e) и показателя текучести (I_L) образцов грунта. В связи с этим, экспериментальные значения c , для которых имеются экспериментальные значения I_p , e_0 , I_L , S_r и W (табл. 1) были подвергнуты степенному регрессионному преобразованию:

$$\hat{c}(N) = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i I_p^i + c_i e_0^i + d_i I_L^i + e_i S_r^i + f_i W^i). \quad (8)$$

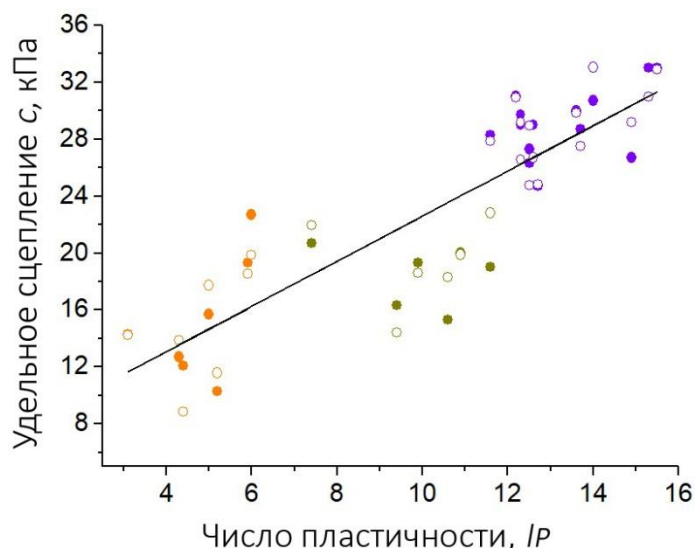


Рис. 5. Зависимость удельного сцепления (c) от числа пластичности (I_p).

Кружками показаны результаты прямого измерения, окружностями показаны результаты расчета по формуле (8) при $N = 3$. Сплошной черной линией изображена зависимость (7).

Условные обозначения: ● – супеси; ● – суглинки; ● – тяжелые суглинки

Выбор независимых переменных в формуле (8) обусловлен желанием учесть классификационные характеристики грунтов (I_p), потенциальную возможность грунта накапливать влагу (e_0), превышение естественной влажности W над W_p при уплотнении в естественных условиях (I_L), а также заполняемость порового пространства (S_r) при достижении влажности (W). Результаты расчета коэффициентов регрессии (табл. 6) позволяют заключить, что при $N = 3$ коэффициент детерминации близок 0,93 и с ростом N наблюдается уменьшение погрешностей более чем 1,5 раза.

Таблица 6

Коэффициенты регрессионного соотношения (формула (8))

i	a	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i
1	-445,863	2,405	2021,794	-1,522	-332,034	31,065
2		-0,070	-3516,190	-6,092	374,641	-1,808
3		0,003	1975,097	5,241	-140,951	0,034
N	1		2		3	
R^2	0,890		0,895		0,928	
$RMSE$	2,304		2,255		1,869	
$\delta, \%$	8		8		8	

Зависимость угла внутреннего трения (φ) от числа пластичности (I_p) приведена на рис. 11. Приведенные значения использованы для построения уравнения простой регрессии вида (2), которая в данном случае имеет вид:

$$\hat{\varphi} = 0,009 \cdot I_p + 22,120. \quad (9)$$

Формула (9) демонстрирует отсутствие корреляции значений угла внутреннего и числа пластичности. Однако в работе [25] такая корреляция обнаружена, хотя и отмечено, что обычно наблюдается большой разброс. Можно предположить, что отсутствие однофакторной линейной корреляции φ от I_p может быть связано с широким спектром характеристик грунтов, изученных в данной работе. Вместе с этим, предложенное в [25] регрессионное выражение можно использовать для оценки минимального угла внутреннего трения исследованных в данной работе грунтов при замене численных коэффициентов. Соответствующее уравнение регрессии примет вид:

$$\hat{\varphi} = 24 - 4 \cdot \text{Log}(I_p). \quad (10)$$

Применение для регрессионного анализа формулы вида (10):

$$\hat{\varphi}(N) = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i I_p^i + c_i e_0^i + d_i I_L^i + e_i S_r^i + f_i W^i) \quad (11)$$

позволяет получить коэффициенты и погрешности, приведенные в табл. 7.

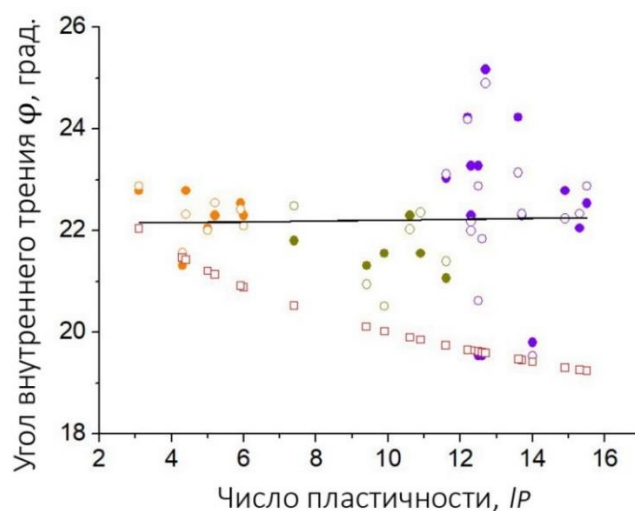


Рис. 6. Зависимость угла внутреннего трения φ от числа пластичности I_p .

Кружками показаны результаты прямого измерения, окружностями показаны результаты расчета по формуле (11) при $N = 3$; сплошной черной линией изображена зависимость (9); красные квадраты представляют регрессионное выражение (10).

Условные обозначения: ● – супеси; ● – суглинки; ● – тяжелые суглинки

Таблица 7

Коэффициенты регрессионного соотношения (формула (11))

i	a	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i
1	-71,6983	-2,1101	663,9236	1,4053	44,6404	-4,0416
2		0,2487	-1299,392	0,3640	-50,7722	0,2137
3		-0,0077	828,6067	-1,7245	21,2055	-0,0041
N	1		2		3	
R^2	0,489		0,548		0,713	
$RMSE$	0,924		0,869		0,693	
$\delta, \%$	23		23		16	

Построение корреляционных соотношений для песчаных грунтов

В данной работе пески классифицированы на основании результатов анализа гранулометрического состава, выполненного согласно ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава». Разновидности песков определены согласно ГОСТ 25100-2020. Результаты определения гранулометрического состава усреднены по разновидностям песков и приведены в табл. 8.

Таблица 8

Гранулометрический состав песков (усредненные данные)

Наименование песка по ГОСТ 25100- 2020	Содержание фракций, мм, %							
	<0,05	<0,1	<0,25	<0,5	<1	<2	<5	<10
Пылеватый	31,7	85,7	89,1	92,7	97,0	100,0	100,0	100,0
Мелкий	9,8	68,4	94,3	95,7	97,2	99,0	99,4	100,0
Средний	3,8	22,3	84,7	92,5	94,4	96,5	98,4	100,0
Крупный	1,1	12,6	42,5	75,3	86,3	92,9	96,3	100,0
Гравелистый	2,5	14,1	48,7	60,4	66,3	75,1	83,0	100,0

Коэффициент пористости

В данной работе начальный коэффициент пористости e_0 определен по формуле:

$$e_0 = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}, \quad (12)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта, г/см³; ρ_d – плотность скелета (сухого) грунта в нормально уплотненном состоянии, г/см³.

В дальнейшем коэффициент пористости будет использован как аргумент зависимости полученных показателей свойств образцов песков различных наименований.

Оптимальная влажность и максимальная плотность

Уплотнение грунта является очень важной операцией при строительстве железнодорожного полотна [26]. Максимальная плотность представляет собой один из важнейших исходных параметров, поскольку определяет требуемую проектами плотность построенного земляного полотна. Достичь требований по плотности земляного полотна можно только в случае, когда влажность грунта близка к ее оптимальному значению.

Зависимость оптимальной влажности W_{opt} изученных в данной работе песков от начального коэффициента пористости e_0 отражена на рис. 7.

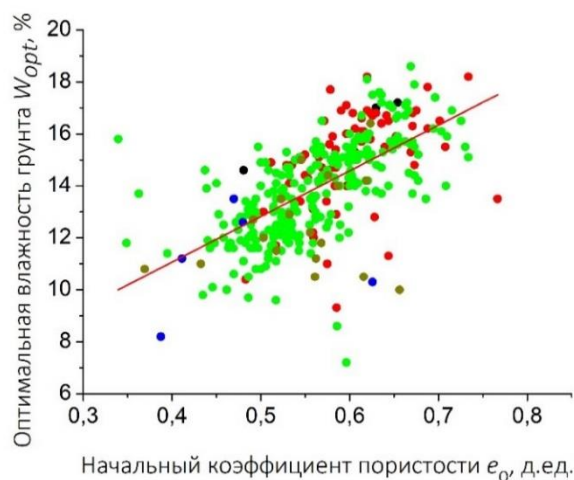


Рис. 7. Зависимость оптимальной влажности W_{opt} грунта от начального коэффициента пористости e_0 .

Сплошной линией изображена зависимость (13).

Условные обозначения: ● – пылеватый; ● – мелкий; ● – средний; ● – крупный; ● – гравелистый

Приведенные значения использованы для построения уравнения линейной регрессии:

$$\hat{W}_{opt} = 17,648 \cdot e_0 + 4,001, \quad (13)$$

где \hat{W}_{opt} – оптимальная влажность грунта, определяемая в результате построения линейного уравнения регрессии.

Применение формулы (13) для аппроксимации результатов определений приводит к неудовлетворительному коэффициенту детерминации $R^2 = 0,401$.

Экспериментальные значения W_{opt} , для которых имеются соответствующие экспериментальные значения коэффициента пористости e_0 , естественной влажности W , коэффициента водонасыщения S_r , содержания глины в комках Γ_l , содержания пылеватых и глинистых частиц $\Pi_{отм}$, модуля крупности M_k , коэффициента неоднородности C_u (табл. 1), подвергнуты степенному регрессионному преобразованию (3):

$$\hat{W}_{opt}(N) = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i e_0^i + c_i W^i + d_i S_r^i + e_i \Gamma_l^i + f_i \Pi_{отм}^i + g_i M_k^i + h_i C_u^i), \quad (14)$$

где $\hat{W}_{opt}(N)$ – оптимальная влажность грунта, определяемая в результате применения степенного регрессионного преобразования; $a_N, b_i, c_i \dots h_i$ – коэффициенты (константы) регрессионного преобразования, а индекс i изменяется от 1 до N и соответствует порядку регрессии.

Выбор независимых переменных в формуле (14) обусловлен желанием учесть размеры и поверхностные свойства частиц грунта, потенциальную возможность грунта накапливать влагу. Результаты расчета коэффициентов регрессии приведены в табл. 9. Их использование позволяет получить при $N = 3$ коэффициент детерминации, среднеквадратичное отклонение и относительную погрешность соответственно равными $R^2 = 0,854$, $RMSE = 0,783$, $\delta = 4 \%$.

Таблица 9

Коэффициенты регрессионного соотношения (формула (14))

N = 3								
i	a_N	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	g_i	h_i
1	74,766	-384,372	2,512	-27,675	-14,869	-0,007	16,763	1,023
2	X	692,052	-0,327	88,286	15,374	0,002	-12,731	-0,275
3		-401,474	0,010	-72,015	-3,438	0	2,370	0,013
$N = 1$	20,017	0,422	-0,238	-0,529	0,0772	0,048	-2,941	-0,071

Учет только первых степеней переменных в выражении (14) приводит к коэффициентам, отраженным в табл. 9 в строке $N = 1$. Имеет место понижение качества регрессионной модели, поскольку при этом уменьшается коэффициент детерминации до $R^2 = 0,662$ и увеличивается среднеквадратичное отклонение и относительная погрешность до $RMSE = 1,188$, $\delta = 6 \%$.

Зависимость максимальной плотности $\rho_{d max}$, достигаемой при стандартном уплотнении несвязного грунта от начального коэффициента пористости e_0 , отражена на рис. 8. Приведенные значения использованы для построения уравнения линейной регрессии:

$$\hat{\rho}_{d max} = -0,954 \cdot e_0 + 2,231, \quad (15)$$

где $\hat{\rho}_{d max}$ – максимальная плотность сухого грунта, определяемая в результате построения линейного уравнения регрессии.

Применение формулы (15) для аппроксимации результатов определений приводит к коэффициенту детерминации $R^2 = 0,890$.

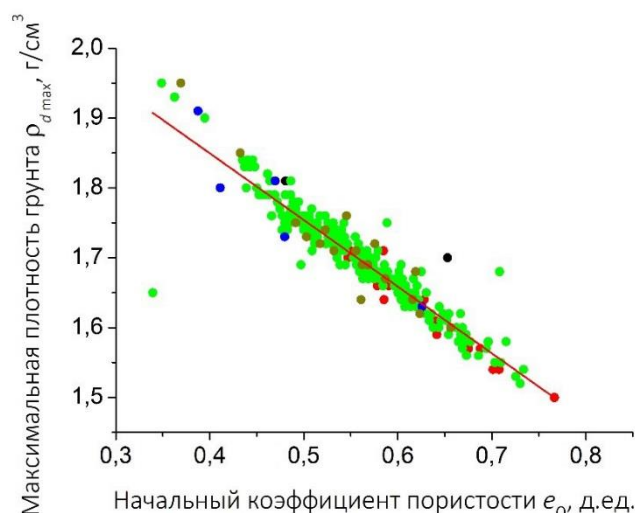


Рис. 8. Зависимость максимальной плотности сухого грунта $\rho_{d\max}$ от начального коэффициента пористости e_0 .

Сплошной линией изображена зависимость (15).

Условные обозначения: ● – пылеватый; ● – мелкий; ● – средний; ● – крупный; ● – гравелистый

В данном исследовании экспериментальные значения $\rho_{d\max}$, для которых имеются соответствующие экспериментальные значения коэффициента пористости e_0 , модуля крупности M_k , коэффициента неоднородности C_u (см. табл. 1), подвергнуты степенному регрессионному преобразованию:

$$\hat{\rho}_{d\max}(N) = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i e_0^i + c_i M_k^i + d_i C_u^i), \quad (16)$$

где $\hat{\rho}_{d\max}(N)$ – максимальная плотность грунта, определяемая в результате применения степенного регрессионного преобразования.

Результаты расчета коэффициентов регрессии при $N = 2$ приведены в табл. 10. Дальнейшее увеличение N приводит к ошибкам алгоритма вычислений. При этом коэффициент детерминации, среднеквадратичное отклонение и относительная погрешность оказались равными соответственно: $R^2 = 0,901$, $RMSE = 0,022$, $\delta = 1\%$.

Таблица 10

Коэффициенты регрессионного соотношения (формула (16))

$N = 3$				
i	a_N	b_i	c_i	d_i
1	1,172	4,384	0,034	0,016
2	X	-9,335	-0,020	-0,001
3		5,398	0,004	0
$N = 1$	2,206	-0,926	0,006	0,001

Учет только первых степеней переменных в выражении (16) приводит к коэффициентам, отраженным в табл. 10 в строке $N = 1$. Имеет место незначительное понижение качества регрессионной модели, поскольку при этом уменьшается коэффициент детерминации до $R^2 = 0,892$ и увеличивается среднеквадратичное отклонение и относительная погрешность до $RMSE = 0,023$, $\delta = 1\%$.

Удельное сцепление и угол внутреннего трения

Удельное сцепление и угол внутреннего трения характеризуют прочностные свойства грунта. Зависимость удельного сцепления c от начального коэффициента пористости e_0 изображена на рис. 9. Приведенные значения использованы для построения уравнения простой линейной регрессии:

$$\hat{c} = 17,963 \cdot e_0 - 7,647, \quad (17)$$

где \hat{c} – удельное сцепление, определяемое в результате построения линейного уравнения регрессии.

Применение формулы (17) для аппроксимации результатов определений приводит к коэффициенту детерминации $R^2 = 0,133$, свидетельствующему о низкой степени корреляции.

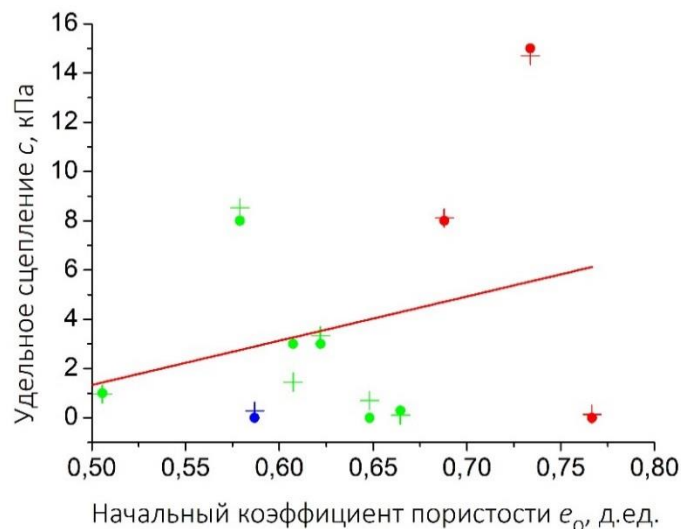


Рис. 9. Зависимость удельного сцепления (c) от начального коэффициента пористости (e_0).

Сплошной линией изображена зависимость (17).

Условные обозначения: ● – мелкий; ● – средний; ● – крупный; + – зависимость $\hat{c}(N)$

В связи с этим экспериментальные значения удельного сцепления c , для которых имеются экспериментальные значения начального коэффициента пористости e_0 , оптимальной влажности W_{opt} , содержание пылеватых и глинистых частиц $\Pi_{отм}$, модуля крупности M_k , коэффициента неоднородности C_u (см. табл. 1), подвергнуты степенному регрессионному преобразованию:

$$\hat{c}(N) = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i e_0^i + c_i W_{opt}^i + d_i \Pi_{отм}^i + e_i M_k^i + f_i C_u^i), \quad (18)$$

где $\hat{c}(N)$ – удельное сцепление, определяемое в результате применения степенного регрессионного преобразования.

Результаты расчета коэффициентов регрессии при $N = 2$ приведены в табл. 11. Они позволяют получить коэффициент детерминации, равный 0,985. При этом среднеквадратичное отклонение и относительная погрешность соответственно оказались равными: $RMSE = 0,541$, $\delta = 6\%$. Результаты регрессионного представления $\hat{c}(N)$ (18) сопоставлены со значениями c на рис. 4. Для изображения значений $\hat{c}(N)$ использован графический символ +.

Учет только первых степеней переменных в выражении (18) приводит к коэффициентам, отраженным в табл. 11 в строке $N = 1$. Имеет место существенное понижение качества регрессионной модели, поскольку при этом уменьшается коэффициент детерминации до $R^2 = 0,415$ и увеличивается среднеквадратичное отклонение и относительная погрешность до $RMSE = 3,425$, $\delta = 30\%$.

Таблица 11

Коэффициенты регрессионного соотношения (формула (18))

N = 2						
<i>i</i>	a_N	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i
1	328,4502	-1937,1016	46,1963	-0,2164	-39,1628	4,4875
2	328,4502	1420,2244	-1,4459	-0,0097	9,0126	-1,9343
N = 1	6,778	-7,771	0,545	-0,101	-5,071	0,506

Зависимость угла внутреннего трения φ от начального коэффициента пористости e_0 изображена на рис. 10. Приведенные значения использованы для построения уравнения простой регрессии вида (13), которая в данном случае имеет вид:

$$\hat{\varphi} = -11,43018 \cdot e_0 + 42,16963, \quad (19)$$

где $\hat{\varphi}$ – угол внутреннего трения, определяемый в результате построения линейного уравнения регрессии.

Формула (19) демонстрирует отсутствие корреляции значений угла внутреннего трения φ и начального коэффициента пористости e_0 , поскольку коэффициент детерминации близок к нулю ($R^2 = 0,026$). Применение для регрессионного анализа выражения вида (18):

$$\hat{\varphi}(N) = a_N + \sum_{i=1}^N (b_i e_0^i + c_i W_{opt}^i + d_i \Pi_{отм}^i + e_i M_k^i + f_i C_u^i), \quad (20)$$

где $\hat{\varphi}(N)$ – угол внутреннего трения, определяемый в результате применения степенного регрессионного преобразования, позволяет получить при $N = 2$ коэффициенты, приведенные в табл. 12.

Таблица 12

Коэффициенты регрессионного соотношения (формула (20))

N = 2						
<i>i</i>	a_N	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i
1	-1835,220	5995,767	45,637	-5,956	-152,934	-25,313
2	-1835,220	-4589,294	-2,355	0,150	23,667	7,405
N = 1	19,978	11,406	-0,049	-0,236	3,717	1,632

Их использование приводит к значению коэффициента детерминации $R^2 = 0,899$. При этом среднеквадратичное отклонение и относительная погрешность оказались равными соответственно: $RMSE = 2,032$, $\delta = 4\%$.

Результаты регрессионного представления $\hat{\varphi}(N)$ (20) сопоставлены с φ на рис. 10. Для изображения $\hat{\varphi}(N)$ использован графический символ +.

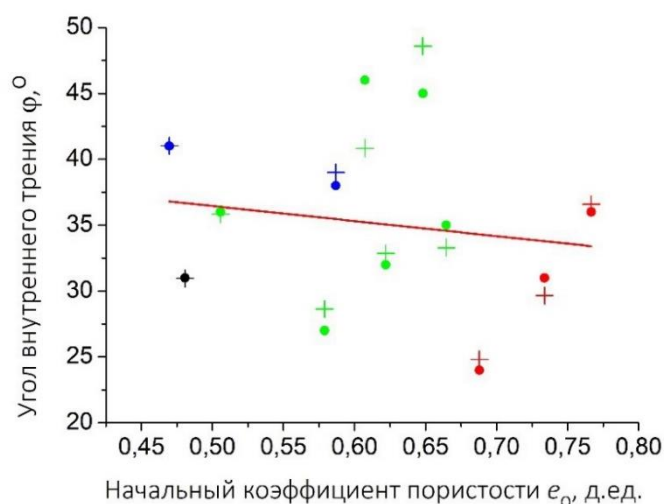


Рис. 10. Зависимость угла внутреннего трения (φ) от начального коэффициента пористости (e_0).
Сплошной линией изображена зависимость (19).

Условные обозначения: ● – пылеватый; ● – мелкий; ● – средний; ● – крупный; + – зависимость $\hat{\varphi}(N)$

Учет только первых степеней переменных в выражении (20) приводит к коэффициентам, отраженным в табл. 9 в строке $N = 1$. Имеет место существенное понижение качества регрессионной модели, поскольку при этом уменьшается коэффициент детерминации до $R^2 = 0,354$ и увеличивается среднеквадратичное отклонение и относительная погрешность до $RMSE = 5,157$, $\delta = 9\%$.

Обсуждение результатов

Применение степенных регрессионных преобразований (например, формула (2)) с использованием простой модели статистически независимых переменных, позволяет анализировать их влияние на зависимую переменную через коэффициент корреляции Пирсона (P) и T -критерий Стьюдента. Для случая использования формулы (2) рассчитанные значения этих параметров приведены в табл. 13 на светлом фоне.

Для анализа приведенных результатов будем искать корреляции, определенные по шкале Чеддока, как более значимые, чем «Умеренная». Это требование накладывает на коэффициент корреляции условие $P \geq 0,5$.

Оценку статистической значимости коэффициента корреляции выполним с учетом часто используемого соотношения $T \geq 2$, который зависит от числа независимых переменных и допустимой вероятности ошибки. Тогда из данных табл. 13 можно сделать следующие выводы. Статистическая значимость корреляции переменных W_p^1 и I_L^3 с \hat{W}_{opt} можно характеризовать как «Очень слабая». Основные корреляции приходятся на переменные: W_L при $i = 1$ и 2; W_p при $i = 2$ и 3; e_0 при $i = 3$ и I_L при $i = 1$.

Таблица 13

Коэффициент корреляции Пирсона (P) и T -критерий Стьюдента, рассчитанные при построении корреляционного соотношения \hat{W}_{opt} (формула (2))

i	P			T			R^2
	1	2	3	1	2	3	
W_L^i	0,756	0,747	0,400	6,226	6,050	2,353	0,794
W_p^i	0,001	0,726	0,754	0,004	5,682	6,172	
e_0^i	0,383	-0,370	0,670	2,236	-2,143	4,863	
I_L^i	0,758	0,362	0,023	6,255	2,093	0,125	
W_L^i	0,756	0,726	0,670	6,226	5,682	4,863	0,676
W_p^i	0,747	0,754	0,758	6,050	6,172	6,255	0,652
e_0^i	0,400	0,383	0,362	2,353	2,236	2,093	0,304
I_L^i	0,001	-0,370	0,023	0,004	-2,143	0,125	0,156

На темном фоне в табл. 13 приведены результаты расчетов параметров при использовании только одной переменной в уравнении (2). В результате расчетов получены высокие значения коэффициента корреляции Пирсона и коэффициента детерминации для корреляционной зависимости \widehat{W}_{opt} от W_L и W_p . Одновременно с этим наблюдается «Слабая» и «Очень слабая» статистическая значимость корреляции от переменных e_0 и I_L соответственно. Таким образом, статистическую значимость корреляции определяют в первую очередь свойства частиц грунтообразующих минералов (размеры и поверхностные свойства частиц грунтов (W_L , W_p)) и во вторую очередь – последствия механических воздействий (пористость (e_0)) и результаты естественных погодных воздействий (превышение влажности над W_p при уплотнении в условиях (I_L)).

Сравнение приведенных на светлом и темном фоне результатов позволяет отметить существенное отличие величины коэффициента R для W_p^1 и I_L^1 , а также изменение знака коэффициента критерия R для e_0^2 и I_L^2 . Это может быть связано с частичной мультиколлинеарностью (линейной зависимостью переменных регрессионной модели), которая приводит к неустойчивости оценок параметров модели.

Будем оценивать мультиколлинеарность переменных значением R^2 . В результате применения регрессионного линейного соотношения к W_p^1 с использованием других переменных из формулы (2) для R^2 получены, соответственно, значения: 0,719, 0,421 и 0,322, которые указывают на существенную связь переменных модели. Вследствие мультиколлинеарности оценки параметров получаются неточными, а значит, сложно оценить влияние переменных на объясняемую переменную. При этом на качестве модели мультиколлинеарность не сказывается. Модель может признаваться статистически значимой даже тогда, когда все коэффициенты незначимы. Это обосновывает использование формул вида (2) при изучении линейной регрессии определяемых переменных.

Несмотря на неточность, оценим влияние переменных формулы (2) на \widehat{W}_{opt} по характеру поведения ее дифференциала:

$$d\widehat{W}_{opt}(N) = \sum_{i=1}^N (b_i W_L^{i-1}) dW_L + \sum_{i=1}^N (c_i W_p^{i-1}) dW_p + \sum_{i=1}^N (d_i e_0^{i-1}) de_0 + \sum_{i=1}^N (e_i I_L^{i-1}) dI_L = A\delta W_L + B\delta W_p + C\delta e_0 + D\delta I_L, \quad (21)$$

где $\delta x = \frac{dx}{\bar{x}}$ – относительное изменение переменной x ;

\bar{x} – средние величины переменных, вычисленные по использованным в регрессии (2).

Результаты расчета констант в формуле (21) приведены в табл. 14.

Таблица 14

Константы из формулы (21) для некоторых разновидностей грунтов

Образцы грунтов	A	B	C	D
Полная выборка	2,997	8,755	4,873	-0,009
Супесь	-3,574	24,071	8,165	-0,138
Суглинок	8,613	4,457	2,432	-0,005
Глина	-15,603	-12,955	12,184	-0,396

Данные, приведенные в табл. 14, позволяют отметить, что использование полной выборки позволяет отметить важность учета W_L , W_p и e_0 в регрессионной модели для \widehat{W}_{opt} ; увеличение I_L , в отличие от других переменных, приводит к уменьшению \widehat{W}_{opt} . Последнее обстоятельство наблюдается в линейных моделях (темный фон табл. 13). В частности, все коэффициенты степеней переменных W_L , W_p и e_0 положительны, а единственный значимый коэффициент I_L^2 – отрицательный. Кроме этого, величины и знаки данных табл. 14 существенным образом разнятся для отдельных разновидностей грунтов, что может оказаться востребованным при уточнении их классификации.

Выполненный анализ применения формулы (2) может быть расширен на формулы (4)–(6), (8), (11). Другим интересным использованием полученных результатов является изучение изменения свойств в регионе строительства. Необходимые для организации и контроля качества строительства объектов земляного полотна значения оптимальной влажности (W_{opt}) и максимальной плотности ($\rho_{d\max}$) связных грунтов удастся связать регрессионными уравнениями (2) и (4) с небольшим числом характеристик грунтов W_L , W_p , I_L , ρ , ρ_d и e_0 . Соответствующие коэффициенты детерминации составляют 0,794

и 0,951 (табл. 2), что обеспечивает возможность контроля определяемых лабораторными методами значений W_{opt} и $\rho_{d\max}$ с точностью 4 и 0,5 %.

Применение степенных регрессионных преобразований (14), (16), (18), (21) базируется на простой модели статистически независимых переменных, которая позволяет анализировать их влияние на зависимую переменную через коэффициент корреляции Пирсона R .

Частичная мультиколлинеарность переменных (линейная зависимость переменных регрессионной модели) приводит к неустойчивости оценок параметров модели. В следствие мультиколлинеарности сложно оценить влияние отдельных переменных на объясняемую переменную. При этом на качестве модели мультиколлинеарность не сказывается. Модель может быть статистически значимой и в случаях незначимости всех коэффициентов.

В табл. 15 приведены результаты моделирования корреляционных зависимостей рассмотренных величин, а также получаемые при моделировании погрешности. Для анализа качества моделей использованы оценки, определенные по шкале Чеддока.

Таблица 15

Результаты моделирования показателей свойств грунтов

Характеристика	$N = 1, R^2$	N	R^2	RMSE	$\delta, \%$	Зависимость по шкале Чеддока
$\hat{W}_{opt}(N)$	0,662	3	0,854	0,783	4	Заметная
$\hat{\rho}_{d\max}(N)$	0,892	3	0,901	0,022	1	Высокая
$\hat{c}(N)$	0,415	2	0,985	0,541	6	Высокая
$\hat{\phi}(N)$	0,354	2	0,899	2,032	4	Заметная

Для величин, приведенных в табл. 15, получены модельные значения с относительными погрешностями, сравнимыми с результатами прямых определений. Это обстоятельство очень важно для организации и контроля качества строительства земляного полотна, поскольку требуемые значения оптимальной влажности (W_{opt}) и максимальной плотности ($\rho_{d\max}$) песков удается связать регрессионными уравнениями (14), (16) с небольшим количеством характеристик, определяемых при исследовании свойств грунтовых материалов в карьерах.

Использование корреляционных соотношений для оценки значений (\hat{c}) и ($\hat{\phi}$) позволяет существенно уменьшить время определения численных значений параметров, необходимых для компьютерного моделирования прочностных свойств особо опасных объектов земляного полотна, таких как высокие насыпи.

Значения результатов лабораторных определений W_{opt} и $\rho_{d\max}$ песков, усредненных по типам, приведены в табл. 16.

Таблица 16

Усредненные значения оптимальной влажности и максимальной плотности исследованных песков

Наименование песка	$W_{opt}, \%$	$\rho_{d\max}, \text{Г/СМ}^3$
Гравелистый	12,5	1,72
Крупный	12,4	1,72
Средний	13,9	1,70
Мелкий	15,0	1,65
Пылеватый	16,2	1,64
В среднем	14,0	1,69

Данные, приведенные в табл. 16, позволяют отметить, что с ростом крупности частиц оптимальная влажность уменьшается на 3,7 %, а максимальная плотность грунта увеличивается на 0,08 %.

Выводы

На основании статистического анализа результатов лабораторных определений показателей свойств песков, использованных в качестве несвязанных грунтовых материалов при строительстве земляного полотна железных дорог в Азово-Черноморском регионе России, были сделаны следующие выводы.

1 Исследованные глинистые грунты в основном относятся к ненабухающим и с низкой пластичностью. Только ~3 % проб можно отнести к грунтам с высокой пластичностью и ~1 % проб имели признаки органических включений.

2 Исследованные пески относятся к пескам всех наименований.

3 Оптимальное значение влажности исследованных глинистых грунтов коррелирует с влажностью на границе текучести с коэффициентом детерминации 0,590. Включение в регрессионное соотношение дополнительно влажности на границе раскатывания, коэффициента пористости и индекса текучести повышает коэффициент детерминации до значения 0,794 и обеспечивает относительную погрешность рассчитанных величин 4 % при среднеквадратичном отклонении 1,078.

4 Значение максимальной плотности, полученной при стандартном уплотнении, коррелирует с влажностью на границе текучести с коэффициентом детерминации 0,375. Включение в регрессионные уравнения характеристик, зависящих от объемных и поверхностных свойств частиц грунта, пористости и текучести позволяет достичь коэффициента детерминации 0,951. При этом абсолютная погрешность вычисления максимальной плотности достигает значения 0,5 %, что меньше величины экспериментальной погрешности.

5 Коэффициент пористости убывает с ростом плотности сухих образцов. Регрессионные соотношения, построенные на плотностях сухих образцов, их естественной влажности и влажности на границах раскатывания и текучести позволяет достичь значения коэффициента детерминации 0,670 при среднеквадратичном отклонении 0,037.

6 Удельное сцепление коррелирует с числом пластичности с коэффициентом детерминации 0,732. Дополнительный учет коэффициента пористости, консистенции, а также заполняемости порового пространства при достижении определенного значения влажности грунта увеличивает это значение до 0,928.

7 Значения угла внутреннего трения практически не связано с числом пластичности. Однако добавление в регрессионную зависимость параметров, определяющих пористость, консистенцию и заполненность порового пространства при определенной влажности позволяет достичь коэффициента детерминации 0,713.

8 На примере начальной пористости показано, что предсказание характеристик глинистых грунтов с использованием регрессионных выражений может осуществляться с погрешностью, близкой к погрешности прямых измерений.

9 Оптимальное значение влажности исследованных песков коррелирует с начальным коэффициентом пористости с коэффициентом детерминации 0,401. Включение в регрессионное соотношение дополнительно естественной влажности, коэффициента водонасыщения, содержания глины в комках, содержания пылеватых и глинистых частиц, модуля крупности, коэффициента неоднородности повышает коэффициент детерминации до значения 0,854 и обеспечивает относительную погрешность рассчитанных величин 4 %, что сравнимо с обычно допускаемыми величинами экспериментальных погрешностей.

10 Значение максимальной плотности, полученной при стандартном уплотнении, коррелирует с начальным коэффициентом пористости с коэффициентом детерминации 0,890. Включение в регрессионные уравнения модуля крупности и коэффициента неоднородности незначительно увеличивает коэффициент детерминации до значения 0,901. При этом абсолютная погрешность вычисления максимальной плотности достигает значения 1 %, что сравнимо с обычно допускаемыми величинами экспериментальных погрешностей.

11 Удельное сцепление слабо коррелирует с начальным коэффициентом пористости. Дополнительный учет естественной влажности, содержания пылеватых и глинистых частиц, модуля крупности, коэффициента неоднородности увеличивает коэффициент детерминации до приемлемого значения 0,985.

12 Значение угла внутреннего трения практически не связано с начальным коэффициентом пористости. Однако добавление в регрессионную зависимость параметров, перечисленных в п. 11, позволяет достичь коэффициента детерминации 0,899.

Список литературы

- 1 **Захаров, С. М.** Развитие тяжеловесного движения в мире / С. М. Захаров, К. П. Шенфельд // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 4. – С. 9–18. – ISSN 2223-9731.
- 2 Деформативность пути на участках обращения тяжеловесных поездов / В. О. Певзнер, А. И. Лисицын, Е. Н. Гринь [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 9. – С. 36–41. – ISSN 0044-4448.
- 3 **González-Nicieza, C.** Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks / C. González-Nicieza, M. I. Álvarez-Fernández, A. Menéndez-Díaz [et al.] // Engineering Failure Analysis / – 2008. – Vol. 15. – No. 1–2. – P. 90–117. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.11.021> (date of access: 15.05.2023).
- 4 **Wang, T.** Method for slab track substructure design at a speed of 400 km/h / T. Wang, Q. Luo, J. Liu [et al.] // Transportation Geotechnics. – 2020. – No. 24, 10039. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100391> (date of access: 15.05.2023).
- 5 **Yang, L. A.** Dynamic stress analysis of a ballasted railway track bed during train passage / L. A. Yang, W. Powrie, J. A. Priest // JGGE. – 2009. – No. 135(5). – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000032](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000032) (date of access: 15.05.2023).
- 6 **Ашпиз, Е. С.** О влиянии тяжеловесного движения на земляное полотно / Е. С. Ашпиз // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 7. – С. 50–53. – ISSN 0044-4448.
- 7 **Хасенов, С. С.** Анализ деформаций земляного полотна железных дорог Казахстана / С. С. Хасенов, М. Я. Квашнин, А. Б. Сугирбай // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2020. – № 4(115). – С. 31–37. – ISSN 1609-1817.
- 8 **International Heavy Haul Association (ИХА)**, 2009. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Infrastructure Construction and Maintenance. – P. 650. – ISBN 1930566743, 9781930566743.
- 9 **СП 32-104-98** «Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм»: одобрен Минземстроем России (письмо № 13–498 от 08.09.98 г.). – Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 91 с.
- 10 **СТУ-3** «Проектирование участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч»: согласованы письмом Министерства строительства и

References

- 1 **Zakharov, S. M.** Development of heavy traffic in the world / S. M. Zakharov, K. P. Shenfeld // Bulletin of Scientific Research Institute of Railway Transport. – 2013. – No. 4. – P. 9–18. – ISSN 2223-9731.
- 2 Deformability of the track in the areas of circulation of heavy trains / V. O. Pevzner, A. I. Lisitsyn, E. N. Grin [et al.] // Railway Transport. – 2019. – No. 9. – P. 36–41. – ISSN 0044-4448.
- 3 **González-Nicieza, C.** Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks / C. González-Nicieza, M. I. Álvarez-Fernández, A. Menéndez-Díaz [et al.] // Engineering Failure Analysis / – 2008. – Vol. 15. – No. 1–2. – P. 90–117. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.11.021> (date of access: 15.05.2023).
- 4 **Wang, T.** Method for slab track substructure design at a speed of 400 km/h / T. Wang, Q. Luo, J. Liu [et al.] // Transportation Geotechnics. – 2020. – No. 24, 10039. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100391> (date of access: 15.05.2023).
- 5 **Yang, L. A.** Dynamic stress analysis of a ballasted railway track bed during train passage / L. A. Yang, W. Powrie, J. A. Priest // JGGE. – 2009. – No. 135(5). – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000032](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000032) (date of access: 15.05.2023).
- 6 **Ashpiz, E. S.** On the impact of heavy traffic on the subgrade / E. S. Ashpiz // Railway Transport. – 2015. – No. 7. – P. 50–53. – ISSN 0044-4448.
- 7 **Khasenov, S. S.** Analysis of soil bed deformations of Kazakhstan railroads / S. S. Khasenov, M. Y. Kvasninin, A. B. Sugirbay // Bulletin of Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshepaev. – 2020. – No. 4(115). – P. 31–37. – ISSN 1609-1817.
- 8 **International Heavy Haul Association (ИХА)**, 2009. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Infrastructure Construction and Maintenance. – P. 650. – ISBN 1930566743, 9781930566743.
- 9 **SP 32-104-98** "Design of the soil bed of 1520 mm gauge railroads": Approved by Minzemstroy of Russia (letter No. 13–498 from 09/08/98). – Gosstroy Russia, GUP CPR, 1999. – 91 p.
- 10 **STU-3** "Design of the Moscow-Kazan section of the Moscow – Kazan – Yekaterinburg high-speed railway with speeds up to 400 km/h": agreed by the letter of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation

жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26 апреля 2017 года N 14574-ЛС/03 – Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО РГУПС, 2017. – 44 с.

11 **TB 10001-2016** «Code for design of railway earth structure» : industry standard of the People's Republic of China. Issued on : December 20, 2016. – State Railway Administration. – P. 150.

12 **RIL 836** : Erdbauwerke und geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten (English translation : RIL 836 Earthworks and geotechnical structures design, build and maintainance) : German National Railway Company Deutsche Bahn AG.

13 LGV technical reference, 2010. Référentiel technique LGV dans le cadre de PPP ou de DSP tome 2 – ouvrages en terre. (English translation : Technical Reference LGV as part of PPP or DSP Volume 2 – earthworks)

14 **UIC 719 (E)** «Earthworks and track bed construction for railway lines» : 3rd Edition. – 2008. – Published By : International Union of Railways (UIC).

15 **Waruru, B. K.** Rapid estimation of soil engineering properties using diffuse reflectance near infrared spectroscopy / B. K. Waruru, K. D. Shepherd, G. M. Ndegwa [et al.] // *Biosystems Engineering*. – 2014. – Vol. 121. – P. 177–185. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2014.03.003> (date of access: 15.05.2023).

16 **Cláudio de Oliveira, M.** Determination of clay plasticity: Indentation method versus Pfefferkorn method / M. Cláudio de Oliveira, M. B. Adriano // *Applied Clay Science*. – 2008. – Vol. 40. – Iss. 1–4. – P. 15–19. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.06.007> (date of access: 15.05.2023).

17 Mid-Infrared Spectroscopic Assessment of Plasticity Characteristics of Clay Soils / A. Kasprzhitskii, G. Lazorenko, A. Khater, V. Yavna // *Minerals*. – 2018. – No. 8(5). – P. 184. – URL: <https://doi.org/10.3390/min8050184> (date of access: 15.05.2023).

18 **O'Kelly, B. C.** Review of Recent Developments and Understanding of Atterberg Limits Determinations / B. C. O'Kelly // *Geotechnics*. – 2021. – No. 1. – P. 59–75. – URL: <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010004> (date of access: 15.05.2023).

19 **Shaivan, H. S.** Correlation of compaction characteristics of Standard and Reduced Proctor tests / H. S. Shaivan, A. Sridharan // *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*. – 2021. – No. 174(2). – P. 170–180. – URL: <https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00060> (date of access: 15.05.2023).

20 **Vinod, P.** Toughness Limit : A Useful Index Property for Prediction of Compaction Parameters of Fine Grained Soils at Any Rational Compactive Effort / P. Vinod,

from April 26, 2017 N 14574-LS/03 – Saint Petersburg : FGBOU VO PGUPS, 2017. – 44 p.

11 **TB 10001-2016** «Code for design of railway earth structure» : industry standard of the People's Republic of China. Issued on : December 20, 2016. – State Railway Administration. – P. 150.

12 **RIL 836** : Erdbauwerke und geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten (English translation : RIL 836 Earthworks and geotechnical structures design, build and maintainance) : German National Railway Company Deutsche Bahn AG.

13 LGV technical reference, 2010. Référentiel technique LGV dans le cadre de PPP ou de DSP tome 2 – ouvrages en terre. (English translation : Technical Reference LGV as part of PPP or DSP Volume 2 – earthworks)

14 **UIC 719 (E)** «Earthworks and track bed construction for railway lines»: 3rd Edition. – 2008. – Published By : International Union of Railways (UIC).

15 **Waruru, B. K.** Rapid estimation of soil engineering properties using diffuse reflectance near infrared spectroscopy / B. K. Waruru, K. D. Shepherd, G. M. Ndegwa [et al.] // *Biosystems Engineering*. – 2014. – Vol. 121. – P. 177–185. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2014.03.003> (date of access: 15.05.2023).

16 **Cláudio de Oliveira, M.** Determination of clay plasticity: Indentation method versus Pfefferkorn method / M. Cláudio de Oliveira, M. B. Adriano // *Applied Clay Science*. – 2008. – Vol. 40. – Iss. 1–4. – P. 15–19. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.06.007> (date of access: 15.05.2023).

17 Mid-Infrared Spectroscopic Assessment of Plasticity Characteristics of Clay Soils / A. Kasprzhitskii, G. Lazorenko, A. Khater, V. Yavna // *Minerals*. – 2018. – No. 8(5). – P. 184. – URL: <https://doi.org/10.3390/min8050184> (date of access: 15.05.2023).

18 **O'Kelly, B. C.** Review of Recent Developments and Understanding of Atterberg Limits Determinations / B. C. O'Kelly // *Geotechnics*. – 2021. – No. 1. – P. 59–75. – URL: <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010004> (date of access: 15.05.2023).

19 **Shaivan, H. S.** Correlation of compaction characteristics of Standard and Reduced Proctor tests / H. S. Shaivan, A. Sridharan // *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*. – 2021. – No. 174(2). – P. 170–180. – URL: <https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00060> (date of access: 15.05.2023).

20 **Vinod, P.** Toughness Limit: A Useful Index Property for Prediction of Compaction Parameters of Fine Grained Soils at Any Rational Compactive Effort / P. Vinod,

G. S. Pillai // Indian, G. J. – 2017. – No. 47(1). – P. 107–114. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40098-016-0194-6> (date of access: 15.05.2023).

21 **Verma, G.** Prediction of compaction parameters for fine-grained and coarse-grained soils : a review / G. Verma, B. Kumar // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2020. – Vol. 14. – Iss. 8. – URL: <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1595301> (date of access: 15.05.2023).

22 **Salih, N. B.** Geotechnical characteristics orrelations for fine-grained soils / N. B. Salih // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – P. 737. – 012099. – URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012099>. (date of access: 15.05.2023).

23 **Sadrekarami, J.** Geotechnical features of Tabriz Marl / J. Sadrekarami, A. Zekri, H. Majidpour // IAEG, 2006. – P. 335.

24 **Rashed, K. A.** Correlation of Consistency and Compressibility Properties of Soils in Sulaimani City / K. A. Rashed, N. B. Salih, Tavga A. Abdullah // Sulaimani Journal for Engineering Sciences. – 2017. – No. 5(4). – P. 86–94. – URL: <https://doi.org/10.17656/sjes.10061> (date of access: 15.05.2023).

25 **Sorensen, K. K.** Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays / K. K. Sorensen, N. Okkels // In : Proceedings of the 18-th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – 2013, Paris, Presses des Ponts, 1. – P. 423–428.

26 **Shimobe, S.** A novel approach to evaluate the compaction control of soils / S. Shimobe, G. Spagnoli // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. – 2020. – Vol. 53. – No. 3. – P. 452–459. – URL: <https://doi.org/10.1144/qjgegh2019-130> (date of access: 15.05.2023).

G. S. Pillai // Indian, G. J. – 2017. – No. 47(1). – P. 107–114. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40098-016-0194-6> (date of access: 15.05.2023).

21 **Verma, G.** Prediction of compaction parameters for fine-grained and coarse-grained soils : a review / G. Verma, B. Kumar // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2020. – Vol. 14. – Iss. 8. – URL: <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1595301> (date of access: 15.05.2023).

22 **Salih, N. B.** Geotechnical characteristics orrelations for fine-grained soils / N. B. Salih // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – P. 737. – 012099. – URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012099>. (date of access: 15.05.2023).

23 **Sadrekarami, J.** Geotechnical features of Tabriz Marl / J. Sadrekarami, A. Zekri, H. Majidpour // IAEG, 2006. – P. 335.

24 **Rashed, K. A.** Correlation of Consistency and Compressibility Properties of Soils in Sulaimani City / K. A. Rashed, N. B. Salih, Tavga A. Abdullah // Sulaimani Journal for Engineering Sciences. – 2017. – No. 5(4). – P. 86–94. – URL: <https://doi.org/10.17656/sjes.10061> (date of access: 15.05.2023).

25 **Sorensen, K. K.** Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays / K. K. Sorensen, N. Okkels // In: Proceedings of the 18-th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – 2013, Paris, Presses des Ponts, 1. – P. 423–428.

26 **Shimobe, S.** A novel approach to evaluate the compaction control of soils / S. Shimobe, G. Spagnoli // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. – 2020. – Vol. 53. – No. 3. – P. 452–459. – URL: <https://doi.org/10.1144/qjgegh2019-130> (date of access: 15.05.2023).

M. V. Okost

CORRELATION RELATIONS OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SOILS USED IN THE CONSTRUCTION OF A RAILWAY SUBGRADE FOR THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT COMPLEX IN THE AZOV-BLACK SEA REGION OF RUSSIA

Abstract. The work is devoted to the study of the physical and mechanical properties of clay and sandy soils used in the construction of a new and reconstruction of the existing railway subgrade in the direction of Kotelnikovo – Tikhoretskaya – Krymskaya for the development of ports in the Azov-Black Sea region of Russia and the construction of correlation ratios obtained from the results of correlation and regression analysis of soil properties. Such ratios may be in demand when monitoring the accuracy of laboratory tests of the properties of soil materials and increase the speed of engineering and geological surveys and the selection of a quarry with the further development of the road network in a given region. In addition, regression ratios can increase the speed of decision-making on the use of a specific type of soil for the reconstruction of the subgrade using certain characteristics that can be determined with the least time.

Keywords: subgrade, tests, classification of soils; physical and mechanical characteristics, regression relations.

For citation: Okost, M. V. Correlation relations of physical and mechanical characteristics of soils used in the construction of a railway subgrade for the development of the transport complex in the Azov-Black Sea region of Russia / M. V. Okost // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 51–72. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_51.

Сведения об авторах

Okost Maksim Viktorovich

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 519.87

DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_73

*Е. А. Середов***ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ МАНЕВРОВ
НА ВЫТЯЖНЫХ ПУТЯХ**

Аннотация. Рассматривается визуализация процессов выполнения маневров на вытяжных путях с использованием программы AnyLogic. Имитационные модели выполнения маневров в программе AnyLogic позволят визуализировать процессы выполнения маневров на вытяжных путях и повысить вероятность их понимания обучающимися в учебных заведениях железнодорожного транспорта и работниками железнодорожного транспорта. Применение имитационного моделирования при апробации технических и технологических решений, направленных на повышение эффективности работы станции, позволит существенно сократить не только финансовые, но и временные затраты, связанные с проведением исследований на реальном объекте. В приведенных примерах рассмотрено создание имитационных моделей выполнения маневров на вытяжных путях такими способами, как осаживание и толчки.

Ключевые слова: моделирование, визуализация процессов, маневры на вытяжных путях, маневры осаживанием, маневры толчками.

Для цитирования: Середов, Е. А. Имитационное моделирование выполнения маневров на вытяжных путях / Е. А. Середов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 73–78. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_73.

Введение

Во всем мире развиваются технологические процессы и формируются ресурсы для их изготовления. На таком высоком уровне недопустимы ошибки, поэтому используется имитационное моделирование, следовательно, имитационное моделирование – неотъемлемый инструмент прогресса. В целях визуализации процессов выполнения маневров на вытяжных путях для правильного их восприятия обучающимися в учебных заведениях железнодорожного транспорта и работниками железнодорожного транспорта рассмотрено применение программы AnyLogic [1], позволяющей создавать различные имитационные модели.

Создание имитационных моделей выполнения маневров на вытяжных путях

Предварительным этапом визуализации способов выполнения маневров на вытяжных путях является создание стрелочной улицы.

Построим простейшую стрелочную улицу [2] (рис. 1), состоящую из четырех путей при следующих исходных данных:

- марка крестовины 1/9;
- тип рельсов Р-50;
- радиус кривой 200 м;
- величина междупутья 5,3 м.



Рис. 1. Стрелочная улица под углом крестовины

Построив стрелочную улицу, приступаем к рассмотрению примеров создания имитационных моделей выполнения маневров на вытяжных путях и к визуализации этих процессов.

Пример 1. Создание имитационной модели выполнения маневров на вытяжном пути осаживанием

Выполнение маневров осаживанием основывается на движении маневрового состава на соответствующий путь парка только с локомотивом. При этом отцепка вагонов выполняется только при полной остановке локомотива после полурейса осаживания в необходимом месте пути. Данный способ выполнения маневров на вытяжном пути является наиболее безопасным, но и наименее производительным. Следует принять во внимание, что маневры осаживанием применяются в случаях, когда в маневровом составе есть вагоны с опасным грузом и другие вагоны (по специальному перечню), которые запрещено толкать при маневрах и спускать с горки без локомотивов, а также в других случаях, когда нет возможности применять толчки – неблагоприятный профиль пути, недостаточная видимость и т.д.

Пример выполнения маневров осаживанием представлен на рис. 2.

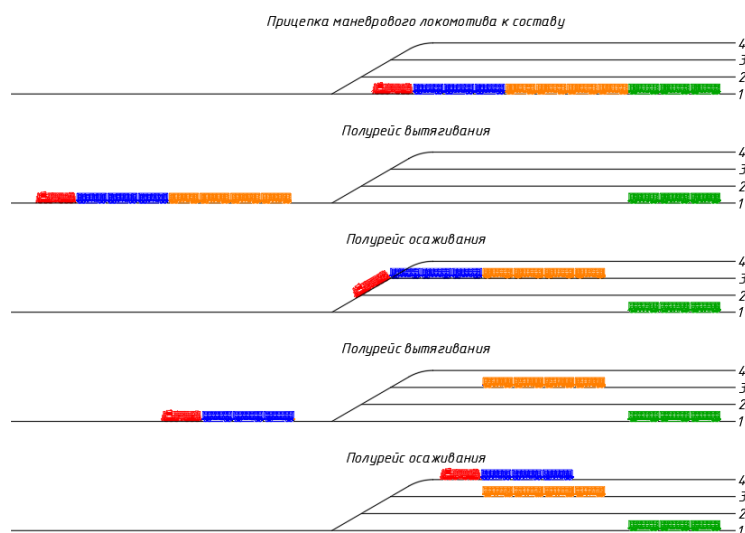


Рис. 2. Пример выполнения маневров осаживанием

Рассмотрим выполнение данного процесса в программе AnyLogic. Используя инструмент «Точка на ж. д. пути», установим точки 1–4 на железнодорожных путях согласно рис. 3. После этого приступаем к построению логической цепочки выполнения маневров на вытяжном пути методом осаживания. Появление локомотива с маневровым составом предусмотрено в точке 1 (Т1). Вытягивание маневрового состава будет осуществляться до точки 2 (Т2) с последующим осаживанием вагонов до точки 3 (Т3). Цикл выполнения маневров повторяется до осаживания вагонов до точки 4 (Т4). Одиночный локомотив после выполнения маневров следует в Т2.

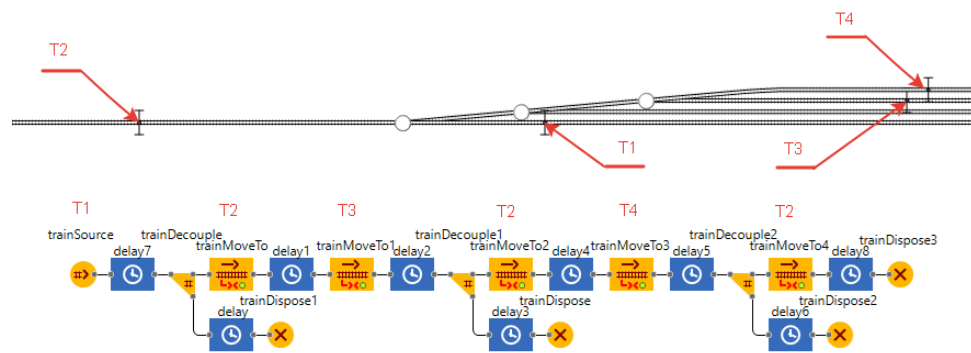


Рис. 3. Общий вид стрелочной улицы с логической цепочкой выполнения маневров осаживанием

Пример 2. Создание имитационной модели выполнения маневров на вытяжном пути толчками

Выполнение маневров точками основывается на движении отцепки по инерции после толчка локомотива. При этом отцепка вагонов выполняется заблаговременно, до начала движения подвижного состава по вытяжному пути. При выполнении маневров толчками требуется регулировать скорость движения отцепки на занятый путь парка, так как скорость соударения вагонов должна быть не более 5 км/ч. Ограничения по производству маневров толчками представлены в пункте 51 приложения N10 к Инструкции по организации движения поездов и маневровой работы на железнодорожном транспорте Российской Федерации [3]. Кроме того, маневры толчками исключены там, где стрелочная зона имеет уклон в сторону вытяжного пути, так как в этом случае возможна остановка отцепки в горловине или его обратное движение [4]. Маневры толчками классифицируют по числу отцепов, направляемых на сортировочные пути при каждом толчке и по числу толчков, выполняемых локомотивом при одном полу рейсе [5].

Пример выполнения маневров толчками представлен на рис. 4.

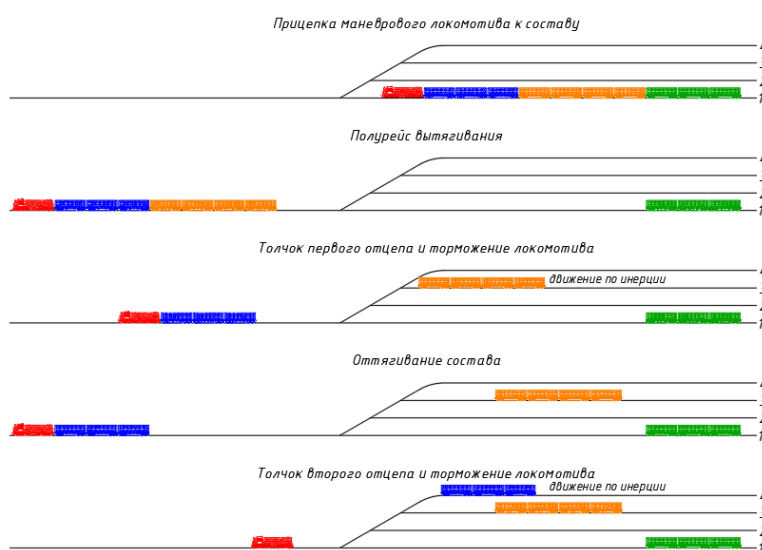


Рис. 4. Пример выполнения маневров толчками

Для выполнения данного процесса в программе AnyLogic [6] требуется добавить еще одну точку (T5) перед разделительной стрелкой, являющейся местом торможения локомотива и началом движения отцепки по инерции (рис. 5). После этого приступаем к построению логической цепочки выполнения маневров точками. Появление локомотива с маневровым составом предусмотрено в точке 1 (T1). Вытягивание маневрового состава будет осуществляться до точки 2 (T2) с последующим толчком вагонов до точки 5 (T5), где предусматривается разъединение вагонов. Цикл выполнения маневров повторяется при движении вагонов по инерции до точки 4 (T4). Одиночный локомотив после выполнения маневров следует в T2.

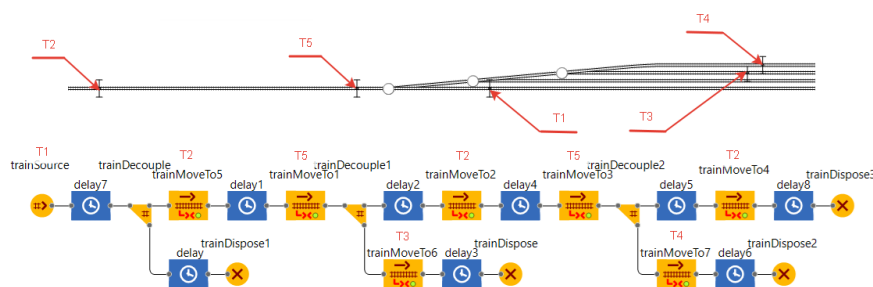


Рис. 5. Общий вид стрелочной улицы с логической цепочкой выполнения маневров толчками

На рис. 3, 5 над блоком «*trainSource*» указана точка входа подвижного состава, а над всеми блоками управления движения поездов (*trainMoveTo*) указаны точки – цели движения подвижного состава. Блоки «*delay*» используются с целью задержки подвижного состава в необходимом месте и подразумевают операции по установке средств закрепления подвижного состава, смену направления движения и другие. При задании параметров для блоков логической цепочки следует обращать внимание на направление движения подвижного состава по путям и местонахождение отцепляемых вагонов в маневровом составе (последние/первые). Для замены разноцветных призм на визуализированные модели подвижного состава требуется создать отдельные агенты, соответствующие моделям подвижного состава и, сделав параметр «*Новый вагон*» блока «*trainSource*» динамическим, прописать:

```
carindex == 0 ? new RailCar() :  
randomlyCreate( MyAgent.class,  
MyAgent1.class, MyAgent2.class ),
```

где агенту «*RailCar*» соответствует модель локомотива, а агентам «*MyAgent*», «*MyAgent1*» и «*MyAgent2*» соответствуют модели вагонов различных типов.

Виды визуализации выполнения маневров представлены на рис. 6.

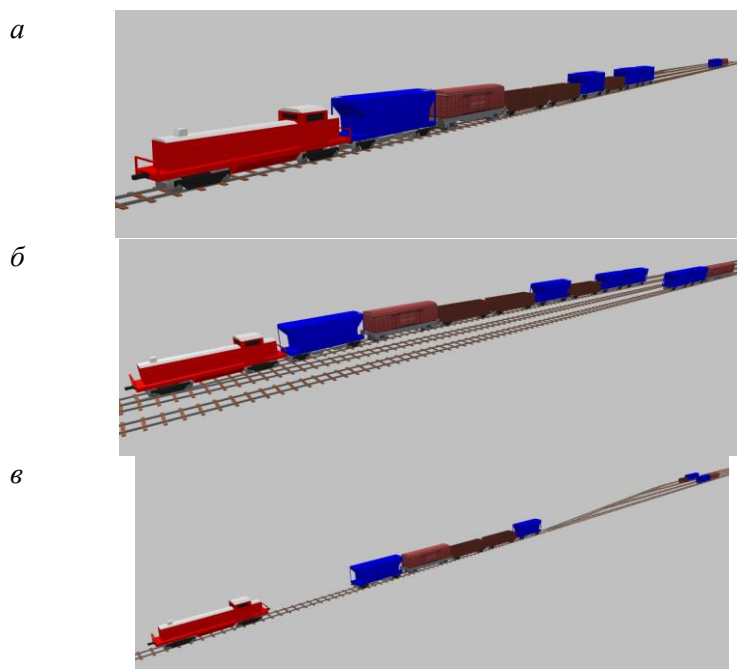


Рис. 6. Виды визуализации выполнения маневров:
а – вытягивание; *б* – осаживание; *в* – толчок

Выводы

Таким образом, используя программу AnyLogic [7], можно создать имитационные модели [8, 9] выполнения маневров на вытяжных путях и визуализировать эти процессы для правильного их понимания обучающимися в учебных заведениях железнодорожного транспорта и работниками железнодорожного транспорта, поскольку динамическое описание действий наиболее наглядно по сравнению с графическим. Следует также отметить важность использования имитационного моделирования при апробации технических и технологических решений, направленных на повышение эффективности работы станции, так как при этом существенно сокращаются не только финансовые, но и временные затраты, связанные с проведением исследований на реальном объекте [10].

Список литературы

- 1 **Маликов, Р. Ф.** Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6 : учебное пособие / Р. Ф. Маликов. – Уфа : Издательство БГПУ, 2013 – 296 с. – ISBN 978-5-87978-862-4.
- 2 Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) : учебник / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич [и др.] ; под редакцией Н. В. Правдина и С. П. Вакуленко. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 1086 с. – ISBN 978-5-89035-619-2.
- 3 Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 23.06.2022 № 250 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» (зарегистрирован 20.07.2022 № 69324). – URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/31828> (дата обращения: 25.05.2023).
- 4 **Бессонова, Н. В.** Технология и организация маневровой работы на железнодорожных станциях (в примерах и задачах) : методические указания / Н. В. Бессонова, Е. Ю. Бокова. – Москва : МИИТ, 2014. – 50 с.
- 5 **Зубков, В. Н.** Технология и управление работой станций и узлов : учебное пособие / В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко. – Москва : ФГБОУ «УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 415 с. – ISBN 978-5-89035-892-9.
- 6 **Киселева, М. В.** Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic : учебно-методическое пособие / М. В. Киселева. – Екатеринбург : УГТУ – УПИ, 2009. – 88 с.
- 7 **Даденков, С. А.** Имитационное моделирование дискретных информационных систем и сетей в среде AnyLogic : учебное пособие / С. А. Даденков, Е. Л. Кон ; Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – Пермь : Издательство Пермского нац. исследовательского политехнического университета, 2018. – 314 с. – ISBN 978-5-398-02073-1.
- 8 **Кизимиров, М. В.** Применение виртуальной реальности в логистических системах // Логистика – евразийский мост : материалы XIV Международной научно-практической конференции, Красноярск, 24–29 апреля 2019 г. / М. В. Кизимиров, А. В. Астафьев, И. В. Серяпова. – Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2019. – С. 133–135.

References

- 1 **Malikov, R. F.** Workshop on simulation modeling of complex systems in AnyLogic environment 6: textbook. manual / R. F. Malikov. – Ufa : Publishing House of BSPU, 2013 – 296 p. – ISBN 978-5-87978-862-4.
- 2 Designing the infrastructure of railway transport (stations, railways and transport hubs) : textbook / N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko, A. K. Golovnich, etc. ; edited by N. V. Pravdin and S. P. Vakulenko. – Moscow : FGBOU «Educational and Methodological Center by education on the same road transport», 2012. – 1086 p. – ISBN 978-5-89035-619-2.
- 3 Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 250 dated 06/23/2022 «On Approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation» (Registered 07/20/2022 No. 69324). – URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/31828> (date of access: 05.25.2023).
- 4 **Bessonova, N. V.** Technology and organization of shunting work at railway stations (in examples and tasks) : methodical instructions / N. V. Bessonova, E. Yu. Bokova. – Moscow : MIIT, 2014. – 50 p.
- 5 **Zubkov, V. N.** Technology and control of stations and hubs: textbook. manual / V. N. Zubkov, N. N. Musienko. – Moscow : FGBOU «UMTS for education on railway transport», 2016. – 415 p. – ISBN 978-5-89035-892-9.
- 6 **Kiseleva, M. V.** Simulation modeling of systems in the AnyLogic environment : an educational and methodological manual / M. V. Kiseleva. – Yekaterinburg : USTU – UPI, 2009. – 88 p.
- 7 **Dadenkov, S. A.** Simulation modeling of discrete information systems and networks in the AnyLogic environment : textbook / S. A. Dadenkov, E. L. Kon ; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, FGBOU «Perm National Research Polytechnic University». – Perm : Publishing House of Perm National University. Research Polytechnic University, 2018. – 314 p. – ISBN 978-5-398-02073-1.
- 8 **Kizimirov, M. V.** The use of virtual reality in logistics systems // Logistics – the Eurasian Bridge : Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, April 24–29, 2019 / M. V. Kizimirov, A. V. Astafyev, I. V. Seryapova. – Krasnoyarsk : Krasnoyarsk State Agrarian University, 2019. – P. 133–135.

9 Лычкина, Н. Н. Имитационное моделирование экономических процессов : учебное пособие / Н. Н. Лычкина. – Москва : ИНФРА-М, 2022. – 254 с. – (Высшее образование : Бакалавриат). – ISBN 978-5-16-017094-7.

10 Железнодорожные станции и узлы : учебник / В. И. Апатцев [и др.] ; под редакцией В. И. Апатцева и Ю. И. Ефименко. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – 855 с. – ISBN 978-5-89035-674-1.

9 Lychkina, N. N. Simulation modeling of economic processes : a textbook / N. N. Lychkina. – Moscow : IN-FRA-M, 2022. – 254 p. – (Higher education : Bachelor's degree). – ISBN 978-5-16-017094-7.

10 Railway stations and junctions : textbook / V. I. Apatsev [et al.] ; edited by V. I. Apatsev and Yu. I. Efimenko. – Moscow : FSBEI «Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport», 2014. – 855 p. – ISBN 978-5-89035-674-1.

E. A. Seredov

SIMULATION MODELING OF MANEUVERS ON EXHAUST TRACKS

Abstract. In this paper, the visualization of the processes of performing maneuvers on exhaust paths using the AnyLogic program is considered. Simulation models for performing maneuvers in the AnyLogic program will allow you to visualize the processes of performing maneuvers on exhaust tracks and increase the likelihood of their being understood by students of railway transport educational institutions and other interested persons. The use of simulation modeling in the testing of technical and technological solutions aimed at improving the efficiency of the station will significantly reduce not only financial, but also time costs associated with conducting research on a real object. In the examples given, the creation of simulation models of performing maneuvers on exhaust paths by means of settling and pushing is considered.

Keywords: modeling, visualization of processes, maneuvers on high-speed paths, landing maneuvers, thrusting maneuvers.

For citation: Seredov, E. A. Simulation modeling of maneuvers on exhaust Tracks / E. A. Seredov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 73–78. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_73.

Сведения об авторах

Середов Евгений Александрович
Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Железнодорожные станции и
транспортные узлы»,
кандидат технических наук,
ассистент,
e-mail: evgeniy.seredov@mail.ru

Information about the authors

Seredov Evgeniy Alexandrovich
Russian University of Transport (MIIT),
Department «Railway Stations and Transport
Hubs»,
Candidate of Engineering Sciences,
Lecturer,
e-mail: evgeniy.seredov@mail.ru

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 629.423.1

DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_79

*Т. В. Волчек***СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ
ЗА СЧЕТ ПЛАВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ
ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Аннотация. Снижение потребления электроэнергии на тягу поездов было и остается одной из приоритетных задач ОАО «РЖД». Одним из способов снижения потребления электроэнергии является рациональное вождение поездов в режиме тяги, которое зависит как от локомотивной бригады, так и от конструкции электроподвижного состава. Как известно, чем быстрее поезд разгонится, тем быстрее запасет кинетическую энергию, оптимальное использование которой позволит снизить потребление электроэнергии. В настоящее время на современных отечественных электровозах для дополнительного разгона используется система ослабления возбуждения тяговых электродвигателей. Выполнен тяговый расчет, который позволяет сравнить потребление электроэнергии при разгоне поезда в процессе работы электровоза со ступенчатым и плавным регулированием ослабления возбуждения тяговых электродвигателей. С помощью тягового расчета при разгоне поезда доказана энергетическая эффективность системы ослабления возбуждения с плавным регулированием возбуждения электровоза.

Ключевые слова: электроэнергия, электровоз, система ослабления возбуждения тягового электродвигателя, плавное и ступенчатое регулирование.

Для цитирования: Волчек, Т. В. Снижение потребления электроэнергии на тягу поездов за счет плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей / Т. В. Волчек // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 79–84. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_79.

Введение

Российские железные дороги (РЖД) играют важнейшую роль в экономическом развитии страны. Они являются основным способом транспортировки товаров и пассажиров между регионами России и соседними странами. Железнодорожный транспорт ежегодно потребляет около 6–7 % электроэнергии России, с каждым годом в связи с ростом грузовых и пассажирских перевозок данный показатель увеличивается. Одним из основных расходов железных дорог является потребление электроэнергии на тягу поездов (около 70 % от общего потребления железнодорожного транспорта) [1]. В связи с этим для устойчивого развития РЖД и поддержания их конкурентоспособности на мировом рынке необходимо внедрять мероприятия, позволяющие снизить потребление электроэнергии, это является одной из важнейших задач, отраженных в отраслевых стратегических документах РЖД [2, 3].

Одним из способов снижения потребления электроэнергии является рациональное вождение поездов в режиме тяги, которое зависит как от локомотивной бригады, так и от конструкции электроподвижного состава. В настоящее время самым современным электровозом переменного тока с коллекторным приводом является электровоз серии «Ермак». Для дополнительного регулирования скорости в режиме тяги на нем используется контакторно-реостатная система ослабления возбуждения (ОВ) тяговых электродвигателей (ТЭД) со ступенчатым регулированием, которая замедляет процесс разгона поезда и не позволяет ему следовать с максимально допустимой скоростью по участку пути, что противодействует запасу кинетической энергии поезда в полной мере [4–6]. Одним из решений существующей проблемы является внедрение системы ОВ ТЭД с плавным регулированием тока возбуждения, которая исключает потери скорости и ускорения [3, 4]. Как известно, чем быстрее поезд может разогнаться, тем быстрее достигнет максимально допустимой скорости на участке и запасет больше кинетической энергии, оптимальное использование которой позволит сократить потребление электроэнергии. Для более точной оценки потребления электроэнергии при работе систем ОВ ТЭД со ступенчатым и плавным регулированием при разгоне поезда проведен тяговый расчет, порядок и методика которого регламентируются Правилами тяговых расчетов для поездной работы [7].

Построение кривых движения поезда при трогании со станции при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза

Интегрирование уравнения движения поезда выполнено с помощью графического способа, рекомендованного МПС инженером А.И. Липецем [8, 9]. Поезд массой 6300 т рассматривается как материальная точка, в которой сосредоточена вся масса. Построение кривых скоростей выполнено на основании диаграмм удельных ускоряющих и замедляющих сил электровоза и профиля пути (длина участка 3,78 км, при уклоне -0%). При этом построение диаграмм удельных ускоряющих и замедляющих сил, где f_y – удельная ускоряющая сила, w_{ox} – удельное основное сопротивление движению поезда в режиме выбега, выполнено на основе тяговых характеристик электровоза 3ЭС5К с тремя ступенями ОВ ТЭД (рис. 1).

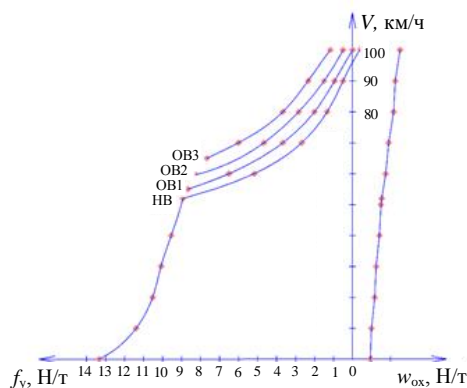


Рис. 1. Диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил электровоза со ступенчатым регулированием ОВ ТЭД

Для электровоза 3ЭС5К с плавным регулированием ОВ ТЭД на диаграмме удельных ускоряющих и замедляющих сил были удалены промежуточные ступени регулирования (ОВ1 и ОВ2), так как плавное регулирование ОВ позволяет электровозу работать в области ограничения по сцеплению (рис. 2) [10].

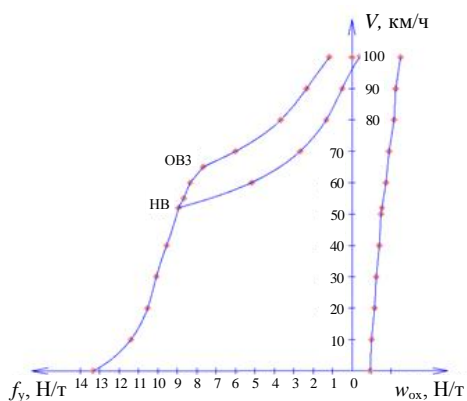


Рис. 2. Диаграмма удельных ускоряющих и замедляющих сил электровоза с плавным регулированием ОВ ТЭД

Построение кривых скоростей $V(S)$ и времени $t(S)$ выполнено в соответствии с изложенными в [8] правилами. Для расчета потребления расхода электроэнергии построена токовая кривая $I_{da}(S)$ на основании токовой характеристики электровоза 3ЭС5К (активный ток) в зависимости от скорости.

На рис. 3 представлены кривые движения поезда со станции при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза.

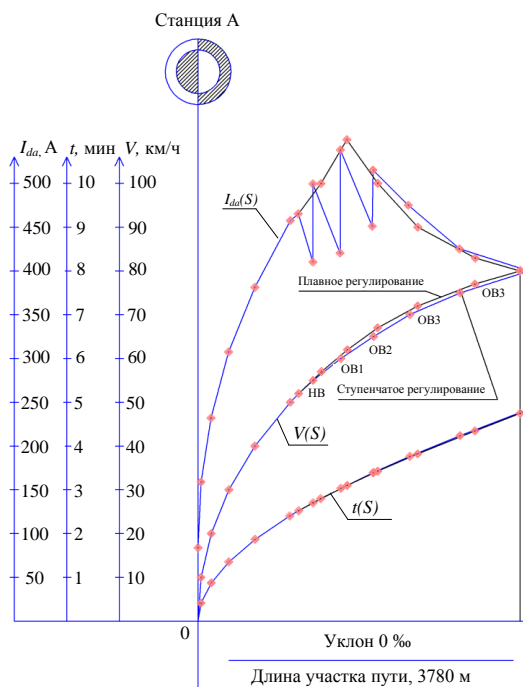


Рис. 3. Кривые движения поезда со станции при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза

Оценка потребления электроэнергии при разгоне поезда при работе системы ОВ ТЭД со ступенчатым регулированием

Расчет потребления электроэнергии электровозом 3ЭС5К при разгоне со станции при ступенчатом регулировании выполнен согласно рис. 3 на основании построенной кривой активной составляющей тока $I_{da}(S)$, в соответствии с которой в табл. 1 приведены данные расхода электроэнергии электровоза при ступенчатом регулировании ОВ ТЭД.

Таблица 1

Расчет расхода электроэнергии при ступенчатом регулировании ОВ ТЭД электровоза

$I_{da н}, А$	$I_{da к}, А$	$I_{da ср}, А$	$t, мин$	$I_{да ср} t, А \cdot мин$
83	158	120,5	0,4	48,2
158	232	195	0,48	93,6
232	307	269,5	0,5	134,8
307	382	344,5	0,5	172,3
382	457	419,5	0,52	218,1
457	465	461	0,13	59,93
465	410	437,5	0,18	78,75
500	420	460	0,33	151,8
538	450	494	0,38	187,7
515	475	495	0,36	178,2
475	425	450	0,47	211,5
425	400	412,5	0,6	247,5
Итого			4,85	1782

Без учета расхода электроэнергии на собственные нужды потребление электроэнергии определяется по выражению

$$A_T = \frac{k_u \cdot U_c \cdot \Sigma I_{ср} \cdot \Delta t}{60 \cdot 1000}, \quad (1)$$

где U_c – напряжение в контактной сети, 25 000 В; $I_{ср}$ – средний ток за время Δt , А; K_u – коэффициент формы кривой напряжения при U_c , 1,16.

Таким образом,

$$A_T = \frac{1,16 \cdot 25000 \cdot 1782}{60 \cdot 1000} = 861,46 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Электроэнергия, затраченная на собственные нужды, определяется по выражению

$$A_{\text{сн}} = t_{\Sigma} \cdot A_{\text{сн ср}}, \quad (2)$$

где t_{Σ} – время работы электровоза, мин; $A_{\text{сн ср}}$ – среднее значение электроэнергии, потребляемой вспомогательными цепями электровоза, 9,63 кВт·ч/мин.

$$A_{\text{сн}} = 4,85 \cdot 9,63 = 46,71 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Полный расход электроэнергии рассчитывается по выражению

$$A = A_T + A_{\text{сн}}. \quad (3)$$

Тогда

$$A = 861,46 + 46,71 = 908,17 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Оценка потребления электроэнергии при разгоне поезда при работе системы ОВ ТЭД с плавным регулированием

В табл. 2 приведены данные расчета расхода электроэнергии при плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза согласно рис. 1.

Таблица 2

Расчет расхода электроэнергии при плавном регулировании ОВ ТЭД

$I_{\text{дан}}, \text{ А}$	$I_{\text{ак}}, \text{ А}$	$I_{\text{ср}}, \text{ А}$	$t, \text{ МИН}$	$I_{\text{даср}} t, \text{ А} \cdot \text{ МИН}$
83	158	120,5	0,4	48,2
158	232	195	0,48	93,6
232	307	269,5	0,5	134,8
307	382	344,5	0,5	172,3
382	457	419,5	0,52	218,1
457	465	461	0,12	55,32
465	500	482,5	0,28	135,1
500	550	525	0,3	157,5
550	500	525	0,32	165,4
500	450	475	0,4	190
450	415	432,5	0,5	216,3
415	400	407,5	0,41	167,1
0	0	0	0,08	0
Итого			4,805	1754

Потребление электроэнергии при разгоне поезда со станции при работе системы с плавным регулированием ОВ ТЭД без учета расхода на собственные нужды

$$A_T = \frac{1,16 \cdot 25000 \cdot 1754}{60 \cdot 1000} = 847,55 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Электроэнергия, затраченная на собственные нужды:

$$A_{\text{сн}} = 4,805 \cdot 9,63 = 46,27 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Тогда полный расход электроэнергии составит

$$A = 847,55 + 46,27 = 893,83 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Вывод

В табл. 3 приведены результаты расчета расхода электроэнергии при ступенчатом и плавном регулировании ОВ ТЭД электровоза, анализируя которые можно сделать вывод о том, что плавное регулирование ОВ ТЭД при разгоне поезда со станции позволяет сократить расход электроэнергии не менее чем на 1,5 %.

Расчет расхода электроэнергии при плавном регулировании ОБ ТЭД

Участок	Длина S , км	Движение с системой ОБ со ступенчатым ре- гулированием, кВт·ч	Движение с системой ОБ с плавным регули- рованием, кВт·ч	ΔA , кВт·ч
А–В	3,78	908,17	893,83	14,34

Таким образом, можно утверждать, что плавное регулирование ОБ ТЭД позволяет не только повысить техническую скорость электровоза [10], но и снизить потребление электроэнергии не менее чем на 1,5 %.

Список литературы

- 1 Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока / В. С. Томилов, О. В. Мельниченко, С. Г. Шрамко, С. А. Богинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 1(65). – С. 172–182. – ISSN 1813-9108.
- 2 Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): [утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р]. – URL: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (дата обращения: 05.05.2023).
- 3 Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : [утверждена распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 г. № 466р]. – URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-19032019-n-466-r/dolgosrochnaia-programma-razvitiia-otkrytogo-aktsionernogo/> (дата обращения: 05.05.2023).
- 4 **Плакс, А. В.** Система управления электрическим подвижным составом / А. В. Плакс. – Москва : Маршрут, 2005. – 360 с. – ISBN 5-89035-303-9.
- 5 **Тихменев, Б. Н.** Электровозы переменного тока со статическими преобразователями / Б. Н. Тихменев. – Москва : Трансжелдориздат, 1958. – 267 с.
- 6 **Волчек, Т. В.** Влияние плавного и ступенчатого регулирования ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровозов на скорость движения электроподвижного состава / Т. В. Волчек // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(50). – С. 99–105. – ISSN 2079-0392.
- 7 Правила тяговых расчетов для поездной работы : [утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016]. – URL: https://e-ecolog.ru/docs/KbXCdAdvLLmM_ABe-sPhn (дата обращения: 05.05.2023).

References

- 1 Improving the energy efficiency of AC electric locomotives / V. S. Tomilov, O. V. Melnichenko, S. G. Shramko, S. A. Boginsky // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2020. – No. 1(65). – P. 172–182. – ISSN 1813-9108.
- 2 The strategy of the scientific and technological development of the Russian Railways Holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Paper) : [approved by the Order of JSC «Russian Railways» dated April 17, 2018 No. 769/r]. – URL: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf (date of access: 05/05/2023).
- 3 Long-term development program of Russian Railways until 2025 : [approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 466r dated March 19, 2019]. – URL: <https://sudact.ru/law/rasporiazhenie-pravitelstva-rf-ot-19032019-n-466-r/dolgosrochnaia-programma-razvitiia-otkrytogo-aktsionernogo/> (date of access: 05/05/2023).
- 4 **Plaks, A. V.** Control system for electric rolling stock / A. V. Plaks. – Moscow : Marshrut, 2005. – 360 p. – ISBN 5-89035-303-9.
- 5 **Tikhmenev, B. N.** AC electric locomotives with static converters / B. N. Tikhmenev. – Moscow : Transzheldorizdat, 1958. – 267 p.
- 6 **Volchek, T. V.** The influence of smooth and stepwise regulation of the weakening of the excitation of traction electric motors of electric locomotives on the speed of movement of the electric rolling stock / T. V. Volchek // Bulletin of the Ural State University of Communications. – 2021. – No. 2(50). – P. 99–105. – ISSN 2079-0392.
- 7 Rules for traction calculations for train operation : [approved by the Order of Russian Railways JSC dated 12.05.2016]. – URL: https://e-ecolog.ru/docs/KbXCdAdvLLmM_ABe-sPhn (date of access: 05/05/2023).

8 **Осипов, С. И.** Теория электрической тяги : учебник для вузов железнодорожного транспорта / С. И. Осипова, С. С. Осипов, В. П. Феокимсиров. – Самара : Маршрут, 2006. – 436 с. – ISBN 5-89035-333-0.

9 Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров. – Москва : Транспорт, 1995. – 294 с. – ISBN 5-277-01462-4.

10 **Волчек, Т. В.** Повышение эффективности системы ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровазов переменного тока : специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Т. В. Волчек ; Российский университет транспорта. – Москва, 2022. – 146 с.

8 **Osipov, S. I.** Theory of Electric Traction : a textbook for high school's railway. transport / S. I. Osipova, S. S. Osipov, V. P. Feokimsirov. – Samara : Marshrut, 2006. – 436 p. – ISBN 5-89035-333-0.

9 Theory of electric traction / V. E. Rosenfeld, I. P. Isaev, N. N. Sidorov, M. I. Ozerov. – Moscow : Transport, 1995. – 294 p. – ISBN 5-277-01462-4.

10 **Volchek, T. V.** Improving the efficiency of the system for attenuating the excitation of traction electric motors of AC electric locomotives : speciality 2.9.3 «Rolling stock of railways, train traction and electrification» : thesis for the degree of candidate of technical sciences / T. V. Volchek ; Russian University of Transport. – Moscow, 2022. – 146 p.

T. V. Volchek

THE REDUCED ELECTRICITY CONSUMPTION FOR TRACTION DRIVING DUE TO SMOOTH CONTROL OF THE CURRENT EXCITATION IN TRACTION ELECTRIC MOTORS

Abstract. The reduced electricity consumption for train traction has been and it is one of the priorities of the Russian Railways. One of the ways to reduce electricity consumption is the rational driving of trains in traction mode which depends on both the locomotive crew and the design of the electric rolling stock. In fact, the faster the train accelerates, the faster it stores kinetic energy, and its optimal use will reduce electricity consumption. At present, for additional acceleration, modern domestic electric locomotives use a system for weakening the excitation of the traction motors. In this paper, a traction calculation is carried out, which makes it possible to compare the consumption of electricity during the acceleration of a train during the operation of an electric locomotive with stepwise and smooth regulation of the weakening of the excitation of traction motors. With the help of traction calculation during the acceleration of the train, the energy efficiency of the excitation attenuation system with smooth control of the excitation of the electric locomotive was proved.

Keywords: electric power, electric locomotive, traction motor excitation weakening system, smooth and step regulation.

For citation: Volchek, T. V. The reduced electricity consumption for traction driving due to smooth control of the current excitation in traction electric motors / T. V. Volchek // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 79–84. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_79.

Сведения об авторах

Волчек Татьяна Витальевна

Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), кафедра «Эксплуатация железных дорог», кандидат технических наук,
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

Information about the authors

Volchek Tatiana Vitalievna

Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of the Irkutsk State Transport University, Chair «Operation of Railways», Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

М. А. Гаранин, С. А. Блинкова

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация. Приведены результаты исследования, посвящённого оценке актуальности и перспективности применения накопителей энергии в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог. Авторами предложена схема подключения накопителя энергии к контактной сети и алгоритм его работы. По результатам моделирования в специализированном программном комплексе приведена предварительная оценка актуальности и перспектив использования накопителей энергии для системы тягового электроснабжения железнодорожного транспорта. На участках, где возможна рекуперация, авторами проведена оценка энергетического потенциала и степени его использования при существующем оборудовании на тяговых подстанциях и размерах движения. Кроме этого, выполнен анализ рынка накопителей энергии для применения в системе тягового электроснабжения железных дорог.

Ключевые слова: железная дорога, железнодорожный транспорт, система тягового электроснабжения, энергия рекуперации, накопитель энергии, технические требования, моделирование.

Для цитирования: Гаранин, М. А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 85–90. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_85.

Введение

На железных дорогах постоянного тока для обеспечения возможности приема и использования рекуперированной электровозом энергии тяговые подстанции железнодорожного транспорта должны быть оборудованы инверторами, либо на перегоне с рекуперированным электровозом должен находиться электровоз в режиме тяги.

Для повышения эффективности системы тягового электроснабжения на тяговых подстанциях и постах секционирования железнодорожного транспорта применяются вольдобавочные устройства [1, 2]. Эти устройства имеют значительную установочную мощность, но эффективность их применения мала ввиду того, что они получают питание от той же сети внешнего электроснабжения, что и тяговые подстанции, при этом внешняя сеть часто не обладает достаточным запасом мощности.

Для повышения эффективности использования энергии рекуперации предлагается применять накопители энергии. В этом случае не потребуется увеличение мощности тяговых подстанций и внешней системы электроснабжения. Система накопителей, принимая энергию рекуперированных электровозов, при отсутствии необходимости применения полученной мощности накапливает её, а отдаёт в тяговую сеть в момент, когда мощность будет востребована.

Такие решения на уровне идей и общих схемных решений прорабатывались и неоднократно публиковались, но до практической реализации именно для систем тягового электроснабжения не доводились.

В настоящее время накопители энергии являются одним из триггеров развития современной электроэнергетики [3–7]. В России уже формируется национальный рынок и складывается практика успешного применения накопителей в энергетике и на транспорте.

Моделирование системы тягового электроснабжения с применением накопителей энергии

При проектировании накопительной системы необходимо решить ряд задач, а именно, определить величину электрической емкости накопителя, который должен обеспечить прием электрической энергии, вырабатываемой в процессе рекуперативного торможения. Количество энергии, которое теоретически может быть возвращено в процессе торможения, рассчитывается по известному выражению. Количество энергии, возвращаемой в процессе торможения, определяется величиной скорости начала торможения.

В общем случае накапливаемая за время рекуперации электрическая энергия определяется по выражению:

$$A_{рек} = U \cdot I \cdot t = U_{\max} \cdot I_{рек} \cdot t_{\text{торм}}$$

где U_{\max} – напряжение в период рекуперации;

$I_{рек}$ – ток рекуперации;

$t_{\text{торм}}$ – время торможения с замедлением $t_{\text{торм}} = (v_{\text{торм}} - v_{\text{мех}}) / a_{\text{торм}}$.

Рассчитанная таким образом емкость одного элемента накопителя и их количество будут соответствовать назначению при условии равенства допустимого тока зарядки системы накопителей току рекуперации. Однако на практике это невыполнимо, поскольку номинальный ток заряда, при котором накопитель сохраняет свою работоспособность, при сохранении определенного количества циклов заряд-разряд определяется величиной 10–20 % от величины емкости аккумулятора.

Второй задачей, которую необходимо решать при использовании накопительных систем на железнодорожном транспорте, – определение места установки накопительной системы с учётом возможностей существующей системы электроснабжения и положительного эффекта от их применения. В специализированном программном комплексе был выполнен расчёт и моделирование, которые позволяют наглядно увидеть и определить узкие места конкретного участка (рис. 1).

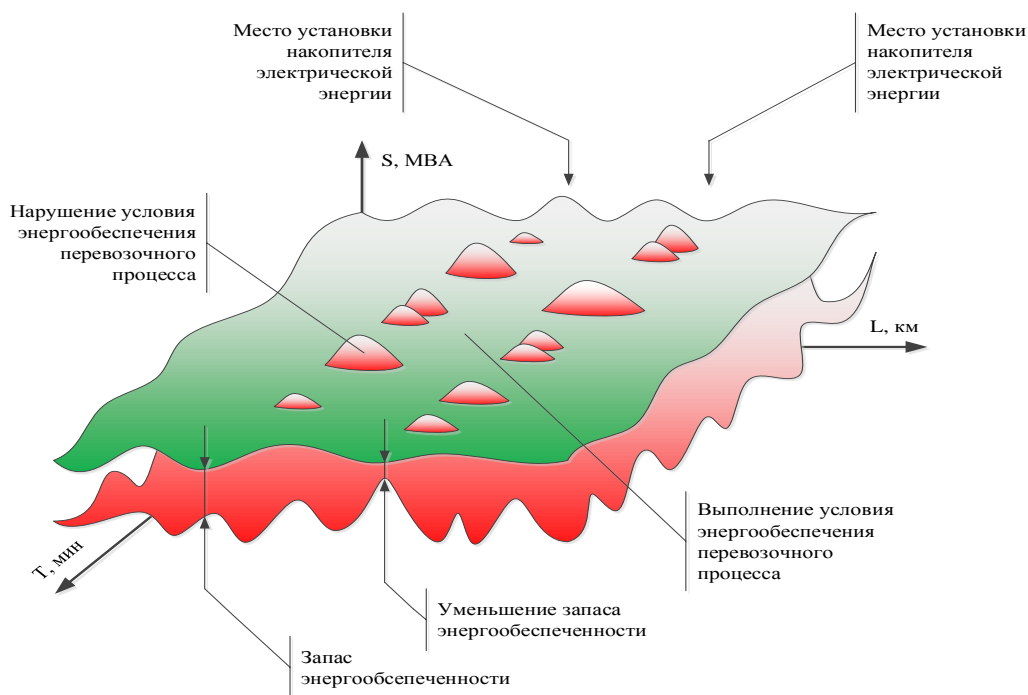


Рис. 1. Результаты расчёта и моделирования энергообеспеченности участка

Моделирование позволяет представить результаты расчёта в виде поверхностей. Верхняя поверхность графика образована возможностью системы тягового электроснабжения обеспечить энергией электроподвижной состав. Эта поверхность показывает возможности системы электроснабжения в энергообеспечении перевозочного процесса в конкретный момент времени, в конкретной точке участка железнодорожной линии. Нижняя поверхность образована потребностью электроподвижного состава и обусловлена массой поезда и профилем пути. Разность между двумя поверхностями образует запас энергообеспеченности системы электроснабжения на заданном участке. Его положительное значение означает штатный режим работы системы, отрицательное значение – нарушение условий энергообеспечения. В таких местах и должны устанавливаться накопительные системы.

В рамках исследований необходимо провести анализ участков, где возможна рекуперация, провести оценку энергетического потенциала и степени его использования при существующем оборудовании на тяговых подстанциях и размерах движения.

Тяговые расчеты и моделирование могут выполняться с применением специализированного программного комплекса с использованием общеизвестных формул и выражений. Исходными данными являются:

- 1) профиль участка (рис. 2);
- 2) график движения – случайный, соответствующий среднесуточным размерам движения по этому участку (рис. 3);
- 3) максимальная масса поездов;
- 4) минимальный межпоездной интервал;
- 5) период моделирования (с отдельным расчетом по мгновенным схемам).

Поскольку специализированный программный комплекс не способен моделировать работу накопителя, то все расчеты выполнялись с имитацией накопителя энергии в виде тяговой подстанции с инвертором, установленном в наиболее выгодном месте участка. Для каждой мгновенной схемы задавался уровень напряжения на накопителе, соответствующий режиму его работы.



Рис. 2. Пример профиля пути моделируемого участка

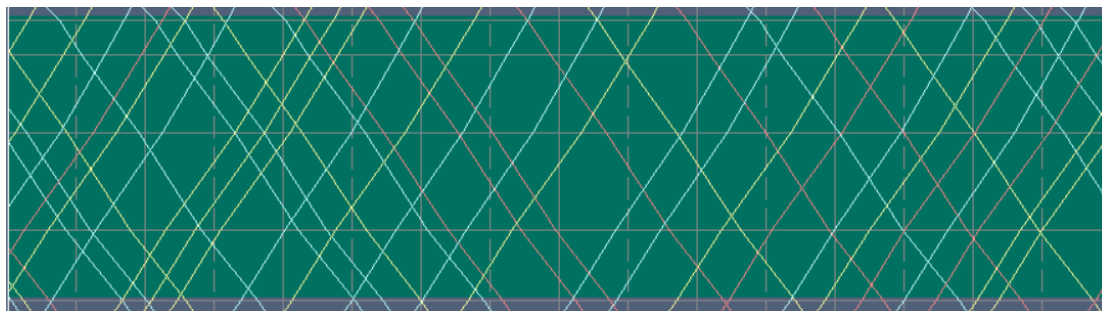


Рис. 3. Пример графика движения, соответствующий среднесуточным размерам движения по участку

Результаты расчетов и моделирования на каждом из рассматриваемых участков показали, что без использования накопительной системы расход электроэнергии может быть снижен в среднем на 4–4,5 %, а ключевой показатель – минимальный уровень напряжения на токоприемнике можно поддерживать в нормируемых пределах.

Такие результаты подтверждаются расчётами и моделированием на конкретном участке, который может быть принят как «характерный» или «типовой». Профиль «типового» участка соответствует рельефу и среднему перепаду высот профиля пути железной дороги в европейской части России. График движения – случайный, соответствующий среднесуточным размерам движения, максимальная масса поездов, минимальный межпоездной интервал также являются усреднёнными.

На примере «типового» участка и других усреднённых параметров получены следующие результаты:

а) без применения накопительной системы на тяговых подстанциях и постах секционирования расход электроэнергии составил – 301 097 кВт·ч, при этом минимальный уровень напряжения на токоприемнике – 2565 В (рис. 4, 5);

б) с применением накопительной системы на тяговых подстанциях и постах секционирования расход электроэнергии составил – 288 232 кВт·ч, при этом минимальный уровень напряжения на токоприемнике – 2637 В (см. рис. 4, 5).

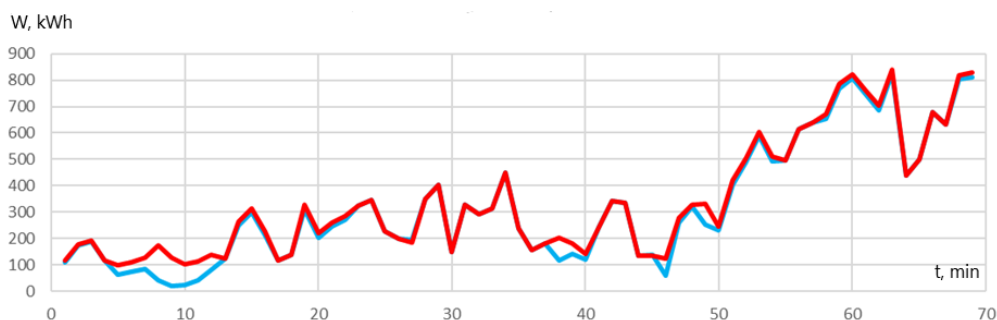


Рис. 4. График изменения расхода электроэнергии на тягу по заданному участку

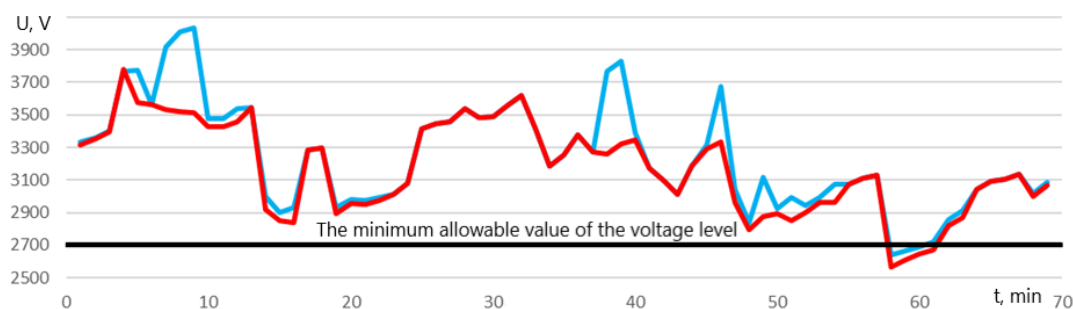


Рис. 5. График изменения уровня напряжения в контактной сети на заданном участке

В результате снижение расхода электроэнергии на тягу поездов по «типовому» участку составит 4,27 %. Экстраполируя полученные результаты на годовой объем электроэнергии, расходуемый на тягу по «типовому» участку, определим, что экономия электроэнергии составит 3 789 652 кВт·ч.

В связи с большим количеством участков электрифицированных железных дорог, имеющих сложный профиль пути, и, как следствие, высокий потенциал рекуперации электроэнергии, общая потребность в накопительных системах для транспорта весьма значительна. Предлагаемый подход учитывает перспективы развития транспортной инфраструктуры и предполагает высокую вероятность инвестирования средств в накопительные системы, позволяющие устранить узкие места, в том числе в части усиления системы тягового электроснабжения, особенно для пропуска поездов большой массы.

Предварительные исследования показали, что для электрифицированных железных дорог требуются накопители энергии с определенными характеристиками: их электрическая ёмкость должна быть не менее 300 кВт·ч, число циклов заряда/разряда не менее 100 000 раз, а мощность принимаемой и отдаваемой энергии не менее 1 МВт.

Заключение

Важным направлением в сфере электроснабжения железных дорог является разработка автоматизированных, а в большинстве случаев автоматических систем управления накопительными системами. Автоматическая система управления накопительной системой для железнодорожного транспорта будет отличаться от уже существующих систем управления. Такая система должна быть адаптирована под режимы работы оборудования в системе тягового электроснабжения и эффективно взаимодействовать с ним. Для обеспечения высокой точности входных параметров необходима автоматизированная система на базе ЭВМ и существующих систем контроля и управления, которая позволила бы расширить функциональные возможности системы управления тяговыми подстанциями железнодорожного транспорта и за счёт обработки множества взаимосвязанных параметров и управления накопительной системой повысить эффективность. Несмотря на все достоинства существующих систем управления накопительными системами, отсутствуют системы, адаптированные под особенности эксплуатации системы тягового электроснабжения железнодорожного транспорта.

Эффект от использования накопителей энергии на каком-либо участке может быть предварительно оценен по результатам научного исследования, но фактическое значение может быть получено только по результатам натурных испытаний опытного образца, поскольку эффект во многом зависит от фактического исполнения графика движения поездов.

Список литературы

- 1 **Гаранин, М. А.** Оценка рисков при переводе системы тягового электроснабжения с постоянного на переменный ток / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 1(73). – С. 13–17. – ISSN 1997-0722.
- 2 **Добрынин, Е. В.** Управление объектами системы тягового электроснабжения в концепции цифровой железной дороги / Е. В. Добрынин, И. А. Ефремова // Наука и образование транспорту. – 2018. – № 1. – С. 237–240. – EDN YZAGQP.
- 3 **Блинкова, С. А.** Актуальность использования накопителей энергии для системы тягового электроснабжения / С. А. Блинкова, Е. В. Добрынин, О. Н. Козменков // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 3(93). – С. 11–15. – EDN RVAYTV.
- 4 **Blinkova, S.** Development of an Energy System at a Railway Station Using a Gas Turbine Power Station / S. Blinkova, M. Garanin, E. Dobrynin // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 538–543. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.105.
- 5 **Добрынин, Е. В.** Оценка эффективности накопителя энергии в системе тягового электроснабжения / Е. В. Добрынин, Т. М. Шигапов, Н. Н. Федотов // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 1. – С. 324–326. – EDN TQJJVE.
- 6 Повышение надежности электроснабжения собственных нужд тяговых подстанций метрополитена с помощью накопителей энергии / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицина, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // Электротехника. 2020. – № 9. – С. 26–31. – ISSN 0013-5860.
- 7 **Шевлюгин, М. В.** О применении накопителей электрической энергии в системе электроснабжения мегаполиса на примере Москвы / М. В. Шевлюгин, А. Н. Стадников, А. С. Юдин // Электротехника. – 2020. – № 1. – С. 7–31. – ISSN 0013-5860.

References

- 1 **Garanin, M. A.** Risk assessment when transferring the traction power supply system from direct to alternating current / M. A. Garanin, S. A. Blinkova // Vestnik transporta Povolzhya – 2019. – No. 1(73). – P. 13–17. – ISSN 1997-0722.
- 2 **Dobrynin, E. V.** Management of objects of the traction power supply system in the concept of the digital railway / E. V. Dobrynin, I. A. Efremova // Science and education for transport. – 2018. – No. 1. – P. 237–240. – EDN YZAGQP.
- 3 **Blinkova, S. A.** The relevance of using energy storage devices for the traction power supply system / S. A. Blinkova, E. V. Dobrynin, O. N. Kozmenkov // Vestnik transporta Povolzhya. – 2022. – No. 3(93). – P. 11–15. – EDN RVAYTV.
- 4 **Blinkova, S.** Development of an Energy System at a Railway Station Using a Gas Turbine Power Station / S. Blinkova, M. Garanin, E. Dobrynin // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 may, 2020. – Novosibirsk, 2021. – P. 538–543. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.105.
- 5 **Dobrynin, E. V.** Evaluation of the energy storage efficiency in the traction power supply system / E. V. Dobrynin, T. M. Shigapov, N. N. Fedotov // Science and education for transport. – 2020. – No. 1. – P. 324–326. – EDN TQJJVE.
- 6 Improving the reliability of power supply for own needs of metro traction substations with the help of energy storage devices / M. V. Shevlyugin, A. E. Golitsina, M. N. Belov, D. S. Pletnev // Electrical engineering. 2020. – No. 9. – P. 26–31. – ISSN 0013-5860.
- 7 **Shevlyugin, M. V.** On the use of electric energy storage devices in the power supply system of a metropolis on the example of Moscow / M. V. Shevlyugin, A. N. Stadnikov, A. S. Yudin // Electrical engineering. – 2020. – No. 1. – P. 7–31. – ISSN 0013-5860.

M. A. Garanin, S. A. Blinkova

THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM MODELING USING THE ENERGY STORAGE

Abstract. The paper describes the results of the study devoted to assessing the relevance and prospects of using energy storage devices in the traction power supply system of the electrified railways. The authors proposed a scheme for connecting an energy storage device to a contact network and an algorithm for its operation. Based on the results of modeling in a specialized software package, a preliminary assessment of the relevance and prospects for the use of energy storage devices for the traction power supply system of the railway transport is given. In areas where recuperation is possible, the authors assessed the energy potential and the degree of its use with existing equipment at traction substations and the size of traffic. In addition, an analysis of the energy storage market for use in the traction power supply system of railways was carried out.

Keywords: railway, railway transport, traction power supply system, energy recovery, energy storage, technical requirements, modeling.

For citation: Garanin, M. A. The traction power supply system modeling using the energy storage / M. A. Garanin, S. A. Blinkova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 85–90. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_85.

Сведения об авторах

Гаранин Максим Алексеевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), доктор экономических наук, доцент, ректор, e-mail: garanin@samgups.ru

Блиноква Светлана Александровна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), кандидат технических наук, доцент, декан электротехнического факультета, e-mail: blinkova@samgups.ru

Information about the authors

Garanin Maksim Alekseevich

Samara State Transport University (SSTU), Doctor of Engineering Sciences, Professor, Rector of SSTU, e-mail: garanin@samgups.ru

Blinkova Svetlana Aleksandrovna

Samara State Transport University (SSTU), Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Dean of the Electrical Engineering Faculty, e-mail: blinkova@samgups.ru

В. В. Доманский

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ БАЗ ДАННЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Аннотация. Проведенные исследования параметров электроснабжения тяги поездов позволяют наполнить базы данных экспертных систем и повысить их качество для выбора энергосберегающих режимов работы электротяговых сетей. Проведены серии статистических измерений токов фидеров на тяговых подстанциях, питающих перегоны, станционную нагрузку и подъездные пути локомотивных депо, а также напряжений холостого хода смежных тяговых подстанций. Получены статистические характеристики фидерных нагрузок, питающих конечные граничные участки, станции, подъездные пути депо, железнодорожные узлы, напряжения холостого хода и углы δ между напряжениями холостого хода смежных тяговых подстанций. Предложены алгоритмы наполнения баз данных.

Ключевые слова: нагрузки фидеров, напряжение холостого хода, базы данных.

Для цитирования: Доманский, В. В. Параметры электроснабжения тяги поездов для наполнения баз данных имитационных моделей / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 91–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_91.

Введение

Применение энергосберегающих технологий систем тягового электроснабжения, минимизирующих энергетические затраты в процессе перевозок, требует создания информационных баз данных для интеллектуальных систем выбора рациональных схем питания электротяговых сетей [1–9].

Для наполнения информационных баз имитационных моделей участков электротяговой сети необходимо знание ряда параметров: тяговых нагрузок фидеров, напряжений холостого хода тяговых подстанций, удельных сопротивлений тяговой сети и внешней системы электроснабжения [10–15].

Цель работы – исследование параметров электроснабжения тяги поездов, необходимых при моделировании.

Исследование параметров электроснабжения тяги поездов

Нагрузки фидеров. Все фидеры, питающие контактную сеть, по специфике нагрузок можно подразделить на фидеры, питающие расчетный участок, концевые граничные участки, промежуточные станции, подъездные пути депо, крупные железнодорожные узлы, сортировочные станции. Определение нагрузок фидеров, питающих расчетные перегоны, производится на основе решения ряда последовательных моментных схем, создаваемых путем моделирования нагрузок подвижного состава и графика их движения по алгоритмам, приведенным в [5, 12–14].

На концевых граничных участках имитационной модели нагрузки фидеров питающие расчетные перегоны можно определять по функциям распределения путем разыгрывания величины тока на каждом шаге моделирования без воспроизведения графика движения поездов. Такой подход позволяет существенно увеличить скорость моделирования режимов работы электротяговых сетей для интеллектуальных систем управления тяговыми подстанциями.

Как известно [11, 12], ток фидера тяговой подстанции в начальной точке участка можно определить по формуле:

$$I_{\Phi}(t) = \sum_{k=0}^N I_k X_k(t), \quad (1)$$

где $X_k(t)$ связаны соотношениями $X_k(t) = X_{k+1}(t + \Delta)$. Поэтому ток фидера можно представить в виде:

$$I_{\Phi}(n\Delta) = \sum_{k=0}^N I_k X_{k+n}. \quad (2)$$

С одной стороны, ток J , потребляемый поездом, является случайной функцией времени, так как на него влияет большое количество случайных факторов (отклонение основного сопротивления движению, метеорологические условия, отклонение массы поезда, квалификация машиниста и т.п.). С другой стороны, он содержит очень существенную составляющую, являющуюся детерминированной функцией времени. Таким образом, случайный процесс $I_{\Phi}(t)$ является стационарным. Математическое ожидание и ковариационная функция определяются по формулам:

$$MI_{\Phi}(t) = \sum_{k=0}^N J_k Mx_k(t) = P \sum_{k=0}^N J_k = \frac{J_0 + \dots + J_{N+1}}{N+1} P(N+1), \quad (3)$$

$$DI_{\Phi}(t) = \sum_{k=1}^N J_k^2 DX_k(t) = p(1-p) \sum_{k=u}^N J_k^2 = \frac{J_0^2 + \dots + J_{N-1}^2}{N+1} P(N+1)(1-P), \quad (4)$$

$$\text{cov}(I_{\Phi}(t), I_{\Phi}(t+u\Delta)) = 0, \text{ если } U > N. \quad (5)$$

Наконец, при U меньше или равно N получим:

$$\begin{aligned} \text{cov}(I_{\Phi}(t), I_{\Phi}(t+u\Delta)) &= \text{cov}(I_{\Phi}(0), I_{\Phi}(u\Delta)) = \text{cov}(\sum_{k=0}^N J_k X_k \cdot \sum_{k=0}^N J_k X_{k+u}) = \\ &= \sum_{k=0}^N J_k J_{k-u} DX_k = P(1-P) \sum_{k=u}^N J_k J_{k-u} = \frac{J_0 J_u + \dots + J_{N-u} J_N}{N+1} P(N+1)(1-P). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь величина $P(N+1) = \lambda$ – интенсивность движения. При большом значении N , интенсивность λ фиксирована, а P – мало и, согласно центральной предельной теореме, ток фидера $I_{\Phi}(t)$ имеет нормальное распределение. Предельные значения (6) при $N \rightarrow \infty$ можно считать параметрами нормальной аппроксимации. Пусть поезд через время $\frac{l}{L} N\Delta$ приходит в точку l участка. Поскольку время прохождения участка $T = N\Delta$, то вместо дискретного набора токов J_0, \dots, J_N введем функцию $J(l)$, $0 \leq l \leq L$ с тем же смыслом, так что $J_k = J(\frac{K}{N}L)$. Тогда получим:

$$MI_{\Phi}(t) = \frac{\lambda \sum_{k=0}^N J(\frac{K}{N}L)}{N+1} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \lambda \frac{1}{L} \int_0^L J(l) dl = \lambda \bar{J}, \quad (7)$$

$$DI_{\Phi}(t) = \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N+1}\right) \frac{\sum_{k=0}^N J^2(\frac{K}{N}L)}{N+1} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \lambda \frac{1}{L} \int_0^L J^2(l) dl = \lambda J_*^2. \quad (8)$$

Для нахождения предела ковариации учтем, что следует положить $U = \frac{t}{\Delta} = \frac{t}{T} N$. При этом:

$$\text{cov}(I_{\Phi}(0), I_{\Phi}(u\Delta)) = \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N+1} \frac{\sum_{k=\frac{t}{T}N}^N J(\frac{K}{N}L) J(\frac{K-t}{T}N \frac{L}{N})}{N+1}\right) \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \lambda \frac{1}{L} \int_{\frac{t}{T}L}^L J(l) J\left(l - \frac{t}{T}L\right) dl = K(t). \quad (9)$$

На основании изложенного случайный процесс $I_{\Phi}(t)$ аппроксимируется гауссовским процессом $\tilde{I}_{\Phi}(t)$ с характеристиками: средним $\lambda \bar{J}$, дисперсией λJ_*^2 и ковариационной функцией $K(t)$. При этом $K(t) = 0$ при $t \geq T$. Введем случайную величину $Z(t_0)$ – долю времени на интервале $[0, t_0]$, которую процесс $\tilde{I}_{\Phi}(t)$ проводит выше некоторого уровня a . Тогда согласно [11]:

$$MZ(t_0) = 1 - \Phi\left(\frac{a - \lambda \bar{J}}{\sqrt{K(0)}}\right), \quad (10)$$

где $\Phi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{y^2}{2}} dy$.

Для дисперсии справедливо следующее выражение:

$$DZ(t_0) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[\Phi^{(n)}(\frac{a-\lambda J}{\sqrt{k(0)})}]^2}{n! [k(0)]^n} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) K^n(t) dt \quad (11)$$

или

$$DZ(t_0) = \frac{1}{\pi t_0} \int_0^{t_0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) dt \int_0^{\frac{k(t)}{k(0)}} \exp\left\{-\frac{(a-\lambda J)^2}{k(0)(1+v)}\right\} (1 - V^2)^{-\frac{1}{2}} dv. \quad (12)$$

Пусть теперь на этот же участок поступают поезда r типов и для каждого типа имеется своя функция $J_j(l)$, $1 \leq j \leq r$, а интенсивность движения поездов велика. Будем считать, что скорости поездов всех типов в каждом узле (точке) рассматриваемого участка одинаковы, а значит времена прохождения участка для поездов всех типов равны. Тогда параметризация l одна и та же для всех типов поездов и возможны два варианта описания входящего потока поездов. При первом варианте для каждого типа имеется свой поток поездов с интенсивностью λ_j и эти потоки накладываются друг на друга независимым образом, а при втором – поезд, поступающий в данный момент в начальную точку участка, является поездом J -го типа с вероятностью P_j ($J = 1, \dots, r$), $P_1 + \dots + P_r \leq 1$.

Можно показать, что при переходах к нормальной аппроксимации оба эти описания дают тот же гауссовский процесс. Поэтому будем пользоваться первым описанием, при котором проще добраться до итоговых формул. Действительно, для поездов i -го типа, как и раньше, можно ввести идеализированный гауссовский процесс $\tilde{I}_{\Phi} J_i(t)$ со средним $\lambda_j \bar{J}_j$ и ковариационной функцией $K_j(t)$ ($D\tilde{I}_{\Phi j}(t) = K_j(0)$). Суммарный ток фидера (идеализированный) определяется по формуле:

$$\tilde{I}_{\Phi \Sigma}(t) = \sum_{j=1}^r \tilde{I}_{\Phi j}(t). \quad (13)$$

В силу независимости он снова является гауссовским процессом со средним $\sum_{j=1}^r \lambda_j \bar{J}_j$ и ковариационной функцией $\sum_{j=1}^r K_j(t)$. Учет неравномерности движения поездов не отрицает гауссовского процесса $I_{\Phi \Sigma}(t)$.

В исследованиях [11] показано, что для описания токов фидеров, питающих перегоны, можно воспользоваться кривой распределения Пирсона третьего типа или усеченным нормальным законом. Если коэффициент использования пропускной способности расположен в интервале 0,45–0,65, то по данным работы [11] следует вместо распределения Пирсона использовать усеченный нормальный закон.

С целью проверки законов распределения токов фидеров, питающих перегоны, были проведены серии статистических измерений тока регистрирующими приборами на тяговых подстанциях (ТП) переменного и постоянного тока железных дорог. Результаты расчета основных числовых характеристик ряда выборок эмпирического распределения сведены в табл. 1. Значение критерия $\chi^2 = 21,7$ позволяет утверждать с вероятностью 0,2 для ряда выборок, что величина тока фидера, питающего перегон, соответствует нормальному распределению. В то же время для ряда выборок (значение критерия $\chi^2 = 20,1$ с вероятностью 0,2) величина тока фидера более соответствует логарифмически нормальному распределению. Эмпирические распределения I_{Φ} и логарифмически нормальное распределение с параметрами $I_{\Phi} = 163,6(A)$ и $\sigma_1 = 62,5(A)$ показаны на рис. 1, а. Результаты экспериментальной проверки случайной величины $Z(t_0)$, показывающей долю времени, которую процесс $\tilde{I}_{\Phi}(t)$ проводит выше некоторого уровня a , приведены в табл. 2.

Обычно крупные железнодорожные узлы, сортировочные станции, парки, депо питаются отдельными фидерами от шин ТП или постов секционирования. Законы распределения нагрузок этих фидеров неизвестны. С целью их установления были проведены серии статических измерений регистрирующими приборами на фидере, питающем станционную нагрузку и подъездные пути локомотивного депо. Результаты расчета основных числовых характеристик эмпирического распределения сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчета основных числовых характеристик
эмпирического распределения случайных величин**

Параметры эмпирических распределений	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Асимметрия	Экссесс	Коэффициент вариации
$I_{\phi 1}, \text{ A}$	143,67	62,55			
$I_{\phi 2}, \text{ A}$	107,61	45,92			
$I_{\phi c}, \text{ A}$	64,9	21,8	0,96	1,96	33,5
$\Delta U_x, \text{ кВ}$	0,122	1,0	-0,238	1,523	82193
$\sigma, \text{ град}$	1,576	0,877	-0,523	-0,523	55,67

По данным измерений построены теоретическая кривая логарифмически нормального распределения с параметрами $I_{\phi c} = 64.9(\text{A})$, $\sigma_I = 21.8(\text{A})$ и гистограмма тока фидера, питающего станционную нагрузку (рис. 1, б).

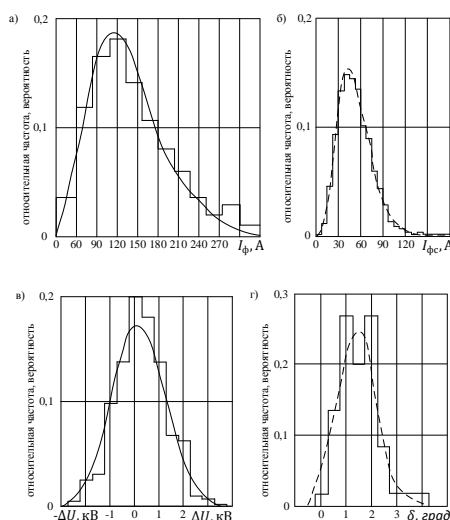


Рис. 1. Эмпирические распределения: токов фидеров, питающих перегоны I_{ϕ} , станционная нагрузка $I_{\phi c}$, модулей отклонений напряжения холостого хода ΔU , углов между напряжениями смежных подстанций δ

Значение критерия $\chi^2 = 29,5$ позволяет утверждать с вероятностью 0,1, что величина тока фидера, питающего станционную нагрузку, распределена по логарифмически нормальному закону:

$$F(I, \bar{I}, \sigma_I) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_I I \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_{max}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_I^2} (\ln I - \bar{I})^2\right], & \text{если } I > 0, -\infty < I < \infty, \sigma_I > 0, \\ 0 & \text{, в остальных случаях.} \end{cases} \quad (14)$$

Нагрузки станционных путей промежуточных станций создаются пусковыми токами электровазов и токами, потребляемыми электровазами на стоянках, а суммарная нагрузка определяется по формуле:

$$j(t) = (N_m - N_{\Pi} - N_{\Gamma})j_c + \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} j_{\text{пк}} + \sum_{j=1}^{N_{\Gamma}} j_{\Gamma j}, \quad (15)$$

где $j(t)$ – значение суммарного тока станционных путей промежуточной станции на момент времени t ; j_c – ток, потребляемый электровазом, для собственных нужд во время стоянки; $j_{\text{пк}}$ – пусковой ток в момент отправления k -го поезда с промежуточной станции; $j_{\Gamma j}$ – ток, потребляемый электровазом, при проходе промежуточной станции по главным путям без остановки; N_m – текущее количество поездов,

одновременно находящихся на промежуточной станции; $N_{п}$ – количество поездов на промежуточной станции, находящихся в режиме пуска; $N_{г}$ – количество поездов на главных путях.

Таблица 2

Результаты расчета основных числовых характеристик эмпирического распределения

Уровень	Теоретический	Эмпирический
Выбросы за уровни $\tilde{I}_{\Phi 1}$ и $\tilde{I}_{\Phi 2}$		
36,00/16,80	0,9574/0,9760	1,0000/1,0000
60,00/40,80	0,9095/0,9271	0,9608/0,9668
84,00/64,80	0,8300/0,8244	0,8252/0,8152
108,00/88,80	0,7158/0,6589	0,6701/0,6253
132,00/112,80	0,5740/0,4550	0,4902/0,3942
156,00/136,80	0,4219/0,2625	0,3611/0,2383
180,00/160,80	0,2807/0,1234	0,2589/0,1350
204,00/184,80	0,1674/0,0464	0,1755/0,0708
228,00/208,80	0,0888/0,0138	0,1189/0,0282
252,00/232,80	0,0416/0,0032	0,0653/0,0101
276,00/256,80	0,0172/0,0006	0,0428/0,0000
300,00	0,0062	0,0138
324,00	0,0012	0,000

Примечание. В числителе – выбросы за уровень $\tilde{I}_{\Phi 1}$;
в знаменателе – выбросы за уровень $\tilde{I}_{\Phi 2}$.

В процессе имитационного моделирования графика движения поездов величины N_m , N_p , N_g каждой промежуточной станции известны на каждом шагу моделирования. При этом удобно составить матрицу имитаций остановок IMS (рис. 2). Каждая строчка матрицы характеризует одну промежуточную станцию. Количество столбцов матрицы определяется количеством станционных путей. Элемент матрицы на пересечении i -й строки и j -го столбца указывает на наличие (1) или отсутствие (0) поезда на i -й промежуточной станции j -го пути.

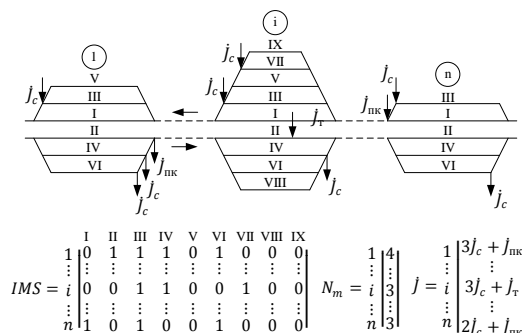


Рис. 2. Нагрузка станционных путей

Количество поездов на каждой станции можно определить, суммируя элементы столбцов соответствующей строки матрицы IMS:

$$N_m(i) = \sum_{j=1}^S IMS(i, j),$$

где S – максимальное количество станционных путей.

Суммарная нагрузка станционных путей на каждом шаге моделирования прикладывается к узлу промежуточной станции и учитывается при расчете моментных схем.

Напряжение холостого хода ТП. Теоретические предпосылки возможности вероятностного моделирования напряжения холостого хода на шинах ТП приведены в [1–3, 5, 11, 12]. Уместно отметить, что уравнильный ток может протекать по тяговой сети и за счет различных наклонов внешних характеристик ТП, а также при различных смежных нагрузках с расчетной фидерной зоной. С учетом сказанного, напряжение на шинах тяговой подстанции \dot{U}_x , необходимое для расчета уравнильного тока, следует определять по формуле:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{xx} - \Delta \dot{U}_c, \quad (16)$$

где \dot{U}_{xx} – напряжение холостого хода; $\Delta \dot{U}_c$ – падение напряжения в системе внешнего электроснабжения и на тяговом трансформаторе от нагрузок смежных фидерных зон.

Напряжение \dot{U}_x моделируется на каждой подстанции для двух фаз. При определении падения напряжения токи $\Delta \dot{U}_c$ смежных фидерных зон заранее рассчитываются в предположении равенства напряжения на шинах смежных ТП. На конечных граничных участках токи плеч питания смежных зон определяются в соответствии с заданным законом их распределения.

Процесс моделирования напряжений \dot{U}_x на шинах ТП происходит в несколько этапов. Сначала определяется модуль напряжения холостого хода по формуле:

$$U_{xx} = \bar{U}_{xx} \pm \Delta U_x, \quad (17)$$

где ΔU_x – случайная величина, определяемая в соответствии с нормальным усеченным законом.

Напряжение холостого хода \dot{U}_{xx} на одной из подстанций ориентируется в соответствии с фазой, питающей моделируемую зону. Затем моделируется угол δ и напряжение холостого хода смежной тяговой подстанции определяется на комплексной плоскости.

После того, как напряжение холостого хода \dot{U}_{xx} будет смоделировано для всех подстанций, определяется падение напряжения в системе внешнего электроснабжения и на тяговом трансформаторе от нагрузок смежных фидерных зон $\Delta \dot{U}_c$ и по формуле (16) рассчитывается напряжение \dot{U}_x для определения токораспределения, потерь напряжения в узлах схемы и потерь мощности электротяговых сетей.

Углы δ между напряжениями холостого хода смежных ТП можно измерить, имея на каждой из подстанций идентичные источники опорного напряжения. Практически такое решение вопроса трудно осуществить. Поэтому для определения углов δ была собрана схема с двухсторонним питанием. В этом случае в качестве опорного вектора, по отношению к которому можно измерять углы, взят уравнильный ток \dot{I}_y . Измерения производились в момент отсутствия поездов на фидерной зоне.

В процессе измерения модулей напряжения на шинах ТП $U_{ш1}$ и $U_{ш2}$ одновременно регистрировались уравнильные токи I_{y1} и I_{y2} , а также углы сдвига фаз φ_1 и φ_2 между напряжениями и уравнильными токами (рис. 3, а).

Для определения углов δ рассмотрим векторную диаграмму, показанную на рис. 3, б и рис. 3, в. Векторы напряжения на шинах смежных подстанций $\dot{U}_{ш1}$ можно построить, зная их измеренные модули и углы φ_1 и φ_2 по $\dot{U}_{ш2}$ отношению к уравнильному току. Падение напряжения на трансформаторах ТП от уравнильного тока без учета активной составляющей соответственно равны $I_y X_1$ и $I_y X_2$. Тогда напряжение холостого хода на шинах ТП легко найти по формуле:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{ш} + \dot{I}_y X. \quad (18)$$

Подставляя значение \dot{U}_x получим:

$$\delta = \arctg \frac{J_m \dot{U}_{\text{ш1}} + J_m i_{yX1}}{\text{Re} \dot{U}_{\text{ш1}}} - \arctg \frac{J_m \dot{U}_{\text{ш2}} + J_m i_{yX2}}{\text{Re} \dot{U}_{\text{ш2}}}, \quad (19)$$

где $\dot{U}_{\text{ш1}} = U_{\text{ш1}} e^{j\varphi_1}$; $\dot{U}_{\text{ш2}} = U_{\text{ш2}} e^{j\varphi_2}$.

В формуле (19) все величины могут быть измерены. Угол $\delta > \delta'$, если $\varphi_1 > \varphi_2 - 180^\circ$ и $\delta < \delta'$, если $\varphi_1 < \varphi_2 - 180^\circ$ и $\delta < \delta'$ (рис. 3, б и рис. 3, в).

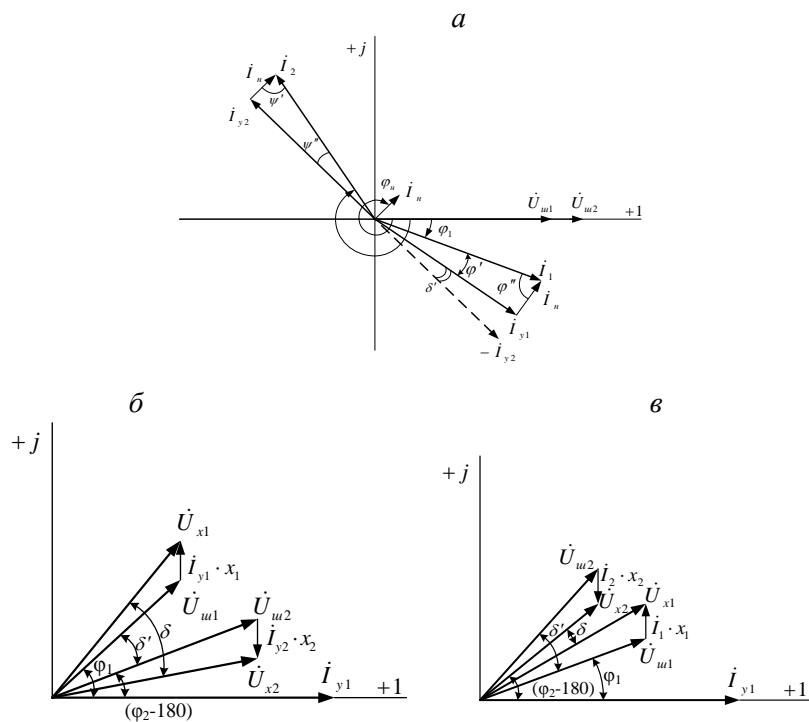


Рис. 3. Определение углов: а – углов φ_1 и φ_2 ;
б, в – между векторами напряжений смежных тяговых подстанций

Следует отметить, что на уравнительный ток может накладываться некоторый ток \dot{I}_H , обусловленный нагрузками станционных потребителей и емкостным током утечки (рис. 3, а).

Проведенные исследования параметров электроснабжения тяги поездов позволяют наполнить базы данных экспертных систем и повысить их качество для выбора энергосберегающих режимов работы электротяговых сетей.

Выводы

1 Для наполнения баз данных экспертных систем получены статистические характеристики фидерных нагрузок, питающих конечные граничные участки, станции, подъездные пути депо, железнодорожные узлы и напряжения холостого хода тяговых подстанций.

2 Напряжение холостого хода на одной из подстанций ориентируется в соответствии с фазой, питающей моделируемую зону. Угол δ между одноименными фазами тяговых подстанций моделируется для каждой межподстанционной зоны участка.

Список литературы

- ГОСТ Р 11-175. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 95 с.
- Свод правил «Тяговое электроснабжение железной дороги» (утв. приказом Министерства транспорта РФ от 2 декабря 2014 г. N 330). – 71 с.

References

- GOST R 11-175. Railway traction power supply systems. Method for selecting the main parameters : national standard of the Russian Federation: official publication. – Moscow : Standartinform, 2017. – 95 p.
- The set of rules "Traction power supply of the railway" (approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of December 2, 2014 N 330). – 71 p.

3 **Корниенко, В. В.** Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор) : монография / В. В. Корниенко, А. В. Котельников, В. Т. Доманский. – Киев : Транспорт Украины, 2004. – 196 с.

4 **Ильичева, В. В.** Базисы в задачах интеллектуального выбора маршрута при управлении транспортными потоками / В. В. Ильичева, А. Н. Гуда // Информатизация и связь. – 2022. – № 5. – С. 7–13. – DOI 10.34219/2078-8320-2022-13-5-7-13.

5 **Доманский, В. В.** Информационные технологии режимов работы тягового электроснабжения и питающих их энергосистем / В. В. Доманский, Г. А. Доманская, В. А. Васенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.

6 **Гридин, В. Н.** Нейронная сеть для прогнозирования нагрузок энергопотребления сортировочного узла / В. Н. Гридин, В. В. Доенин, В. С. Панищев, И. Д. Бысов // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 3. – С. 6–15. – DOI.org/10.30932/1992-3252-2019-17-3-6-15.

7 **Сивицкий, Д. А.** Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте / Д. А. Сивицкий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(57). – С. 33–41. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33.

8 **Незевак, В. Л.** Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типом профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей / В. Л. Незевак // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 34–44. – ISSN 1997-0722.

9 **Осипова, В. Э.** Применение нейросетевых методов прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте / В. Э. Осипова, Д. А. Яковлев // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 107–118. – DOI <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.107-118>.

10 **Скалозуб, В. В.** Интеллектуальные информационные технологии и системы железнодорожного транспорта : монография «Системные технологии моделирования сложных процессов» / В. В. Скалозуб, С. Ю. Цейтлин, М. С. Чередниченко. – Днепр : НМетАУ – ИВК «Системные технологии», 2016. – С. 560–589.

11 **Марквард, К. Г.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквард. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с. – ISBN В пер. (В пер.) : 1 p. 50 к.

3 **Kornienko, V. V.** Electrification of railways. World trends and prospects (Analytical review) : monograph / V. V. Kornienko, A. V. Kotelnikov, V. T. Domansky. – Kyiv : Transport of Ukraine, 2004. – 196 p.

4 **Ilyicheva, V. V.** Bases in the problems of intelligent route selection in the management of traffic flows / V. V. Ilyicheva, A. N. Guda // Informatization and Communication. – 2022. – No. 5. – P. 7–13. – DOI 10.34219/2078-8320-2022-13-5-7-13.

5 **Domansky, V. V.** Information technologies of operation modes of traction power energy and supplying their energy systems / V. V. Domansky, G. A. Domanskaya, V. A. Vasenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 3. – P. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.

6 **Gridin, V. N.** Neural network for predicting the power consumption loads of a marshalling yard / V. N. Gridin, V. V. Doenin., V. S. Panishchev, I. D. Bysov // World of Transport. – 2019. – V. 17. – No. 3. – P. 6–15. – DOI.org/10.30932/1992-3252-2019-17-3-6-15.

7 **Sivitsky, D. A.** Experience analysis and using prospects of artificial neural networks on railway transport / D. A. Sivitsky // Bulletin of the Siberian State University of Communications. – 2021. – No. 2(57). – P. 33–41. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33.

8 **Nezevak, V. L.** Improving the model of the influence of train schedule parameters on traction power consumption in direct and alternating current sections with type I and II track profile using regression models and neural networks / V. L. Nezevak // Bulletin of Transport of the Volga Region. – 2017. – No. 6. – P. 34–44. – ISSN 1997-0722.

9 **Osipova, V. E.** Application of neural network methods for forecasting power consumption in railway transport / V. E. Osipova, D. A. Yakovlev // Modern information technologies and IT education. – 2022. – Vol. 18. – No. 1. – P. 107–118. – DOI <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.107-118>.

10 **Skalozub, V. V.** Intelligent information technologies and systems of railway transport : monograph "System technologies for modeling complex processes" / V. V. Skalozub, S. Yu. Zeitlin, M. S. Cherednichenko. – Dnipro : NMetAU – IVK "System Technologies", 2016. – P. 560–589.

11 **Markvard, K. G.** Electricity supply of electrified railways / K. G. Markvard. – Moscow : Transport, 1982. – 528 p. – ISBN В пер. (В пер.) : 1 p. 50 к.

12 Contact Lines for Electric Railways : Planning, De-sign, Implementation, Maintenance, 3rd Edition / F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider // Wiley Publishers, 2017. – 994 p. – ISBN 978-3-895-78961-8.

13 Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / под ред. В. А. Веникова. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 456 с. – ISBN В пер. (В пер.) : 1 р. 30 к.

14 **Пелисье, Р.** Энергетические системы : пер. с франц. предисловие и коммент. В. А. Веникова / Р. Пелисье. – Москва : Высшая школа, 1982. – 568 с. – ISBN В пер. (В пер.) : 3 р. 10 к.

15 **Хашев, А. И.** Комбинированное имитационно-аналитическое моделирование в транспортно-логистических системах / А. И. Хашев, Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1(85). – С. 117–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_117.

12 Contact Lines for Electric Railways : Planning, De-sign, Implementation, Maintenance, 3rd Edition / F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider // Wiley Publishers, 2017. – 994 p. – ISBN 978-3-895-78961-8.

13 Electric power systems in examples and illustrations / ed. V. A. Venikov. – Moscow : Energoatomizdat, 1983. – 456 p. – ISBN В пер. (В пер.) : 1 p. 30 к.

14 **Pelissier, R.** Energy systems : per. from French foreword and comment. V. A. Venikov / R. Pelissier. – Moscow : Higher. school, 1982. – 568 p. – ISBN В пер. (В пер.) : 3 р. 10 к.

15 **Khashev, A. I.** Combined simulation-analytical modeling in transport and logistics systems / A. I. Khashev, E. A. Mamaev, A. N. Guda // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1(85). – P. 117–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_117.

V. V. Domansky

TRAIN TRACTION POWER SUPPLY PARAMETERS FOR FILLING SIMULATION MODEL DATABASES

Abstract. The conducted studies of train traction power supply parameters make it possible to fill the databases of expert systems and improve their quality in order to select energy-saving modes of operation of electric traction networks. A series of statistical measurements of feeder currents at traction substations supplying hauls, station load and access roads of locomotive depots, as well as open-circuit voltages of adjacent traction substations were carried out. Statistical characteristics of feeder loads supplying end boundary sections, stations, depot access roads, railway junctions, open-circuit voltages and angles δ between open-circuit voltages of adjacent traction substations are obtained. Algorithms for filling databases are proposed.

Keywords: feeder loads, idle voltage, databases.

For citation: Domansky, V. V. Train traction power supply parameters for filling simulation model databases / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 91–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_91.

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

Н. Н. Илюхин, К. В. Авдеева, Ю. М. Елизарова, Н. А. Чертолысова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ В МЕСТЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. К нетяговым потребителям относят устройства сигнализации, централизации и блокировки, силовые и осветительные нагрузки промежуточных станций, служебные и бытовые здания, локомотивные и вагонные депо. Полученные значения параметров планируется затем использовать при разработке и теоретическом обосновании метода поиска мест повреждения кабеля в условиях гальванического и индуктивного влияния электрифицированного железнодорожного транспорта. Для достижения данной цели проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях с помощью метода двух электродов, при использовании которого нет необходимости учитывать параметры дополнительного электрода. Для определения сопротивления и емкости границы раздела «металл – электролит» выведены формулы. В результате эксперимента получены зависимости переходных параметров в месте повреждения медной жилы кабеля ВВГ. Полученные значения переходных параметров в месте повреждения подземных кабелей электроснабжения железнодорожного транспорта будут использоваться при разработке и научном обосновании метода поиска мест повреждения кабеля в условиях гальванического и индуктивного влияния электрифицированного железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: кабель, повреждение, граница раздела сред, метод двух электродов, коррозия.

Для цитирования: Определение переходных параметров в месте повреждения подземных кабелей электроснабжения железнодорожного транспорта / Н. Н. Илюхин, К. В. Авдеева, Ю. М. Елизарова, Н. А. Чертолысова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 100–109. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_100.

Введение

Железнодорожный транспорт является источником сильного электромагнитного и гальванического воздействия. Именно в таких условиях, как правило, эксплуатируются кабели системы электроснабжения железнодорожного транспорта (в частности, кабели электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей). К нетяговым потребителям относят устройства сигнализации, централизации и блокировки, силовые и осветительные нагрузки промежуточных станций, служебные и бытовые здания, локомотивные и вагонные депо.

В Российской Федерации высокая доля электрифицированных дорог приходится на железнодорожный транспорт. В контактных сетях используется либо постоянный электрический ток, имеющий номинальное напряжение 3 кВ, либо переменный ток с промышленной частотой 50 Гц номинальным напряжением 25 кВ [1].

В районах с высокой долей промышленной инфраструктуры и вдоль железнодорожных путей наблюдается особый вид коррозии, которую вызывают блуждающие токи. Ответвляясь от трамвайных или железнодорожных рельсов, электролизеров, заземлений, данные токи возникают в почве. Коррозия вызывается постоянным и переменным током, однако действие постоянного тока представляет собой наибольшую опасность [2–4].

В местах повреждения изоляции металлические элементы кабеля (жила или оболочка) быстро разрушаются вследствие протекания коррозионного процесса. При этом, чтобы не допустить аварийную ситуацию, необходимо быстро и точно определить место повреждения кабеля. Существуют различные методы поиска повреждения кабеля, но они в ряде случаев не обеспечивают достаточную точность в условиях гальванического и индуктивного влияния электрифицированного железнодорожного транспорта. Для разработки и теоретического обоснования метода обнаружения места повреждения кабеля в условиях гальванического и индуктивного влияния электрифицированного железнодорожного транспорта необходимо заранее в лабораторных условиях определить переходные параметры в месте повреждения кабеля электроснабжения.

Цель работы – определение переходных параметров в месте повреждения кабелей электроснабжения железнодорожного транспорта (в частности, кабелей электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей) в лабораторных условиях. Полученные значения параметров планируется использовать при разработке и теоретическом обосновании метода обнаружения мест повреждения кабеля в условиях гальванического и индуктивного влияния электрифицированного железнодорожного транспорта.

Основная часть

Место повреждения подземного кабеля электроснабжения железнодорожного транспорта, при котором оголенная часть его металлических элементов (оболочки или жилы) имеет контакт с грунтом, можно представить в виде эквивалентной электрической схемы [5–7] (рис. 1).

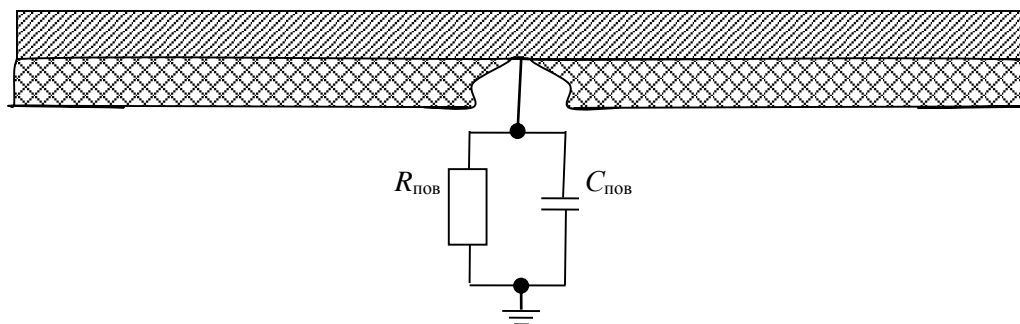


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема замещения места повреждения подземного кабеля

В месте повреждения образуется граница раздела двух сред:

- твердой – металла оболочки кабеля или жилы в месте повреждения;
- жидкой – водного раствора электролита, содержащегося в грунте.

Переходными параметрами токопроводящей жилы или металлической оболочки в месте повреждения подземного кабеля электроснабжения железнодорожного транспорта являются сопротивление и емкость границы раздела сред «металл – электролит».

Емкость $C_{пов}$ образована обкладками твердой и жидкой сред. Сопротивление $R_{пов}$ возникает за счет перехода заряженных частиц через границу раздела.

В работах [3, 5, 8–11] эксперимент проводился в лабораторных условиях с использованием дополнительного электрода из инертного материала, параметрами которого в расчетах пренебрегали, так как его площадь во много раз больше исследуемого:

$$\begin{cases} C_{д.э} \gg C_{пов}; \\ R_{д.э} \ll R_{пов}. \end{cases} \quad (1)$$

При экспериментальных исследованиях обеспечить выполнение неравенств (1) может быть затруднительно. В таком случае необходимость наличия дополнительного электрода, параметры которого будут участвовать в результатах измерений, является недостатком данного метода.

Предполагается, что данные недостатки будут отсутствовать у метода определения переходных параметров в месте повреждения кабеля на основе двух одинаковых электродов. В лабораторных условиях была спроектирована установка с двумя металлическими элементами кабеля, имеющими идентичные повреждения изоляции. Кабели были помещены в раствор электролита, обладающего сопротивлением $R_{эл}$. Полученную схему, представленную на рис. 2, рассматривают как двухполюсник, сопротивление которого равно:

$$Z = 2 \cdot \frac{R_{пов} \cdot \frac{1}{j\omega C_{пов}}}{R_{пов} + \frac{1}{j\omega C_{пов}}} + R_{эл}. \quad (2)$$

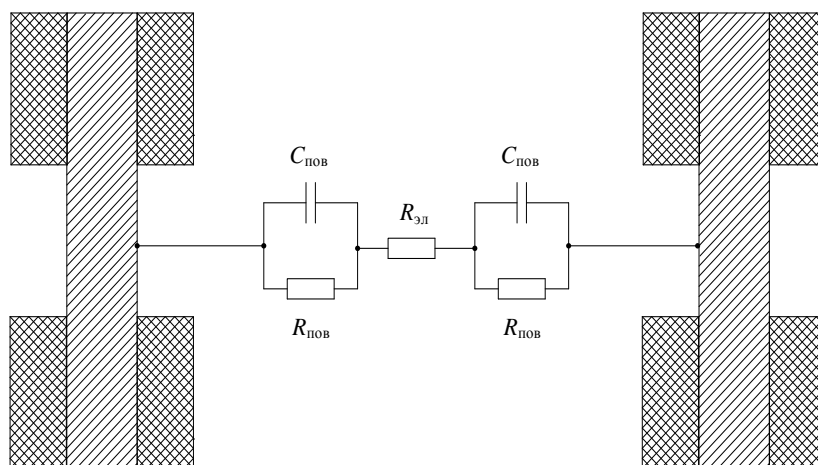


Рис. 2. Эквивалентная схема

На рис. 3 приведена схема измерения переходных параметров в месте повреждения кабеля методом двух электродов в лабораторных условиях; в этом случае участвует только среда и сами повреждения кабеля, параметры которых удваиваются.

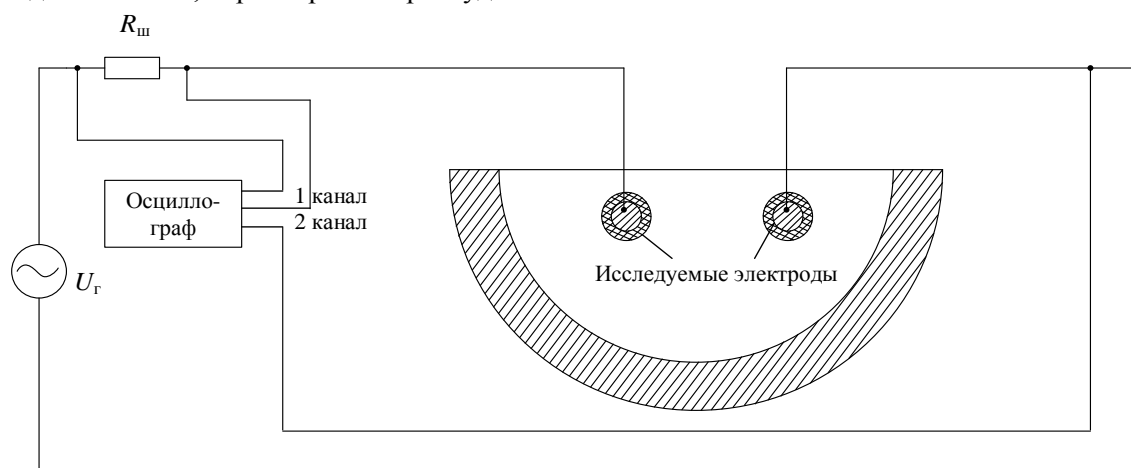


Рис. 3. Схема измерения методом двух электродов

На основе данного подхода проведен эксперимент. В эксперименте задействованы медные жилы силового кабеля ВВГ 3×1. Каждый из двух исследуемых электродов изготавливался из одной жилы кабеля. Для этого в середине жилы кабеля удалялась поливинилхлоридная изоляция с участка длиной 1 см с целью имитации повреждения. Затем исследуемые электроды помещались в ячейку полусферической формы диаметром 0,3 м, заполненную электролитом (водопроводная вода) с удельным сопротивлением 36 Ом·м.

На высоких частотах (выше 100 кГц) емкость $C_{пов}$ шунтирует сопротивление $R_{пов}$, следовательно, в двухполюснике останется только сопротивление $R_{эл}$.

С помощью осциллографа измерялось напряжение на шунте U_1 и напряжение между исследуемыми электродами U_2 , а также сдвиг фаз между U_1 и U_2 при синусоидальном напряжении генератора в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц.

На основе измеренных значений определялось комплексное сопротивление места повреждения изоляции кабеля по формуле:

$$Z_{пов} = \frac{U_2 \cdot R_{ш} - R_{эл} U_1}{2}, \quad (3)$$

где U_2 – напряжение между исследуемыми электродами, В;

U_1 – напряжение, измеренное на шунте, В;

$R_{ш}$ – сопротивление шунта, Ом.

Для определения сопротивления $R_{\text{пов}}$ и емкости $C_{\text{пов}}$ границы раздела «металл – электролит» на основе измеренных значений $Z_{\text{пов}}$ выведем формулы. Для этого найдем комплексное сопротивление параллельной RC -цепи:

$$Z_{\text{пов}} = \frac{R_{\text{пов}} \cdot \frac{1}{j\omega C_{\text{пов}}}}{R_{\text{пов}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{пов}}}}. \quad (4)$$

Упростим выражение (4):

$$Z_{\text{пов}} = \frac{R_{\text{пов}}}{j\omega C_{\text{пов}}} \cdot \frac{1}{R_{\text{пов}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{пов}}}} = \frac{R_{\text{пов}}}{j\omega R_{\text{пов}} C_{\text{пов}} + 1}. \quad (5)$$

Найдем действительную и мнимую части комплексного выражения (5). Для этого числитель и знаменатель умножим на комплексно-сопряженное $(1 - j\omega R_{\text{пов}} C_{\text{пов}})$. Получим:

$$Z_{\text{пов}} = \text{Re}(Z_{\text{пов}}) + j\text{Im}(Z_{\text{пов}}) = \frac{R_{\text{пов}}(1 - j\omega R_{\text{пов}} C_{\text{пов}})}{(j\omega R_{\text{пов}} C_{\text{пов}} + 1)(1 - j\omega R_{\text{пов}} C_{\text{пов}})} = \frac{R_{\text{пов}} - j\omega R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}}{1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что действительная часть равна:

$$\text{Re}(Z_{\text{пов}}) = \frac{R_{\text{пов}}}{1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2}. \quad (7)$$

Мнимая часть:

$$\text{Im}(Z_{\text{пов}}) = \frac{-\omega R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}}{1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2}. \quad (8)$$

Переведем данное комплексное сопротивление из алгебраической формы в показательную. Получим следующие выражения:

$$|Z_{\text{пов}}| = \sqrt{\frac{R_{\text{пов}}^2}{(1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2)^2} + \frac{\omega^2 R_{\text{пов}}^4 C_{\text{пов}}^2}{(1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2)^2}}. \quad (9)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\frac{-\omega R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}}{1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2}}{\frac{R_{\text{пов}}}{1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2}} = \arctg \frac{-\omega R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}} \cdot (1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2)}{R_{\text{пов}} \cdot (1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2)} = -\arctg(\omega R_{\text{пов}} C_{\text{пов}}). \quad (10)$$

Выполним преобразования выражения (9):

$$|Z_{\text{пов}}| = \sqrt{\frac{R_{\text{пов}}^2 + \omega^2 R_{\text{пов}}^4 C_{\text{пов}}^2}{(1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2)^2}} = \sqrt{\frac{R_{\text{пов}}^2(1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2)}{(1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2)^2}} = \sqrt{\frac{R_{\text{пов}}^2}{(1 + \omega^2 R_{\text{пов}}^2 C_{\text{пов}}^2)}} = \frac{R_{\text{пов}}}{\sqrt{1 + (\omega R_{\text{пов}} C_{\text{пов}})^2}}. \quad (11)$$

Из выражений (7), (8) и (10) можно сделать следующие выводы:

$$\frac{\operatorname{Im}(Z_{\text{пов}})}{\operatorname{Re}(Z_{\text{пов}})} = -\omega R_{\text{пов}} C_{\text{пов}}. \quad (12)$$

Из выражения (11) можно сделать следующие выводы:

$$\sqrt{\operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \operatorname{Im}^2(Z_{\text{пов}})} = \frac{R_{\text{пов}}}{\sqrt{1 + (\omega R_{\text{пов}} C_{\text{пов}})^2}}. \quad (13)$$

Подставим правую часть выражения (12) в равенство (13):

$$\sqrt{\operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \operatorname{Im}^2(Z_{\text{пов}})} = \frac{R_{\text{пов}}}{\sqrt{1 + \left(-\frac{\operatorname{Im}(Z_{\text{пов}})}{\operatorname{Re}(Z_{\text{пов}})}\right)^2}} \quad (14)$$

Из выражения (14) выразим $R_{\text{пов}}$:

$$R_{\text{пов}} = \sqrt{\operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \operatorname{Im}^2(Z_{\text{пов}})} \cdot \sqrt{1 + \left(-\frac{\operatorname{Im}(Z_{\text{пов}})}{\operatorname{Re}(Z_{\text{пов}})}\right)^2}. \quad (15)$$

Преобразуем выражение (15). Для этого возведём обе части данного равенства в квадрат:

$$R_{\text{пов}}^2 = (\operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \operatorname{Im}^2(Z_{\text{пов}})) \cdot \left(1 + \left(-\frac{\operatorname{Im}(Z_{\text{пов}})}{\operatorname{Re}(Z_{\text{пов}})}\right)^2\right). \quad (16)$$

Упростим выражение (16):

$$\begin{aligned} R_{\text{пов}}^2 &= \operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \operatorname{Im}^2(Z_{\text{пов}}) + \operatorname{Im}^2(Z_{\text{пов}}) + \frac{\operatorname{Im}^4(Z_{\text{пов}})}{\operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}})} = \\ &= \frac{\operatorname{Re}^4(Z_{\text{пов}}) + 2 \cdot \operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}}) \cdot \operatorname{Im}^2(Z_{\text{пов}}) + \operatorname{Im}^4(Z_{\text{пов}})}{\operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}})}. \end{aligned} \quad (17)$$

$$R_{\text{пов}}^2 = \frac{(\operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \operatorname{Im}^2(Z_{\text{пов}}))^2}{\operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}})} \quad (18)$$

Таким образом, $R_{\text{пов}}$ равняется:

$$R_{\text{пов}} = \frac{\operatorname{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \operatorname{Im}^2(Z_{\text{пов}})}{\operatorname{Re}(Z_{\text{пов}})}. \quad (19)$$

Найдём $C_{\text{пов}}$. Для этого из выражения (12) получим $R_{\text{пов}}$:

$$R_{\text{пов}} = -\frac{\operatorname{Im}(Z_{\text{пов}})}{\operatorname{Re}(Z_{\text{пов}})\omega C_{\text{пов}}}. \quad (20)$$

Подставим правую часть выражения (20) в выражение (18):

$$\frac{\text{Im}^2(Z_{\text{пов}})}{\text{Re}^2(Z_{\text{пов}})\omega^2 C_{\text{пов}}^2} = \frac{(\text{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \text{Im}^2(Z_{\text{пов}}))^2}{\text{Re}^2(Z_{\text{пов}})} \quad (21)$$

Из формулы (21) выразим $C_{\text{пов}}$:

$$C_{\text{пов}}^2 = \frac{\text{Im}^2(Z_{\text{пов}})}{(\text{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \text{Im}^2(Z_{\text{пов}}))^2 \cdot \omega^2} \quad (22)$$

Следовательно, $C_{\text{пов}}$ равно:

$$C_{\text{пов}} = \frac{\text{Im}(Z_{\text{пов}})}{(\text{Re}^2(Z_{\text{пов}}) + \text{Im}^2(Z_{\text{пов}})) \cdot \omega} \quad (23)$$

По полученным выражениям (19) и (23) рассчитаем значения переходных параметров $R_{\text{пов}}$ и $C_{\text{пов}}$ на основе измеренных в лабораторных условиях значений $Z_{\text{пов}}$.

Таким образом, на основе результатов эксперимента, проведенного в лабораторных условиях, рассчитаны значения переходных параметров $R_{\text{пов}}$ и $C_{\text{пов}}$ в месте повреждения изоляции медной жилы кабеля ВВГ, площадь поверхности которой $0,0054 \text{ см}^2$, в зависимости от частоты измерительного сигнала (рис. 4 и 5).

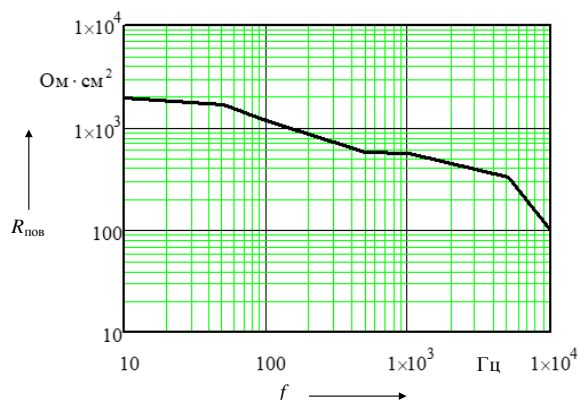


Рис. 4. Зависимость сопротивления $R_{\text{пов}}$ в месте повреждения изоляции кабеля от частоты измерительного сигнала

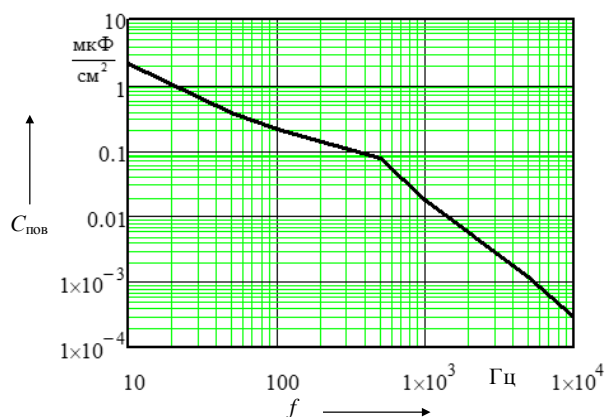


Рис. 5. Зависимость емкости $C_{\text{пов}}$ в месте повреждения изоляции кабеля от частоты измерительного сигнала

Из графиков видно, что сопротивление и емкость переходных параметров в месте повреждения изоляции кабеля значительно снижаются с ростом частоты протекающего тока. Это означает, что при разработке и научном обосновании метода обнаружения мест повреждения кабеля в условиях гальванического и индуктивного влияния электрифицированного железнодорожного транспорта необходимо с учетом переходных параметров повреждения выбрать такую частоту измерительного сигнала, чтобы, с одной стороны, обеспечить максимальное изменение измерительного сигнала в месте повреждения, что повысит чувствительность метода. А с другой стороны, выбор должен быть таким, чтобы на частоте измерительного сигнала помехи от контактной сети, электрифицированной железной дороги были минимальны.

Определенные по предложенной методике в лабораторных условиях значения переходных параметров в месте повреждения $R_{\text{пов}}$ и $C_{\text{пов}}$ будут использованы для расчета токораспределения измерительного сигнала в кабеле электроснабжения железнодорожного транспорта с поврежденным покрытием. При подаче в кабель измерительного сигнала в месте повреждения за счет утечки части тока через повреждение (см. рис. 1) будет наблюдаться скачок амплитуды и фазы измерительного сигнала. Что в дальнейшем будет использовано при реализации метода поиска повреждения кабеля и разработке аппаратуры.

Выводы

Таким образом, в статье для определения переходных параметров в месте повреждения подземных кабелей электроснабжения железнодорожного транспорта в лабораторных условиях предлагается использовать метод двух электродов, при применении которого нет необходимости учитывать параметры дополнительного электрода. Также проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях и определено, что полученные переходные параметры в месте повреждения зависят от частоты протекающего тока при определенном значении удельного сопротивления среды. Этот факт необходимо учитывать при разработке и научном обосновании метода обнаружения мест повреждения кабеля в условиях гальванического и индуктивного влияния электрифицированного железнодорожного транспорта. Полученные значения переходных параметров в месте повреждения также в дальнейшем будут использоваться для расчета токораспределения в кабелях электроснабжения железнодорожного транспорта с поврежденным покрытием.

Список литературы

- 1 **Марквардт, К. Г.** Справочник по электроснабжению железных дорог : в 2 томах / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1980. – 256 с.
- 2 **Котельников, А. В.** Блуждающие токи электрифицированного транспорта / А. В. Котельников. – Москва : Транспорт, 1986. – 279 с.
- 3 **Кандаев, В. А.** Совершенствование эксплуатационного контроля коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта : монография / В. А. Кандаев. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2003. – 198 с. – ISBN 5-94941-015-7.
- 4 **Котельников, А. В.** Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта : монография / А. В. Котельников, В. А. Кандаев. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2013. – 552 с. – ISBN 978-5-89035-627-7.

References

- 1 **Marquardt, K. G.** Handbook of railway power supply: in 2 volumes / C. G. Marquardt. – Moscow : Transport, 1980. – 256 p.
- 2 **Kotelnikov, A.V.** Wandering currents of electrified transport / A. V. Kotelnikov. – Moscow : Transport, 1986. – 279 p.
- 3 **Kandaev, V. A.** Improving the operational control of the corrosion state of underground structures of railway transport power supply systems : monograph / V. A. Kandaev. – Omsk : Omsk State Transport University, 2003. – 198 p. – ISBN 5-94941-015-7.
- 4 **Kotelnikov, A. V.** Stray currents and operational control of the corrosion state of underground structures of railway transport power supply systems: monograph / A. V. Kotelnikov, V. A. Kandaev. – Moscow : UMTs ZHDT, 2013. – 552 p. – ISBN 978-5-89035-627-7.

5 **Елизарова, Ю. М.** Совершенствование методов и аппаратных средств поиска мест повреждения кабелей электроснабжения железнодорожных нетяговых потребителей : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ю. М. Елизарова ; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2009. – 156 с.

6 **Кандаев, В. А.** Определение параметров границы раздела «металл – электролит» / В. А. Кандаев, Ю. М. Елизарова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 1. – С. 294–296. – ISSN 2071-3827.

7 **Кандаев, В. А.** Параметры повреждения изолирующего полимерного покрытия оболочки кабеля / В. А. Кандаев, Ю. М. Елизарова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 2. – С. 263–266. – ISSN 2071-3827.

8 **Слептерева, Н. К.** Совершенствование технического обслуживания кабелей электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Н. К. Слептерева ; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2014. – 119 с.

9 **Ерита, А. М.** Экспериментальные исследования параметров границы раздела «металл – электролит» для электродов малых размеров / А. М. Ерита, В. А. Кандаев, К. В. Авдеева // Сборник научных трудов Российской академии естественных наук. Сибирский научный вестник. – 2010. – Вып. 13. – С. 271 – 276. – ISBN 978-5-8119-0393-1.

10 **Кандаев, В. А.** Переходное сопротивление в местах повреждения полимерного изолирующего покрытия кабеля / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, Н. К. Слептерева // Надежность функционирования и информационная безопасность телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта : материалы всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2013. – С. 119–127.

5 **Elizarova, Yu. M.** Improvement of methods and hardware for searching for places of damage to power supply cables of railway non-traction consumers : specialty 05.22.07 «Rolling stock of railways, train traction and electrification»: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Y. M. Elizarova ; Omsk State Transport University. – Omsk, 2009. – 156 p.

6 **Kandaev, V. A.** Determination of the parameters of the “metal-electrolyte” interface / V. A. Kandaev, Yu. M. Elizarova // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. – 2008. – No. 1. – P. 294–296. – ISSN 2071-3827

7 **Kandaev V. A.** Damage parameters of the insulating polymer coating of the cable sheath / V. A. Kandaev, Yu. M. Elizarova // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. – 2008. – No. 2. – P. 263–266. – ISSN 2071-3827.

8 **Sleptereva, N. K.** Improving the maintenance of power supply cables for non-traction railway consumers : 05.22.07 «Railway rolling stock, train traction and electrification» : thesis for the degree of candidate of technical sciences / N. K. Sleptereva ; Omsk State Transport University. – Omsk, 2014. – 119 p.

9 **Erita, A. M.** Experimental studies of the parameters of the "metal-electrolyte" interface for small electrodes/ A. M. Yerita, V. A. Kandaev, K. V. Avdeeva // Collection of scientific works of the Russian Academy of Natural Sciences. Siberian Scientific Bulletin. – 2010. – Issue. 13. – P. 271–276. – ISBN 978-5-8119-0393-1.

10 **Kandaev, V. A.** Transitional resistance in places of damage to the polymeric insulating coating of the cable / V. A. Kandaev, K. V. Avdeeva, N. K. Sleptereva. // Reliability of functioning and information security of telecommunication systems of railway transport : Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Internet Conference with International Participation. – Omsk : Omsk State Transport University, 2013. – P. 119–127.

11 **Якунчихина, Н. К.** Определение параметров границы раздела «металл – электролит» повреждения оболочки кабеля в полимерном изолирующем покрытии / Н. К. Якунчихина, П. В. Алексеева, О. В. Пиндюк // Материалы XLII Международной научно-практической конференции КазАТК им. М. Тынышпаева на тему «Инновационные технологии на транспорте : образование, наука, практика». – Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева, 2018. – Том 2. – С. 54–58. – ISBN 978-601-325-029-8.

11 **Yakunchikhina, N. K.** Determination of the parameters of the interface "metal – electrolyte" damage to the cable sheath in a polymer insulating coating / N. K. Yakunchikhina, P. V. Alekseeva, O. V. Pindyuk // Proceedings of the XLII International Scientific and Practical Conference of KazATC named after. M. Tynyshpaev on the topic "Innovative technologies in transport : education, science, practice". – Almaty : Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev, 2018. – Volume 2. – P. 54–58. – ISBN 978-601-325-029-8.

N. N. Ilyukhin, K. V. Avdeeva, Yu. M. Elizarova, N. A. Chertolysova

DETERMINATION OF TRANSIENT PARAMETERS AT THE POINT OF DAMAGE UNDERGROUND CABLES FOR POWER SUPPLY OF THE RAILWAY TRANSPORT

Abstract. Non-traction consumers include signaling, centralization and blocking devices, power and lighting loads of intermediate stations, office and household buildings, locomotive and wagon depots. The obtained values of the parameters are planned to be used later in the development and theoretical justification of the method for searching for cable damage points under the conditions of galvanic and inductive influence of electrified railway transport. To achieve this goal, experimental studies were carried out in laboratory conditions using the two-electrode method, when using which there is no need to take into account the parameters of an additional electrode. Formulas are derived to determine the resistance and capacitance of the metal-electrolyte interface. As a result of the experiment, the dependences of the transient parameters at the point of damage to the copper core of the VVG cable were obtained. The obtained values of transient parameters at the point of damage to underground cables of power supply of railway transport will be used in the development and scientific substantiation of a method for finding cable damage points under the conditions of galvanic and inductive influence of the electrified railway transport.

Keywords: cable, damage, interface, two-electrode method, corrosion.

For citation: Determination of transient parameters at the point of damage underground cables for power supply of the railway transport / N. N. Ilyukhin, K. V. Avdeeva, Yu. M. Elizarova, N. A. Chertolysova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 100–109. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_100.

Сведения об авторах

Илюхин Никита Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети»,
аспирант,
e-mail: nekit-exe@mail.ru

Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: avdeeva_kv@mail.ru

Елизарова Юлия Михайловна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

Information about the author

Ilyukhin Nikita Nikolayevich

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Telecommunication, Radio Engineering Systems and Networks»,
Postgraduate Student,
e-mail: nekit-exe@mail.ru

Avdeeva Kseniya Vasilevna

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Telecommunication, Radio Engineering Systems and Networks»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: avdeeva_kv@mail.ru

Elizarova Yulia Mikhailovna

Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Information Security»,

кафедра «Информационная безопасность»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: yuel@yandex.ru

Чертолысова Наталья Александровна
Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС),
кафедра «Телекоммуникационные,
радиотехнические системы и сети»,
студент,
e-mail: nataliachertolysova@yandex.ru

Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: yuel@yandex.ru

Chertolysova Natalia Alexandrovna
Omsk State Transport University (OSTU),
Chair «Telecommunication, Radio Engineering
Systems and Networks»,
Student,
e-mail: nataliachertolysova@yandex.ru

А. В. Костюков, В. Д. Верескун

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСТОЧНИКОВ ВИБРАЦИИ И ШУМА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ *

Аннотация. Работа силовых трансформаторов сопровождается вибрацией и шумом элементов конструкций силового трансформатора. В работе апробирована методика расчёта вибрации и шума вспомогательного оборудования системы охлаждения силового трансформатора. В качестве основного источника шума системы охлаждения силового трансформатора рассматривался асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4А100S4У3. Проведены различные варианты исследований вибрации и шума асинхронного двигателя при питании от источника промышленной частоты и преобразователя напряжения. Определены амплитуды пространственно-временных волн магнитной индукции, соответствующие модам пространственных колебаний статора и ротора, в процессе исследований были также рассчитаны амплитуды колебания (вибрации) статора и ротора, соответствующие модам пространственных колебаний. Даны рекомендации по снижению вибрации и шума системы охлаждения силовых трансформаторов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, шум и вибрация, асинхронный двигатель, широтно-импульсная модуляция, магнитная система, частота моды, ротор, статор, магнитное поле, потокосцепление, индуктивность, электромагнитный момент.

Для цитирования: Костюков, А. В. Методология исследований источников вибрации и шума системы охлаждения силовых трансформаторов / А. В. Костюков, В. Д. Верескун // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 110–123. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_110.

Введение

Основным элементом всех энергетических хозяйств городов, районов и предприятий являются силовые трансформаторы, которые могут располагаться в зонах жилых застроек, на территории подстанций, заводов, цехов и других хозяйственных субъектов. Многие направления научных изысканий были направлены на изучение шума силовых трансформаторов, определение источников шума, разработку организационно-технических мероприятий по снижению шума силовых трансформаторов. Хочется отметить, что силовой трансформатор при эксплуатации издаёт монотонный постоянный гул, который будет наблюдаться и при работе трансформатора на холостом ходу и под нагрузкой, шумовое воздействие силового трансформатора неблагоприятно влияет на здоровье работников предприятий и жителей домов, прилегающих к трансформаторным подстанциям [1, 2].

Поэтому исследования в области источников вибрации и генерации шума элементов конструкции силовых трансформаторов являются весьма актуальными и требуют комплексного подхода при рассмотрении источников шума не только основных элементов конструкции, таких как магнитопровод и обмотки, но и вспомогательных устройств – системы охлаждения силовых трансформатора.

Постановка задачи

Системы охлаждения силовых трансформаторов могут быть выполнены в виде естественного воздушного охлаждения, масляного охлаждения и с дутьём воздуха, масляного охлаждения с дутьём и принудительной циркуляцией трансформаторного масла. С акустической точки зрения электрический двигатель можно рассматривать как систему, состоящую из различных материалов, которые вибрируют, ударяются, трутся под воздействием различных сил (электрическими, магнитными, механическими, аэродинамическими). Следовательно, величины шума и вибрации электрической машины будут определяться её конструктивными и техническими характеристиками. При максимальной нагрузке мощных силовых трансформаторов шум, издаваемый принудительной системой охлаждения,

* Работа выполнена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

может лежать в диапазоне 50–90 дБ, поэтому проанализируем работу вспомогательных устройств системы охлаждения трансформаторов.

В качестве привода вспомогательных механизмов системы охлаждения силовых трансформаторов наибольшее распространение получили асинхронные двигатели мощностью 1,5–3 кВт. Проведём исследование на предмет вибрации и шума асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором 4A100S4У3 мощностью 3 кВт и синхронной частотой вращения 1500 об/мин.

Двигатель является трехфазным, с числом пар полюсов, равным двум. Представленная методика расчётов выполнена при питании АД от трёхфазной сети промышленной частоты и от преобразователя с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения.

Параметры номинального режима этого АД, по данным [3], следующие:

$U_{\text{н}} = 220$ В – номинальное напряжение (фазное);

$f_{\text{н}} = 50$ Гц – частота питающего напряжения;

$P_{\text{н}} = 3000$ Вт – номинальная мощность;

$n = 1435$ об/мин – номинальная частота вращения;

$\eta_{\text{н}} = 0,82$ – КПД в номинальном режиме;

$\cos \varphi_{\text{н}} = 0,83$ – косинус угла сдвига между током и напряжением в номинальном режиме.

В [3] приведены следующие данные о размерах магнитной системы рассматриваемого АД (рис. 1):

$D_{a1}/D_{i1} = 168/105$ мм – внешний и наружный диаметр магнитопровода статора;

$l_{\delta} = 100$ мм – длина магнитопровода вдоль воздушного зазора;

$\delta = 0,3$ мм – воздушный зазор;

$N_{z_s} / N_{z_r} = 36/28$ – количество пазов статора и ротора;

$a/b = 101/101$ мм – расстояние от левой и правой опор вала до центра масс статора.

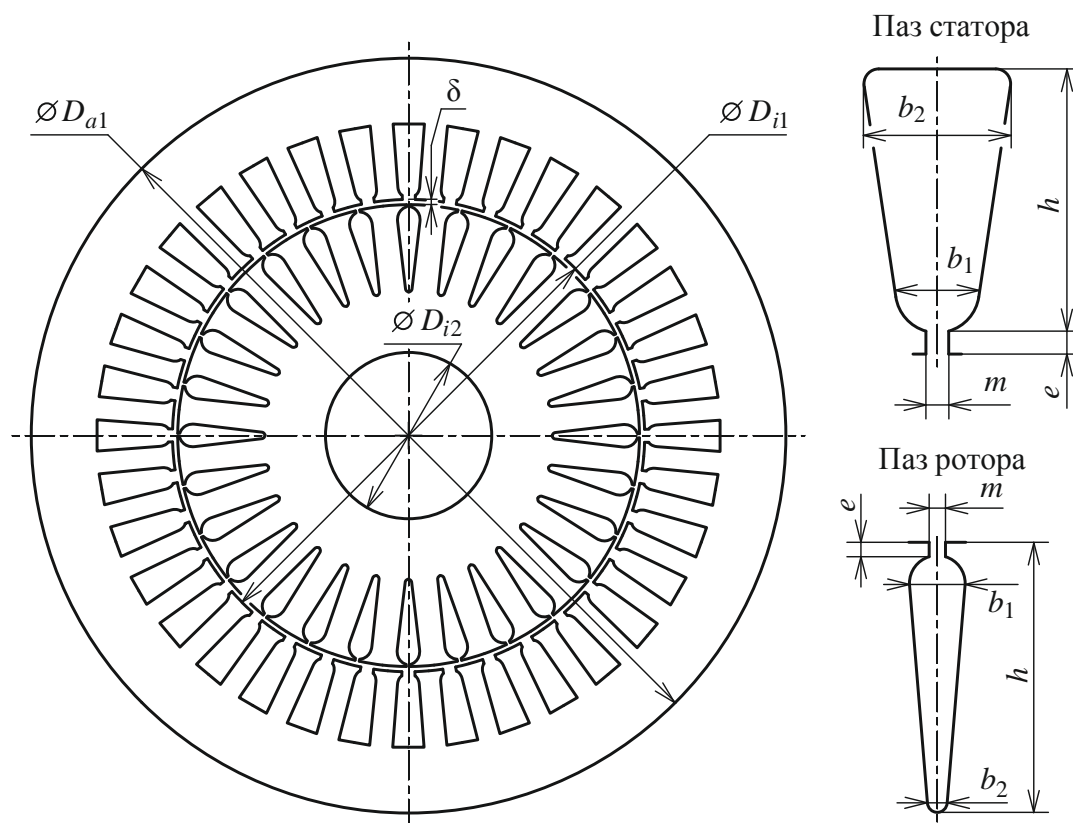


Рис. 1. Обозначение размеров магнитной системы, пазов статора и ротора АД 4A100S4У3

Размеры паза статора: $b_1/b_2 = 4,9/7,1$ мм; $h = 15,8$ мм; $e/m = 0,5/3$ мм.

Обмотка статора имеет 35 витков и выполнена из медного провода диаметром 1,12/1,3 мм (без изоляции и с изоляцией).

Размеры паза ротора: $b_1/b_2 = 5,1/1,5$ мм; $h = 19,3$ мм; $e/m = 0,5/1$ мм.

Короткозамкнутая обмотка ротора типа «беличья клетка» выполнена из алюминия. Магнитопроводы статора и ротора выполнены из листовой электротехнической стали марки 2013 с толщиной листа 0,5 мм.

Для рассматриваемого двигателя был выполнен расчет собственных частот мод пространственных колебаний. Для этого были определены массы ярма и зубцов статора:

$$G_y = \rho l_s \left[\pi \left(R_m + \frac{h_s}{2} \right)^2 - \pi \left(R_m - \frac{h_s}{2} \right)^2 \right]; \quad (1)$$

$$G_z = \rho l_s b_s h_s N_{Zs},$$

где b_s , h_s – средняя ширина и полная высота зубца статора.

Для двигателя 4A100S4Y3, размеры которого приведены выше, были получены следующие значения:

$$G_y = 5,660 \text{ кг}; G_z = 2,303 \text{ кг}.$$

Масса обмотки статора с учетом лобовых частей по данным [4] равна: $G_w = 2,85 \text{ кг}$.

Для рассматриваемого двигателя собственную частоту моды с номером $r = 0$ изгибных колебаний статора можно определить по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_m} \sqrt{\frac{E}{\Delta \rho_s}}, \quad (2)$$

В расчетах приняты следующие значения плотности материала и модуля упругости магнитопровода: $\rho_s = 7850 \text{ кг/м}^3$; $E = 210 \cdot 10^9 \text{ Па}$. Собственная частота моды с номером $r = 0$ изгибных колебаний статора исходя из (2) составила: $f_0 = 7693,33 \text{ Гц}$.

Для определения собственных частот мод пространственных колебаний с номерами $r = 3, 4, 5$ можно воспользоваться выражением:

$$f_r = f_0 i \frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 - 1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + i^2 \left(\frac{r^2 - 1}{r^2 + 1} \right) \left[3 + r^2 \left(4 + \frac{\Delta_m}{\Delta} \right) \right]}}. \quad (3)$$

Исходя из (3) получаем собственные частоты мод: $f_3 = 1116,85 \text{ Гц}$; $f_4 = 2927,86 \text{ Гц}$; $f_5 = 7508,31 \text{ Гц}$; Для определения первой частоты изгибных колебаний ротора ($r = 1$) воспользуемся формулой:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{M_1}}. \quad (4)$$

Жесткость свободно опирающейся балки (вала) определим исходя из выражения [13, 14]

$$k_s = 3 \frac{EI_s L}{a^2 b^2} = \frac{3\pi}{64} \cdot \frac{El}{a^2 b^2} d^4, \quad (5)$$

где I_s – момент инерции вала, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

l – расстояние между опорами, на которые опирается вал, м;

a, b – расстояние от левой и правой опор до центра масс статора, м.

С учетом расчётных формул (4), (5) частота изгибных колебаний ротора ($r = 1$) составит:

$$f_1 = 645,53 \text{ Гц}.$$

Расчет распределения магнитного поля выполнялся с использованием программного комплекса FEMM v.4.2 (© David Meeker) [5]. С помощью данного программного комплекса могут решаться два класса задач: задача магнитостатики и расчет распределения поля при переменном (синусоидальном) токе в двумерной постановке. Одной из возможностей программного комплекса FEMM является наличие граничных условий для расчета систем с симметричным или повторяющимся магнитным полем.

Также в программном комплексе FEMM имеются специальные граничные условия типа «воздушный зазор», позволяющие менять взаимное положение статора и ротора без необходимости изменения конфигурации расчетной области. Учитывая то, что на один полюс рассматриваемого АД приходится целое число пазов как на статоре, так и на роторе, это позволяет выполнять расчеты только

для одного полюса. Расчетная область в этом случае составляет одну четвертую от магнитной системы, что существенно сокращает время вычислений.

Конфигурация расчетной области для расчета распределения магнитного поля в программном комплексе FEMM приведена на рис. 2, где показано распределение токов по токонесущим областям статора и ротора. Обмотка статора представлена областями $A+$, $B-$, $C+$, ротора – областями $IR1 - IR7$. Считается, что за пределами расчетной области поля нет, поэтому дуги, соответствующие внешней поверхности статора и внутренней поверхности ротора, имеют граничные условия типа $A_z = 0$.

Левая и правая границы расчетной области имеют граничные условия типа Antiperiodic, задающие симметрию. Между магнитопроводами статора и ротора расположены дуги с граничными условиями типа Antiperiodic Air Gap, определяющие наличие воздушного зазора. На рис. 3 показан фрагмент расчетной области в укрупненном масштабе. Кривая намагничивания электротехнической стали, из которой сделаны магнитопроводы статора и ротора, приведена на рис. 4.

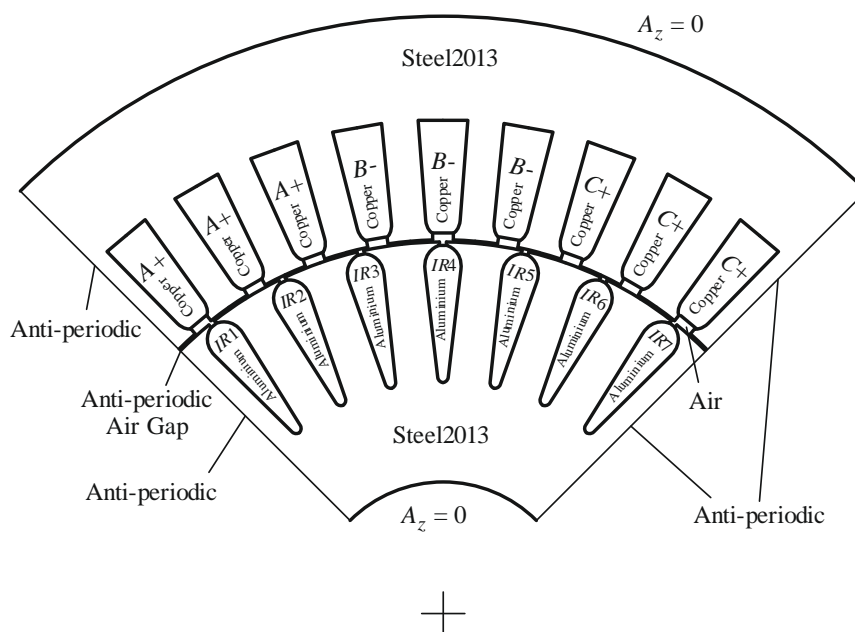


Рис. 2. Расчетная область АД 4А100S4У3 для расчетов в программном комплексе FEMM

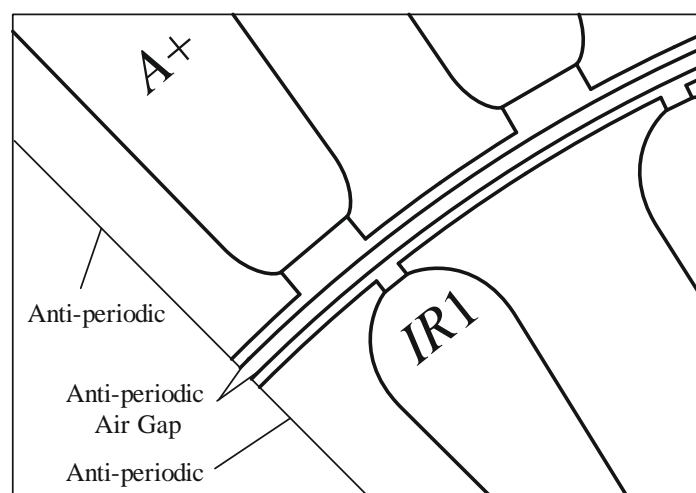


Рис. 3. Фрагмент расчетной области АД 4А100S4У3 в месте расположения воздушного зазора

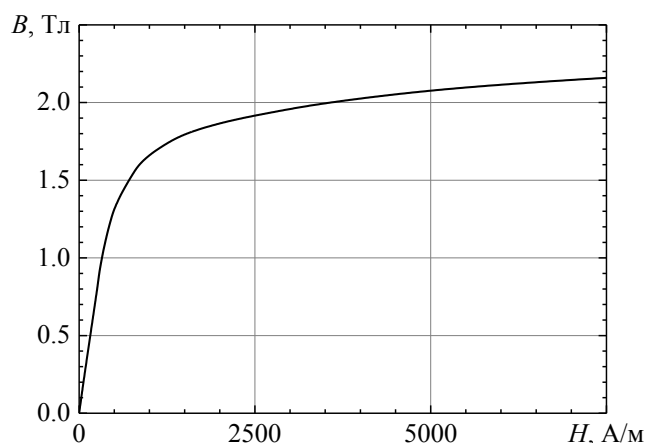


Рис. 4. Кривая намагничивания электротехнической стали марки 2013

С использованием вышеописанной методики был выполнен ряд расчетов по расчету распределения магнитного поля в АД 4А100S4У3. Составляющая тока статора по оси d принята равной $i_{sdxx} = 5,275$ А, что соответствует величине тока намагничивания в режиме холостого хода. Составляющая тока статора по оси q задавалась равной нулю. На рис. 5 и 6 приведены результаты расчетов: распределение токов по токонесящим областям и распределение магнитной индукции.

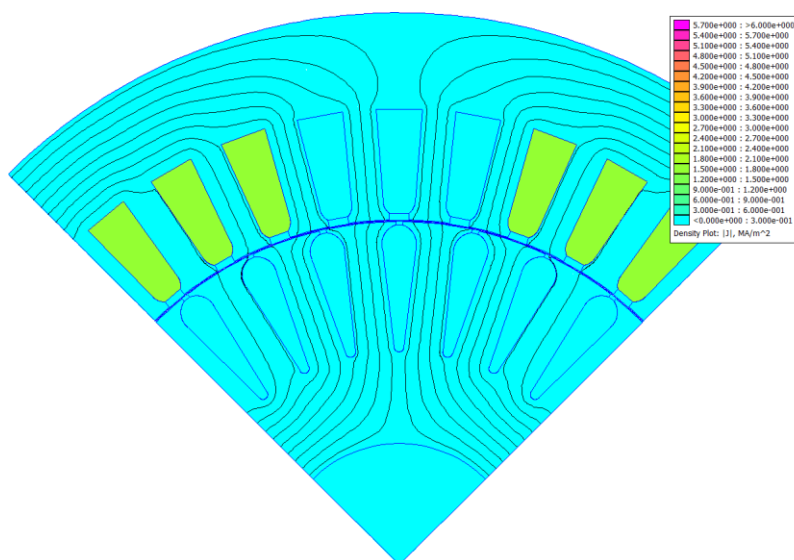


Рис. 5. Распределение токов по токонесящим областям АД в режиме холостого хода

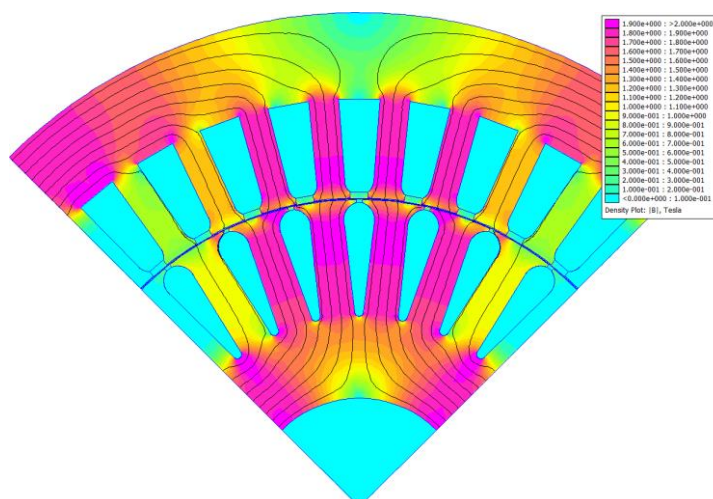


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в расчетной области АД в режиме холостого хода

Аналогичные расчеты были выполнены для режима работы под нагрузкой. Составляющие тока статора по осям системы координат приняты соответствующими номинальному режиму и равны:

$$i_{sdn} = 5,275 \text{ A}; i_{sqn} = 7,835 \text{ A}.$$

На рис. 7 и 8 приведены результаты расчетов: распределение токов по токонесящим областям и распределение магнитной индукции. Для этого режима было получено значение электромагнитного момента, равное 25,21 Н·м. Исходя из паспортных данных АД 4А100S4У3 величина электромагнитного момента равна:

$$M_{эм} = \frac{P_H}{2\pi f_H \eta_H} = 24,35 \text{ Н·м}.$$

Разность между определенным в результате расчета значением электромагнитного момента и полученного по паспортным значениям составляет около 3 %, что говорит об адекватности принятого подхода к моделированию АД и определению параметров модели.

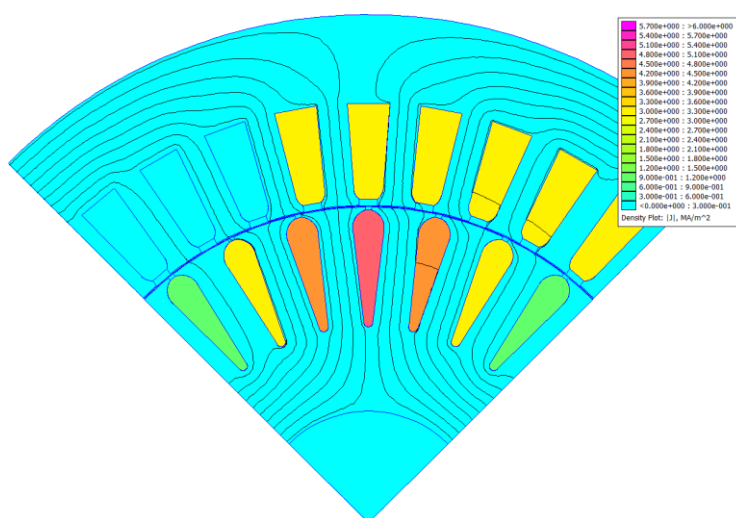


Рис. 7. Распределение токов по токонесящим областям АД в номинальном режиме

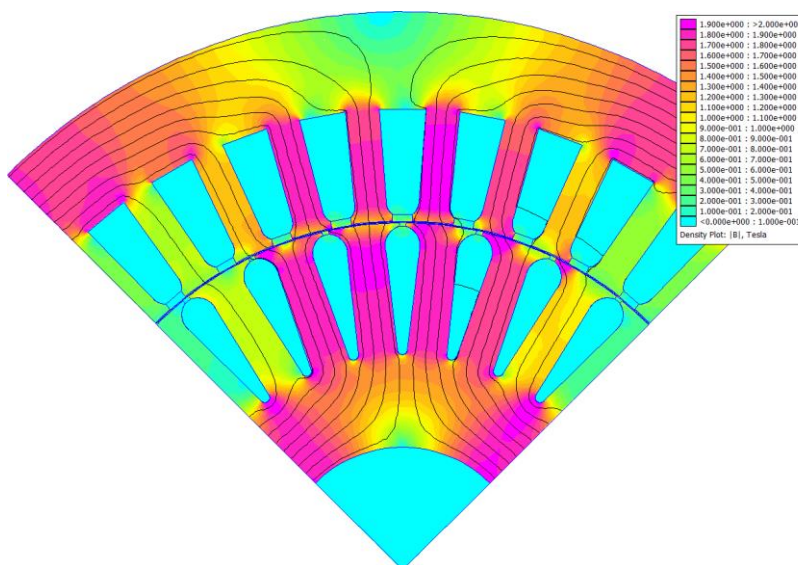


Рис. 8. Распределение магнитной индукции в расчетной области АД в номинальном режиме

Расчеты в режиме холостого хода также были проведены для других значений составляющей тока статора по оси d . Полученные по данным этих расчетов зависимости потокоцеплений статора и ротора представлены на рис. 9. На них отмечены точки номинального режима. По этим данным, с использованием вышеизложенного подхода, были получены зависимости индуктивностей контура намагничивания и рассеяния статора от составляющей тока по оси d . Эти зависимости приведены на рис. 10.

На них также отмечена точка номинального режима. В [3] приведены следующие значения этих величин:

$$L_m = 0,023068 \text{ Гн}; L_{\sigma s} = 0,008006 \text{ Гн}.$$

В результате расчетов в точке номинального режима были получены значения этих величин 0,023046 и 0,008004 Гн соответственно.

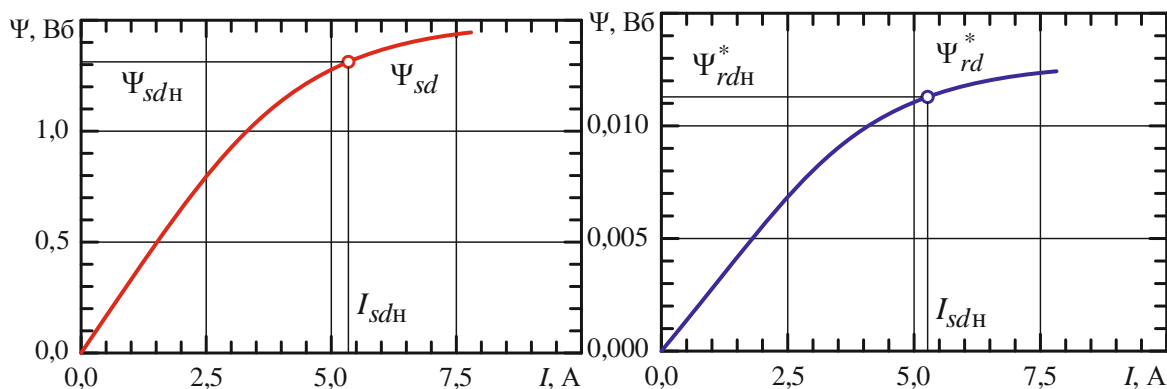


Рис. 9. Зависимости потокоцепления статора и ротора АД в режиме холостого хода от составляющей тока статора по оси d

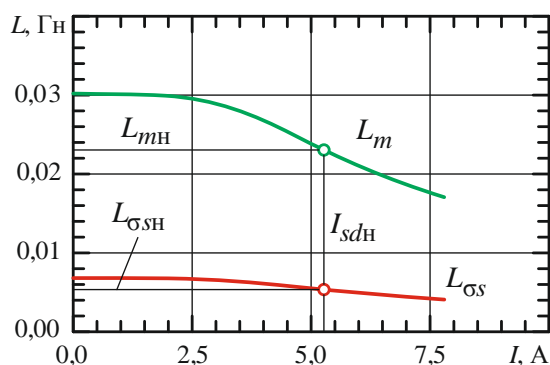


Рис. 10. Зависимости индуктивности контура намагничивания и индуктивности рассеяния статора АД от составляющей тока статора по оси d

Для определения остальных параметров АД был выполнен ряд расчетов распределения магнитного поля при питании обмоток статора синусоидальным током и неподвижном роторе. По полученным в результате расчетов зависимостям действительных и мнимых составляющих индуктивности фазы от частоты тока с использованием аппроксимации по вышеизложенной методике были определены параметры Т-образной схемы замещения рассматриваемого АД [12]. На рис. 11 показаны зависимости действительной и мнимой составляющей индуктивности фазы статора от частоты питающего тока, полученные в результате расчетов (показаны точками) и построенные по аппроксимированным значениям параметрам двигателя (показаны линиями). В результате аппроксимации были получены следующие параметры схемы АД:

$$L_m = 0,023052 \text{ Гн}; L_{\sigma s} = 0,008005 \text{ Гн}; L'_{\sigma r} = 0,01358 \text{ Гн}; r'_{\sigma r} = 1,71 \text{ Ом}.$$

Полученные значения отличаются от приведенных в [4] данных на величину не более 3 %, что является достаточным для выполнения дальнейших исследований. Полученное расхождение объясняется отличием реальных характеристик материалов от заданных в расчете.

Анализ полученных результатов расчета распределения магнитного поля в активном слое асинхронной электрической машины показал, что наличие зубцов на статоре и роторе является причиной появления значительных пульсаций магнитного поля в воздушном зазоре и элементах магнитной системы. С целью снижения влияния зубцовых пульсаций в рассматриваемом АД пазы ротора выполнены со скосом.

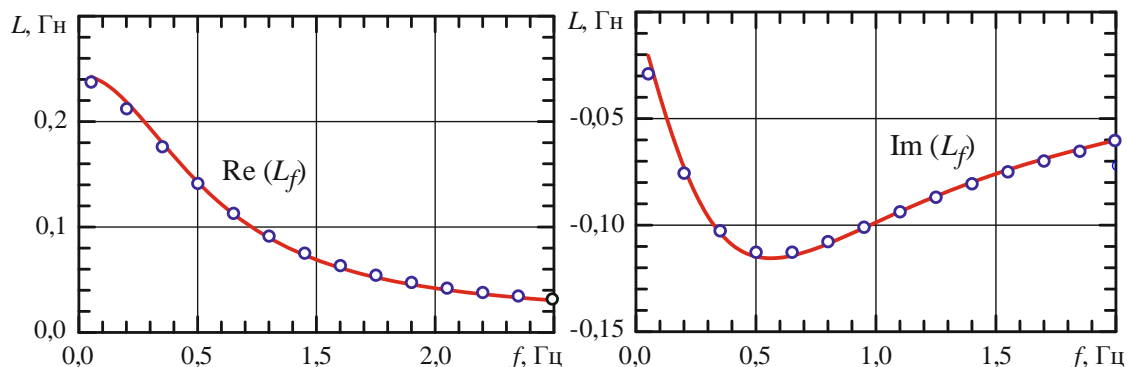


Рис. 11. Зависимости действительной и мнимой составляющих индуктивности фазы статора от частоты тока

Отказ от учета влияния скоса пазов может привести к значительным ошибкам в определении пространственных волн магнитных сил. Поэтому в дальнейших расчетах этот фактор учитывается следующим образом. В каждой расчетной точке определение распределения магнитного поля выполняется для нескольких положений ротора в пределах величины скоса паза. Затем полученные для этих положений ротора значения потокосцеплений эквивалентных контуров (обмоток) и индукции в различных элементах магнитной системы усредняются.

С целью оценки влияния скоса пазов на результаты расчета электромагнитных процессов было выполнено моделирование электромагнитных процессов в рассматриваемом АД. Чтобы минимизировать влияние других факторов (например, наличие высших гармоник или несимметрии), питание обмоток осуществлялось синусоидальным током. Расчеты выполнялись для двух случаев: без учета скоса и при наличии скоса пазов ротора на одно пазовое деление. В расчетах принималось, что значения проекций тока статора на оси d и q равны:

$$i_{sd} = \sqrt{2} \cdot 2 \text{ A}; i_{sq} = \sqrt{2} \cdot 4 \text{ A}.$$

Величина проекции тока ротора на ось q определялась по результатам предварительных расчетов таким образом, чтобы выполнялось условие равенства нулю среднего за период тока статора потокосцепления ротора по оси q .

Полученные в результате расчетов зависимости электромагнитного момента, потокосцепления обмотки статора и проекции потокосцепления ротора на ось q показаны на рис. 12.

На рис. 13 приведены зависимости магнитной индукции в центре зубцов статора и ротора от углового положения ротора.

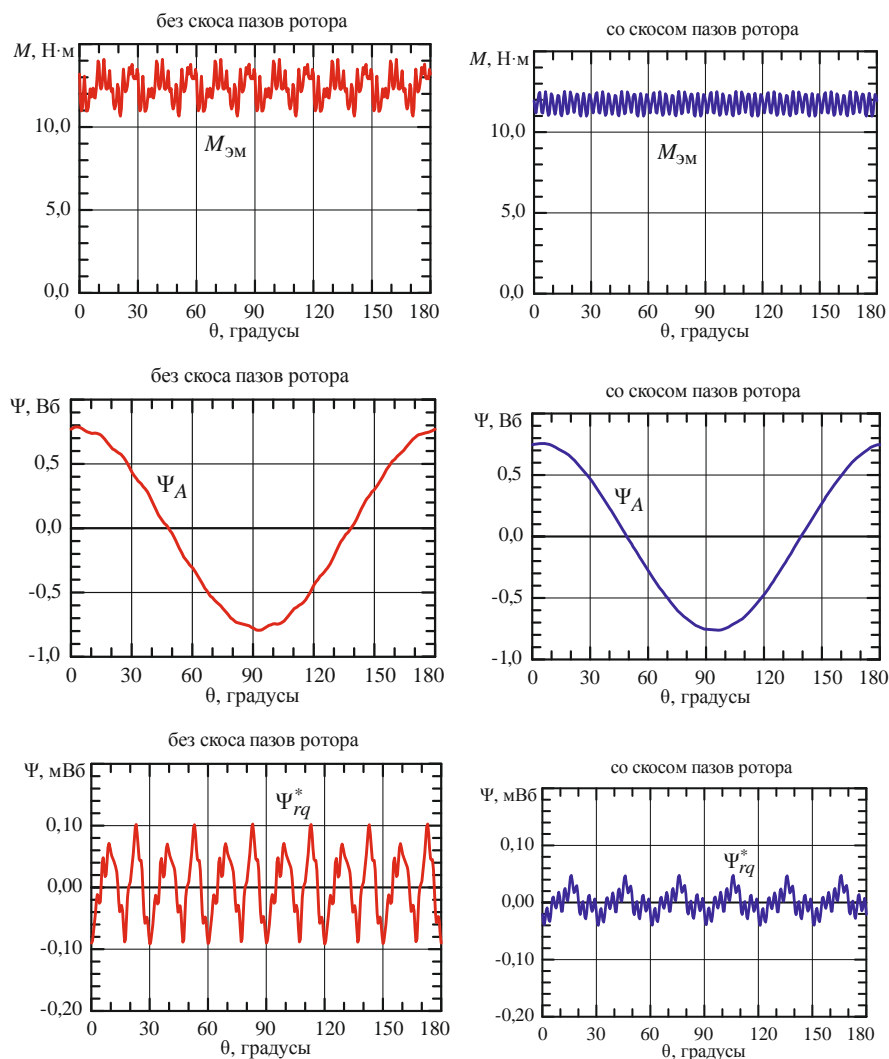


Рис. 12. Электромагнитный момент, потокосцепления обмотки статора, проекция потокосцепления ротора на ось q

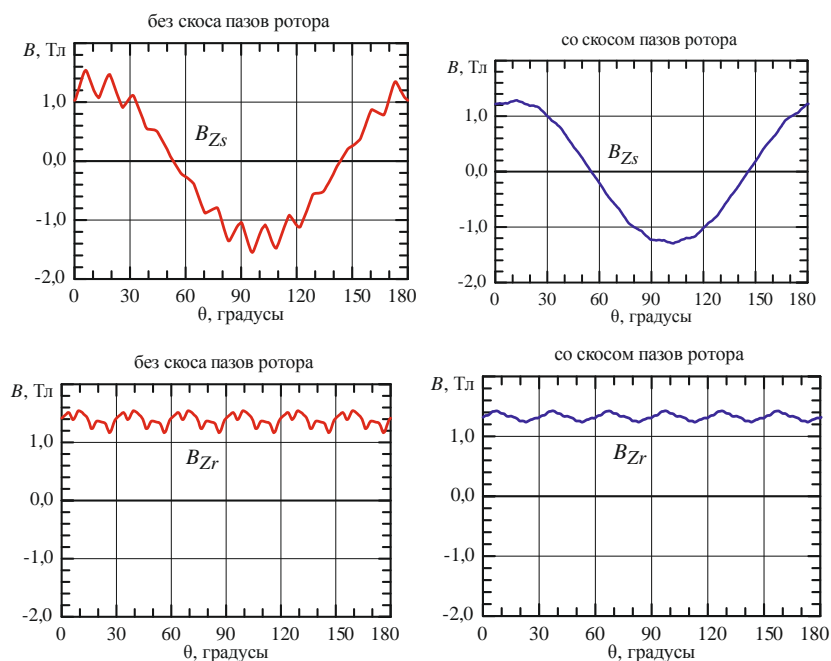


Рис. 13. Зависимости магнитной индукции в центре зубцов статора и ротора от углового положения ротора

Анализ полученных результатов показывает, что отказ от учета скоса пазов ротора не оказывает существенного влияния на форму потокосцеплений статора и ротора, однако приводит к значительному искажению формы индукции в воздушном зазоре и в элементах магнитопровода, электромагнитного момента. Так как целью выполняемых расчетов является определение временного и пространственного распределения магнитной индукции в воздушном зазоре, отказ от учета скоса пазов может привести к существенному искажению определяемых по этому распределению магнитных сил. Поэтому при расчете вибрации и шума асинхронной электрической машины учет скоса пазов является обязательным.

В настоящее время одним из наиболее распространенных способов регулирования производительности вентиляторов, насосов и других механизмов, используемых на трансформаторных подстанциях, является частотное регулирование АД. Применение такого способа требует осуществлять питание двигателя переменным трехфазным напряжением с регулируемой частотой и величиной. Для этого применяются статические полупроводниковые преобразователи на базе ключевых полупроводниковых приборов, особенностью которых является импульсный принцип формирования выходного напряжения. В результате питание фаз АД осуществляется напряжением с содержанием высших гармоник. Порождаемые ими пульсации тока являются причиной увеличения числа пульсаций магнитной индукции в воздушном зазоре, появления дополнительных пространственных и временных гармоник. Поэтому для анализа влияния формы питающего напряжения на характер и уровень вибраций были выполнены расчеты для случаев питания АД от синусоидального источника напряжения и от статического преобразователя.

При выполнении расчетов принимается, что двигатель вращается с номинальной частотой и скольжением 2,5 %. В первом случае АД питается от источника синусоидального напряжения с фазным напряжением величиной 275,6 В (амплитудное значение). Во втором случае питание осуществляется от автономного инвертора напряжения. Выходное напряжение формируется с использованием синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [6, 7].

Напряжение в звене постоянного тока принято 550 В, коэффициент модуляции равен 1,0; кратность частоты модуляции к частоте выходного напряжения равна 21. Параметры модуляции подобраны таким образом, чтобы основная гармоника выходного напряжения соответствовала синусоидальному напряжению, используемому в первом случае.

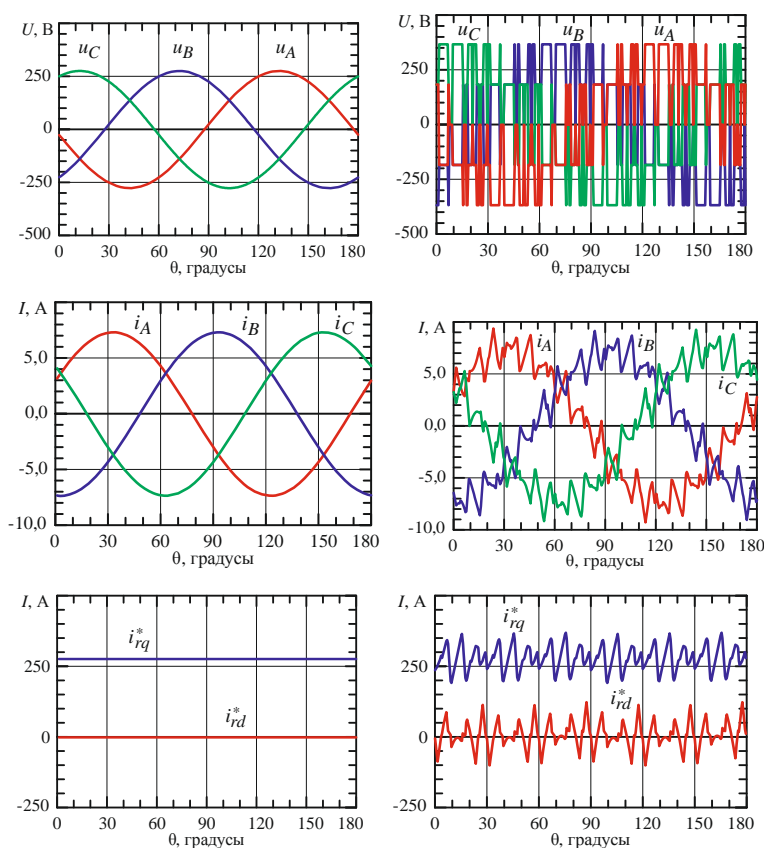


Рис. 14. Напряжения и токи фаз статора, проекции токов ротора на оси системы координат $d - q$ при питании от синусоидального источника (слева) и от автономного инвертора напряжения (справа)

На рис. 14 приведены напряжения и токи фаз статора, проекции токов ротора на оси системы координат $d-q$ при питании от синусоидального источника и от автономного инвертора напряжения. Из приведенных зависимостей видно, что наличие высших гармоник в напряжении статора являются причиной возникновения значительных пульсаций токов статора и ротора, оказывающих существенное влияние на распределение магнитной индукции в воздушном зазоре.

На рис. 15 показаны зависимости индукции в зубцах статора и ротора, а также приведено пространственное и временное распределение индукции в воздушном зазоре для обоих расчетных случаев.

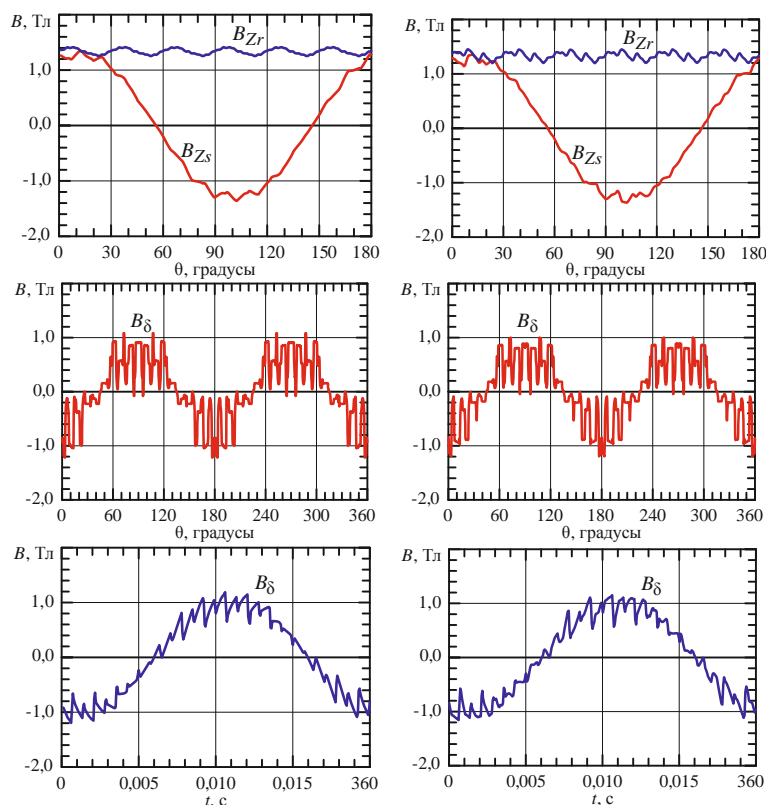


Рис. 15. Зависимости индукции в зубцах статора и ротора, пространственное и временное распределение индукции в воздушном зазоре при питании от синусоидального источника (слева) и от автономного инвертора напряжения (справа)

Характер полученных зависимостей пространственного и временного распределения индукции в воздушном зазоре соответствует приведенным в [8] аналогичным зависимостям.

С использованием полученных результатов расчетов для двух рассмотренных случаев были определены амплитуды пространственно-временных волн магнитной индукции, соответствующие модам пространственных колебаний статора и ротора. Для этого использовался метод наименьших квадратов.

Радиальную магнитную силу можно определить по формуле:

$$F_m(\theta, t) = \frac{B^2(\theta, t)}{2\mu_0}, \quad (6)$$

где $B(\theta, t)$ – индукция по средней линии воздушного зазора в точке с угловой координатой θ и времени t .

Учитывая малый уровень демпфирования, вызывать вибрации будут только волны радиальных магнитных сил с частотами, соответствующими модам пространственных колебаний:

$$F_{m,r}(\theta, t) = \hat{F}_{m,r} \cos(r\theta - \omega_r t - \varphi_r), \quad (7)$$

где $\hat{F}_{m,r}$ – амплитуда радиальной магнитной силы;

ω_r – собственная частота моды пространственных колебаний электрической машины с номером r ;
 φ_r – фаза радиальной магнитной силы.

Вибрации, создаваемые радиальными магнитными силами, описываются выражением:

$$Y(\theta, t) = \sum_{r=0}^{\infty} \hat{Y}_r \cos(r\theta - \omega_r t - \varphi_r), \quad (8)$$

где \hat{Y}_r – амплитуда вибрации, соответствующей моде пространственных колебаний с номером r .

Для определения амплитуд колебаний статора используется подход, при котором он представляется в виде свободно опертой балки, несущей синусоидально распределенную нагрузку с амплитудой, равной амплитуде радиальной магнитной силы [8, 11, 12].

При известных геометрических размерах статора для моды пространственных колебаний $r = 0$ амплитуда вибрации определяются по формуле:

$$\hat{Y}_r = \frac{RR_m}{Eh} \hat{F}_{m,r} \eta_r, \quad (9)$$

где R – внутренний радиус статора;
 R_m – радиус средней линии ярама статора;
 h – толщина ярама статора;
 E – модуль упругости (модуль Юнга) материала магнитопровода.

С использованием расчётных формул (6)–(9) рассчитаем амплитуды колебаний (вибрации) ротора и статора, соответствующие модам пространственных колебаний. Результаты расчета приведены в таблице.

Результаты расчета амплитуды вибраций для мод пространственных колебаний статора и ротора

r	f_r , Гц	Синусоида			ШИМ		
		$B_{\delta r}$, Тл	F_{mr} , Н	Y_r , мм	$B_{\delta r}$, Тл	F_{mr} , Н	Y_r , мм
0	7693,33	0,000065	0,00332	0,000066	0,000646	0,332381	0,006571
1	645,53	0,000012	0,000106	$0,47 \cdot 10^{-12}$	0,000012	0,000119	$0,53 \cdot 10^{-12}$
2	1116,85	0,007395	43,516483	0,860336	0,010572	88,935315	1,758283
3	2927,86	$7,828 \cdot 10^{-6}$	0,000049	$0,96 \cdot 10^{-6}$	$5,474 \cdot 10^{-6}$	0,000024	$0,47 \cdot 10^{-6}$
4	5121,44	0,00019	0,028841	0,00057	0,000424	0,143236	0,002832
5	7508,31	$1,34 \cdot 10^{-6}$	$1,426 \cdot 10^{-6}$	$0,03 \cdot 10^{-6}$	$2,548 \cdot 10^{-6}$	$5,168 \cdot 10^{-6}$	$0,10 \cdot 10^{-6}$

Выводы

Анализ полученных результатов показывает, что в обоих случаях наиболее выраженной является вибрация, соответствующая пространственной моде колебаний с номером $r = 2$. Это связано с тем, что наиболее сильно проявляются пространственные гармоники, соответствующие числу пар полюсов асинхронной электрической машины, что соответствует результатам, приведенным в [8–10, 13]. Колебания с другими пространственными модами имеют намного меньшую величину, сопоставимую с погрешностями вычислений.

Следует отметить, что наличие высших гармоник в питающем напряжении при использовании ШИМ значительно, более чем в два раза увеличивает амплитуду колебаний вибрации. Поэтому одним из действенных методов борьбы с шумом и вибрациями АД при питании от преобразователя является снижение уровня высших гармоник в питающем двигателе напряжении. Этого можно добиться либо путем увеличения частоты и применения специальных методов модуляции, либо за счет фильтрации высших гармоник на выходе преобразователя.

Список литературы

1 Костюков, А. В. Экспериментальные исследования шума силовых трансформаторов / А. В. Костюков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 695–699. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-2-695-699.

References

1 Kostyukov A. V. Experimental studies of noise of power transformers / A. V. Kostyukov // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. – 2022. – No. 2. – P. 695–699. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-2-695-69.

2 **Костюков, А. В.** Безопасные условия эксплуатации электрооборудования энергетических хозяйств предприятий / А. В. Костюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(88). – С. 144–151. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_144.

3 Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 504 с.

4 **Norton, M. P.** Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers / M. P. Norton. – Cambridge, UK : Cambridge University Press. 1989. – DOI.org/10.1017/CBO9781139163927.

5 **Meeker, D.** Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual / D. Meeker. – 2018. – URL: <https://pdfslide.net/documents/manual-femm-42.html?page=1> (дата обращения: 10.06.2023).

6 **Slemon, G.** Modelling of induction machines for electric drives / G. R. Slemon // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1988. – Vol. 25, No. 6. – P. 1126–1131. – DOI 10.1109/28.44251.

7 **Lipo, T. A.** Introduction to AC Machine Design / T. A. Lipo // Wiley – IEEE Press, 2017. – 544 p. – ISBN 978-1-119-35218-1.

8 **Maliti, K. C.** Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors : doctoral dissertation / K. C. Maliti. – Stockholm, 2000. – 209 p. – ISSN 1404-8248.

9 **Доброскок, Н. С.** Алгоритмические методы снижения шумов и вибраций в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Н. С. Доброскок ; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – Санкт-Петербург, 2014. – 162 с.

10 **Шубов, И. Г.** Шум и вибрация электрических машин / И. Г. Шубов. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

11 Исследование магнитной вибрации асинхронного электродвигателя посредством МКЭ-моделирования / А. И. Ермолаев, В. И. Ерофеев, А. С. Плехов, Д. Ю. Титов // Интеллектуальная электротехника. – 2021. – № 3(15). – С. 37–56. – DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_37.

12 **Колпахчян, П. Г.** Определение параметров схемы замещения асинхронной электрической машины с массивным ротором / П. Г. Колпахчян, М. С. Подберезная, Д. В. Ольховатов // Известия вузов. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 5. – С. 31–36. DOI 10.17213/0136-3360-2019-5-31-36.

13 **Копылов, И. П.** Электрические машины / И. П. Копылов. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 360 с. – ISBN 5-06-003841-6.

2 **Kostyukov, A. V.** Safe conditions for the operation of electrical equipment of power utilities of enterprises // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4(88). – P. 144–151. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_144.

3 Asynchronous motors of the 4A series : Handbook / A. E. Kravchik, M. M. Shlaf, V. I. Afonin, E. A. Sobolenskaya. – Moscow : Energoizdat, 1982. – 504 p.

4 **Norton, M. P.** Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers / M. P. Norton. – Cambridge, UK : Cambridge University Press. 1989. – DOI.org/10.1017/CBO9781139163927.

5 **Meeker, D.** Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual / D. Meeker. – 2018. – URL: <https://pdfslide.net/documents/manual-femm-42.html?page=1> (date of access: 06/10/2023).

6 **Slemon, G.** Modelling of induction machines for electric drives / G. R. Slemon // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1988. – Vol. 25, No. 6. – P. 1126–1131. – DOI 10.1109/28.44251.

7 **Lipo, T. A.** Introduction to AC Machine Design / T. A. Lipo // Wiley – IEEE Press, 2017. – 544 p. – ISBN 978-1-119-35218-1.

8 **Maliti, K. C.** Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors : doctoral dissertation / K. C. Maliti. Stockholm, 2000. – 209 p. – ISSN 1404-8248.

9 **Dobroskok, N. S.** Algorithmic methods of noise and vibration reduction in a frequency-controlled asynchronous electric drive : dis. candidate of Technical Sciences / N. S. Dobroskok ; SPbSETU "LETI". – Saint-Petersburg, 2014. – 162 p.

10 **Shubov, I. G.** Noise and vibration of electric machines / I. G. Shubov. – Leningrad : Energoatomizdat, 1986. – 208 p.

11 Investigation of magnetic vibration of an asynchronous electric motor by means of FEM modeling / A. I. Ermolaev, V. I. Erofeev, A. S. Plekhov, D. Yu. Titov // Intellectual electrical engineering. – 2021. – No. 3(15). – P. 37–56. – DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_37.

12 **Kolpakhchyan, P. G.** Determination of parameters of the replacement circuit of an asynchronous electric bus with a massive rotor / P. G. Kolpakhchyan, M. S. Podbereznaya, D. V. Olkhovатов // Izvestiya vuzov. Electromechanics. – 2019. – Т. 62. – No. 5. – P. 31–36. – DOI 10.17213/0136-3360-2019-5-31-36.

13 **Kopylov, I. P.** Electric machines / I. P. Kopylov. – Moscow : Energoatomizdat, 1986. – 360 p. – ISBN 5-06-003841-6.

14 **Kramer, E.** Dynamics of rotors and foundations / E. Kramer. – Berlin : Springer-Verlag, 1993. – DOI 10.1007/978-3-662-02798-1.

14 **Kramer, E.** Dynamics of rotors and foundations / E. Kramer. – Berlin : Springer-Verlag, 1993. – DOI 10.1007/978-3-662-02798-1.

A. V. Kostyukov, V. D. Vereskun

METHODOLOGY OF RESEARCH OF VIBRATION AND NOISE SOURCES OF THE COOLING SYSTEM FOR POWER TRANSFORMERS

Abstract. The operation of power transformers is accompanied by vibration and noise of structural elements of a power transformer. In this paper, a method for calculating the vibration and noise of the auxiliary equipment of the cooling system for a power transformer was tested. An asynchronous motor with a squirrel-cage rotor 4A100S4U3 was considered as the main source of noise in the cooling system for the power transformer. Various options for studying the vibration and noise of an asynchronous motor when powered by an industrial frequency source and a voltage converter have been carried out. It is determined the amplitudes of space-time wave of magnetic induction corresponding to the modes of spatial oscillations of the stator and rotor. In the research process, the amplitudes of oscillation (vibration) of the stator and rotor corresponding to the modes of spatial oscillations were also calculated. Recommendations are given to reduce vibration and noise of the cooling system of power transformers.

Keywords: power transformer, noise and vibration, asynchronous motor, pulse width modulation, magnetic system, mode frequency, rotor, stator, magnetic field, flux coupling, inductance, electromagnetic moment.

For citation: Kostyukov, A. V. Methodology of research of vibration and noise sources of the cooling system for power transformers / A. V. Kostyukov, V. D. Vereskun // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 110–123. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_110.

Сведения об авторах

Костюков Александр Владимирович

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

Верескун Владимир Дмитриевич

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

Information about the authors

Kostyukov Alexander Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Foundations of Electrical Engineering»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kav@rgups.ru

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

Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, В. Ф. Танаев

РАСЧЕТ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ДАННЫМ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ *

Аннотация. Фактические нагрузочные характеристики тяговых электродвигателей локомотива с электрической передачей мощности по данным микропроцессорных систем управления необходимы для уточнения реальных тяговых характеристик локомотивов при выполнении оперативных тяговых расчетов. В работе использовались методы теории электрических машин, статистической обработки и регрессионного анализа экспериментальных данных. На основании статистического анализа данных регистрации подсистемы бортовой диагностики 20 секций тепловозов 2ТЭ116У и ТЭП70БС предложена и обоснована методика определения фактических нагрузочных характеристик тяговых электродвигателей. Полученные результаты позволяют уточнить параметры тяговой характеристики локомотива и могут использоваться при выполнении оперативных тяговых расчетов.

Ключевые слова: нагрузочные характеристики тяговых двигателей, тяговые электродвигатели, тяговый привод.

Для цитирования: Курилкин, Д. Н. Расчет нагрузочных характеристик тяговых электродвигателей постоянного тока по данным микропроцессорных систем управления и диагностики / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, В. Ф. Танаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 124–131. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_124.

Введение

Одной из причин, снижающих достоверность тяговых расчетов, является отсутствие информации о реальных тяговых свойствах локомотивов, которые во многом определяются нагрузочными характеристиками тяговых электродвигателей (ТЭД). Их различия, обусловленные как разбросом параметров магнитных и электрических цепей электродвигателей, так и разницей диаметров колесных пар, являются одним из факторов, влияющих на равномерность распределения токов якорных обмоток и вращающих моментов, параллельно работающим ТЭД.

В настоящее время при выполнении тяговых расчетов, в том числе при поиске энергооптимальных режимов ведения поезда, используются паспортные характеристики тяговых электродвигателей, приведенные в заводской документации или Правилах тяговых расчетов [1], не учитывающие их реального технического состояния. В то же время перечень контролируемых параметров и объем измерительной информации, регистрируемой микропроцессорными системами управления и подсистемами бортовой диагностики современных тепловозов, позволяют решать широкий круг задач, связанных с контролем текущего состояния оборудования силовой цепи локомотивов, в том числе ТЭД [2, 3].

Таким образом, актуальной проблемой является разработка методов оперативного определения реальных характеристик ТЭД локомотива на основе обработки информации, регистрируемой подсистемой бортовой диагностики.

В статье предлагается методика определения фактических нагрузочных характеристик ТЭД по данным микропроцессорных систем управления, приведены результаты ее апробации применительно к тепловозам серии 2ТЭ116У и ТЭП70БС.

Методика расчета

Нагрузочная характеристика электрической машины постоянного тока (рис. 1) представляет собой зависимость [4, 5]:

* Работа выполнена в рамках гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

$$\left(\frac{E}{\omega}\right) = f(I_{об}, I),$$

где E – ЭДС тягового двигателя; ω – угловая скорость вращения якоря ТЭД; I и $I_{об}$ – токи в обмотках якоря и возбуждения ТЭД.

Ток обмотки возбуждения $I_{об}$ связан с током якоря I соотношением

$$I_{об} = \alpha \cdot I,$$

где α – степень ослабления возбуждения, которая при двухступенчатом ослаблении возбуждения может принимать три возможных значения:

- отсутствие ослабления возбуждения ($\alpha = 1$);
- ослабление возбуждения первой ступени ($\alpha = \alpha_{об1}$);
- ослабление возбуждения второй ступени ($\alpha = \alpha_{об2}$).

В этом случае для каждой ступени ослабления возбуждения нагрузочная характеристика ТЭД последовательного возбуждения (см. рис. 1, линии красного, синего и зеленого цвета) может быть представлена функцией тока якоря, что существенно упрощает ее расчет по данным систем непрерывного мониторинга параметров силовой цепи локомотива.

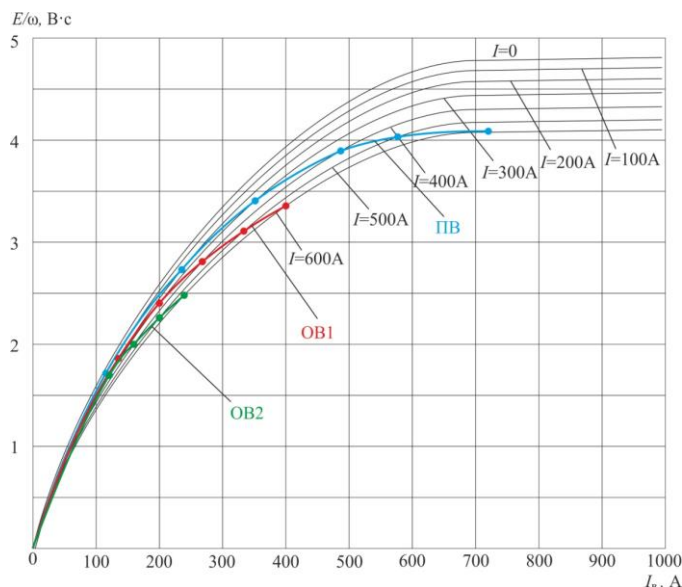


Рис. 1. Нагрузочная характеристика тягового двигателя с нанесенными линиями нагружения:

ПВ – линия нагружения при полном возбуждении; ОБ1 – линия нагружения при ослабленном возбуждении первой ступени; ОБ2 – линия нагружения при ослабленном возбуждении второй ступени

Из объема данных, регистрируемых микропроцессорными системами управления локомотива, для расчета характеристики выбираются записи, соответствующие движению локомотива в режиме тяги со скоростью не ниже 10 км/ч, при токе якоря ТЭД – не менее 200 А на каждой из ступеней ослабления возбуждения. При этом для каждого ТЭД фиксируется ток якоря I , мгновенное значение напряжения U , угловая скорость вращения колесной пары $\omega_{кп}$.

При известном мгновенном значении напряжения U , приложенного к цепи ТЭД, и тока I в якорной обмотке мгновенное значение его ЭДС определяется по формуле

$$E = U - I \cdot \overline{r_{ТЭД}} - 2 \cdot \Delta U_{щ}, \quad (1)$$

где $\overline{r_{ТЭД}}$ – математическое ожидание сопротивления цепи якоря тягового двигателя, Ом; $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в месте контакта щетки с коллектором, В.

Порядок определения значений $\overline{r_{ТЭД}}$ и $\Delta U_{щ}$ был рассмотрен в работе [6].

Мгновенное значение угловой скорости вращения якоря ТЭД ω связано с $\omega_{\text{кп}}$ передаточным отношением тягового редуктора μ : $\omega = \omega_{\text{кп}} \cdot \mu$.

Результаты расчета $\left(\frac{E}{\omega}\right) = f(I)$ для первого ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 078 секция А и разных ступеней ослабления возбуждения приведены на рис. 2, а для тепловоза ТЭП70БС № 176 – на рис. 3 точками разного цвета для каждой из ступеней.

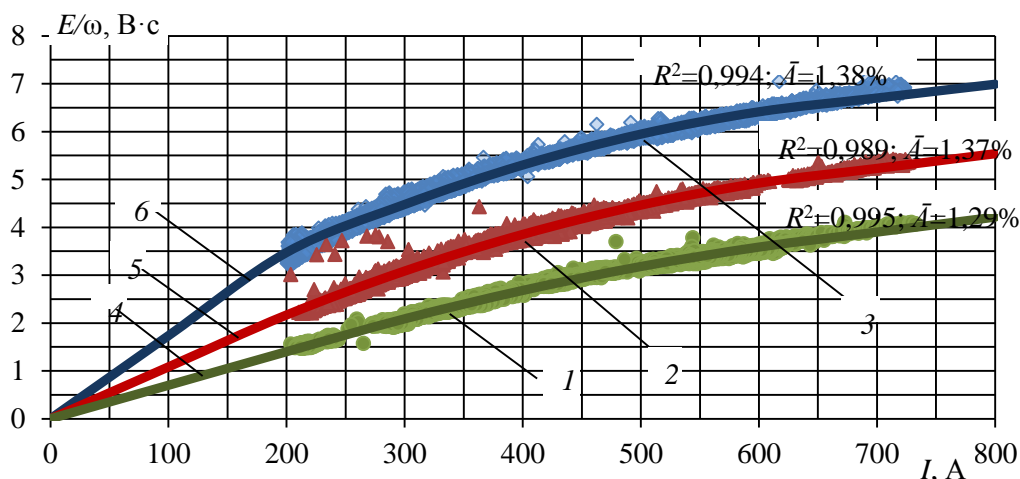


Рис. 2. Нагрузочная характеристика первого ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 078 секция А:

1–3 – измеренные нагрузочные характеристики при ослабленном возбуждении второй ступени, ослабленном возбуждении первой ступени и полном возбуждении соответственно; 4–6 – расчетные (аппроксимированные) нагрузочные характеристики для ослабленного возбуждения второй ступени, первой ступени и полного возбуждения соответственно; R^2 – коэффициент детерминации расчетной нагрузочной характеристики; \bar{A} – средняя ошибка аппроксимации расчетной нагрузочной характеристики (%)

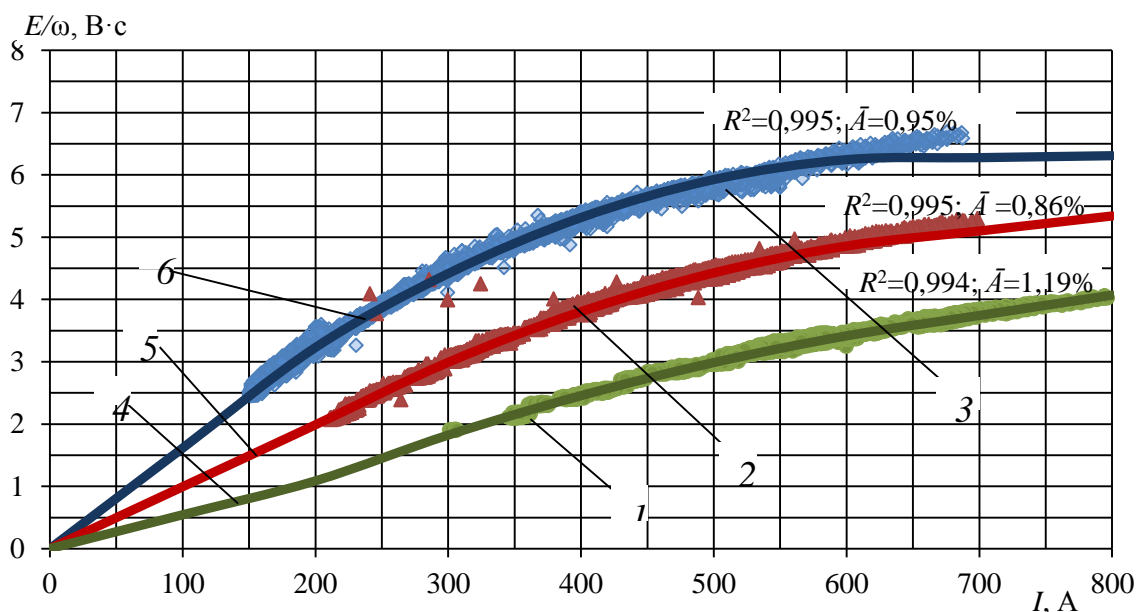


Рис. 3. Нагрузочная характеристика первого ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 176:

1–3 – измеренные нагрузочные характеристики при ослабленном возбуждении второй ступени, ослабленном возбуждении первой ступени и полном возбуждении соответственно; 4–6 – расчетные (аппроксимированные) нагрузочные характеристики для ослабленного возбуждения второй ступени, первой ступени и полного возбуждения соответственно; R^2 – коэффициент детерминации расчетной нагрузочной характеристики; \bar{A} – средняя ошибка аппроксимации расчетной нагрузочной характеристики (%)

Для упрощения и повышения точности аппроксимации нагрузочной характеристики $\left(\frac{E}{\omega}\right) = f(I)$ (рис. 2 и 3) в ней могут быть выделены три участка:

– участок, соответствующий значениям тока якоря от $I_{\min} = 200$ А до $I_{\max} = 700$ А, который может быть аппроксимирован полиномом второго порядка вида

$$\left(\frac{E}{\omega}\right) = A \cdot I^2 + B \cdot I + C, \quad (2)$$

где A, B, C – постоянные коэффициенты;

– участок характеристики с токами якоря менее минимального I_{\min} , редко используемый в эксплуатации, для аппроксимации которого можно принять линейную зависимость вида

$$\left(\frac{E}{\omega}\right) = \left(\frac{E}{\omega}\right)_{\min} \cdot \frac{I}{I_{\min}}, \quad (3)$$

где $\left(\frac{E}{\omega}\right)_{\min}$ – значение отношения $\left(\frac{E}{\omega}\right)$, полученное по зависимости (2) при минимальном токе якоря;

– участок характеристики с токами якоря более максимального I_{\max} , также редко используемый в режимах нормальной эксплуатации локомотивов вследствие насыщения магнитной системы тягового двигателя и обусловленного им увеличения потерь, может быть экстраполировано зависимостью вида:

$$\left(\frac{E}{\omega}\right) = \left(\frac{E}{\omega}\right)_{\max} + \frac{(I - I_{\max})}{I_{\max} - I_*} \cdot \left[\left(\frac{E}{\omega}\right)_{\max} - \left(\frac{E}{\omega}\right)_* \right], \quad (4)$$

где I_* – ток якоря, на 100 А меньше максимального; $\left(\frac{E}{\omega}\right)_{\max}$ и $\left(\frac{E}{\omega}\right)_*$ – отношение $\left(\frac{E}{\omega}\right)$, полученные по зависимости (2) при токах якоря I_{\max} и I_* соответственно.

Коэффициенты аппроксимации для выражения (2) определяются с использованием метода наименьших квадратов [7], для оценки качества аппроксимации используется коэффициент детерминации R^2 и средняя ошибка аппроксимации \bar{A} (%) [7].

Результаты расчета

Была выполнена аппроксимация нагрузочных характеристик ТЭД 14 секций тепловозов 2ТЭ116У и шести тепловозов ТЭП70БС, часть результатов которой приведена в табл. 1 и 2.

При расчете использовались значения сопротивлений цепи тяговых двигателей, полученные в работе [6].

На рис. 2 приведены результаты аппроксимации характеристики первого ТЭД тепловоза при разных степенях ослабления возбуждения (сплошные линии).

Аналогичные результаты для первого ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 176 приведены на рис. 3.

Как следует из данных табл. 1 и 2, а также рис. 3 и 4, величина коэффициента детерминации R^2 составляет не менее 0,93, а ошибка аппроксимации не превышает 3 % на всех степенях ослабления возбуждения.

На рис. 4 представлены нагрузочные характеристики шести ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 078 секция А, на рис. 5 – нагрузочные характеристики шести ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 176 при полном возбуждении и двух степенях ослабления возбуждения ТЭД.

Как следует из рис. 4 и 5, при одном и том же значении магнитного потока (отношении E/ω) разброс токов ТЭД одной секции даже при полном возбуждении может достигать 15 % и более, что необходимо учитывать при расчете тяговой характеристики тепловоза.

Таблица 1

Параметры нагрузочных характеристик ТЭД тепловозов 2ТЭ116У

№ ТЭД	Полное возбуждение					Ослабленное возбуждение первой ступени					Ослабленное возбуждение второй ступени				
	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)
1 Тепловоз 2ТЭ116У № 078 секция А															
-	Число записей 16650					Число записей 12086					Число записей 12144				
1	-8,94	0,0145	0,933	0,994	1,07	-7,64	0,0130	-0,125	0,989	1,37	-4,67	0,0092	-0,251	0,995	1,29
2	-7,99	0,0133	1,187	0,993	1,26	-6,33	0,0113	0,361	0,973	2,35	-6,98	0,0108	-0,411	0,977	2,76
3	-8,76	0,0144	0,911	0,995	1,06	-6,84	0,0123	-0,070	0,990	1,41	-4,30	0,0088	-0,272	0,995	1,28
4	-7,65	0,0131	1,056	0,994	1,19	-6,92	0,0120	0,083	0,987	1,65	-5,20	0,0095	-0,267	0,994	1,42
5	-8,44	0,0140	0,965	0,993	1,33	-7,62	0,0129	-0,063	0,990	1,34	-4,53	0,0090	-0,135	0,994	1,24
6	-7,81	0,0135	1,001	0,992	1,38	-7,49	0,0129	-0,163	0,987	1,59	-3,99	0,0085	-0,128	0,992	1,51
2 Тепловоз 2ТЭ116У № 078 секция Б															
-	Число записей 13721					Число записей 8742					Число записей 19359				
1	-8,01	0,0138	0,928	0,993	1,19	-6,72	0,0123	-0,040	0,990	1,58	-3,75	0,0084	-0,140	0,988	1,77
2	-7,66	0,0137	0,961	0,983	1,90	-6,57	0,0123	-0,019	0,982	2,23	-3,86	0,0087	-0,180	0,971	3,00
3	-7,61	0,0133	0,965	0,991	1,43	-6,09	0,0116	0,040	0,990	1,62	-3,65	0,0081	-0,098	0,990	1,56
4	-8,12	0,0135	1,076	0,994	1,14	-7,34	0,0125	0,108	0,988	1,96	-5,41	0,0098	-0,222	0,989	1,68
5	-8,26	0,0138	0,984	0,993	1,21	-6,96	0,0123	0,027	0,992	1,50	-4,53	0,0091	-0,237	0,991	1,52
6	-8,35	0,0140	0,962	0,993	1,19	-7,09	0,0126	-0,030	0,992	1,53	-4,55	0,0092	-0,296	0,990	1,58

Таблица 2

Параметры нагрузочных характеристик ТЭД тепловозов ТЭП7БС

№ ТЭД	Полное возбуждение					Ослабленное возбуждение первой ступени					Ослабленное возбуждение второй ступени				
	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)	$A \cdot 10^{-6}$	B	C	R^2	\bar{A} (%)
1 Тепловоз ТЭП7БС № 176															
-	Число записей 10860					Число записей 9506					Число записей 4862				
1	-14,45	0,0191	-0,013	0,995	0,95	-9,53	0,0148	-0,591	0,995	0,86	-5,10	0,0099	-0,688	0,994	1,19
2	-14,90	0,0196	-0,100	0,994	1,07	-9,70	0,0151	-0,564	0,993	1,40	-5,98	0,0109	-0,799	0,971	1,33
3	-14,52	0,0192	0,007	0,994	1,18	-9,56	0,0150	-0,526	0,993	1,15	-5,77	0,0107	-0,746	0,973	1,26
4	-14,70	0,0194	-0,076	0,995	0,97	-9,70	0,0151	-0,629	0,996	0,82	-5,57	0,0106	-0,878	0,989	1,44
5	-14,29	0,0189	0,027	0,995	1,13	-9,00	0,0144	-0,513	0,997	1,09	-5,00	0,0099	-0,703	0,993	1,63
6	-13,43	0,0184	0,057	0,995	1,54	-8,06	0,0136	-0,457	0,996	1,15	-4,25	0,0090	-0,577	0,992	1,47
2 Тепловоз ТЭП7БС № 182															
-	Число записей 20678					Число записей 26045					Число записей 8082				
1	-1,72	0,0206	-0,164	0,996	1,72	-9,63	0,0147	-0,509	0,984	1,59	-5,57	0,0102	-0,645	0,961	1,66
2	-1,77	0,0209	-0,278	0,994	1,16	-8,47	0,0137	-0,280	0,965	1,35	-11,01	0,0153	-1,789	0,893	2,73
3	-1,77	0,0211	-0,342	0,992	1,20	-10,43	0,0153	-0,578	0,951	1,41	-13,98	0,0177	-2,146	0,883	2,62
4	-1,78	0,0212	-0,375	0,996	1,73	-9,61	0,0148	-0,594	0,990	1,59	-6,09	0,0109	-0,982	0,962	2,44
5	-1,80	0,0213	-0,327	0,993	1,47	-12,28	0,0168	-0,861	0,965	1,37	-6,42	0,0102	-0,474	0,849	2,79
6	-1,72	0,0209	-0,287	0,994	1,51	-12,92	0,0174	-1,012	0,967	1,49	-6,78	0,0106	-0,606	0,857	1,82

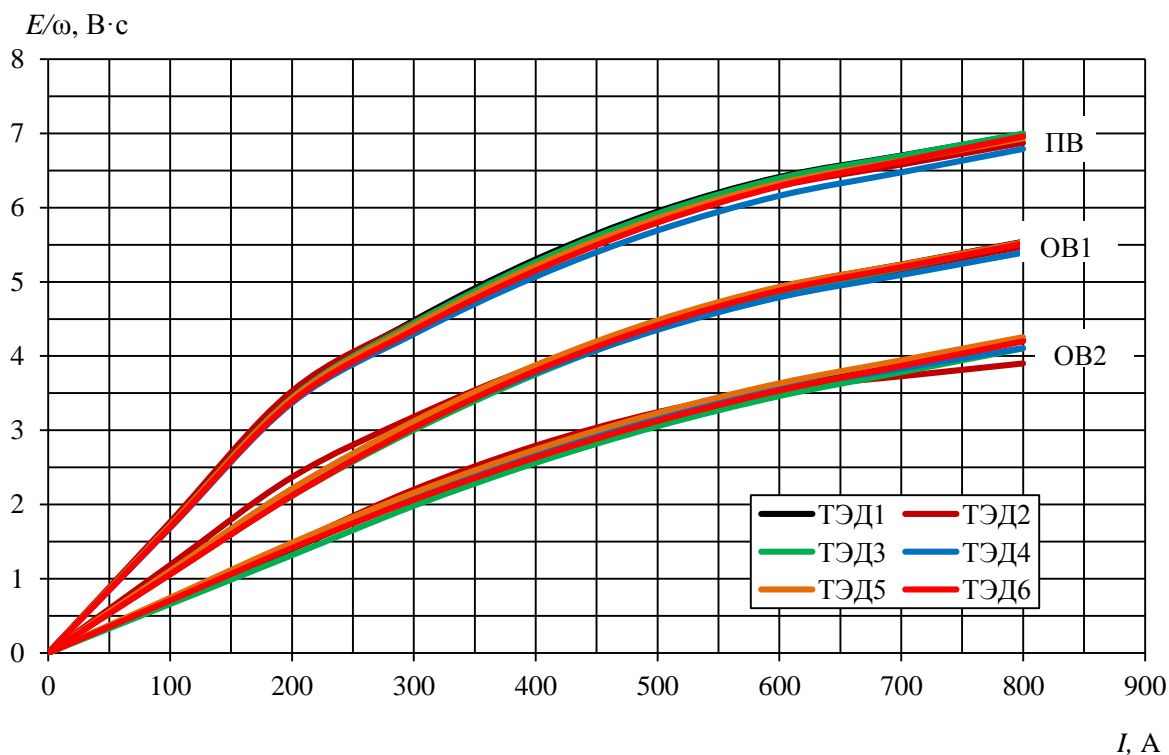


Рис. 4. Нагрузочные характеристики ТЭД тепловоза 2ТЭ116У № 078 секция А:
ТЭД1-ТЭД6 – нагрузочные характеристики 1–6 тяговых двигателей при полном возбуждении (ПВ),
ослабленном возбуждении первой (ОВ1) и второй ступени (ОВ2)

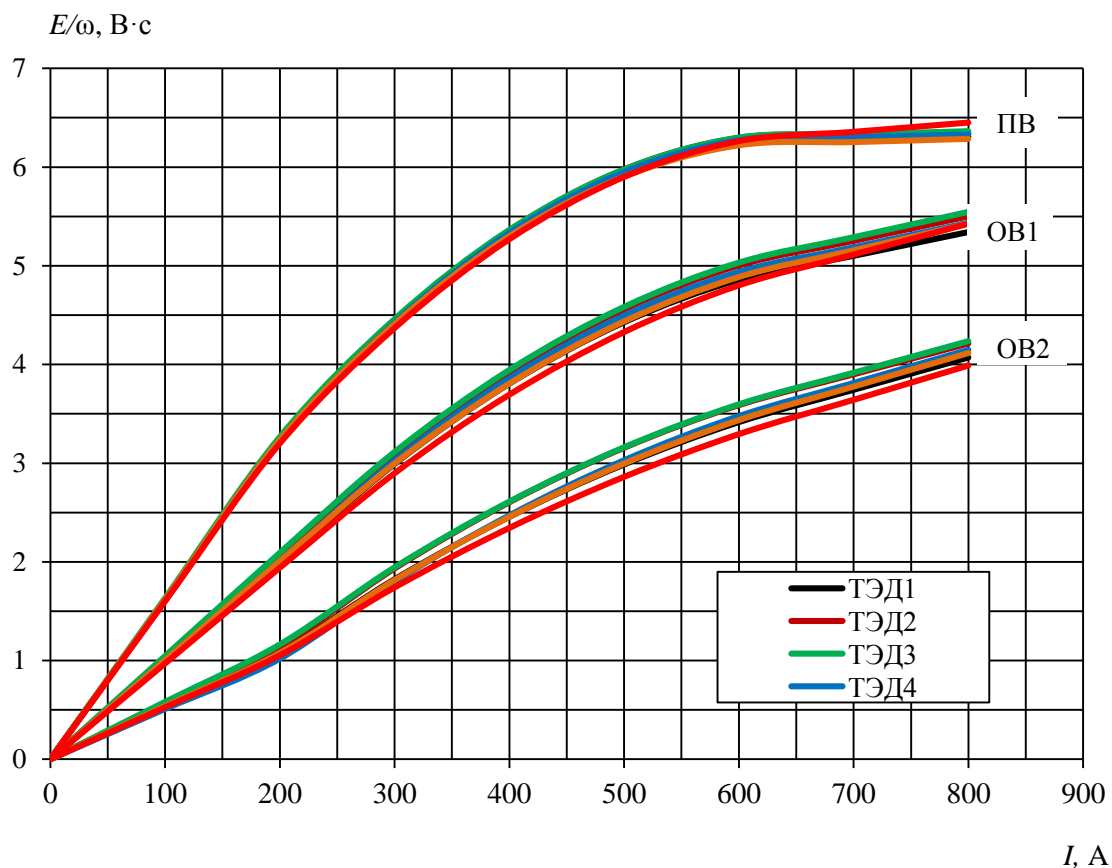


Рис. 5. Нагрузочные характеристики ТЭД тепловоза ТЭП70БС № 0176:

ТЭД1-ТЭД6 – нагрузочные характеристики 1–6 тяговых двигателей при полном возбуждении (ПВ), ослабленном возбуждении первой (ОВ1) и второй ступени (ОВ2)

Выводы

1 Результаты расчета показали возможность определения нагрузочной характеристики тягового двигателя по данным микропроцессорных систем управления и диагностики.

2 Ошибка аппроксимации нагрузочной характеристики не превышает 3 % при коэффициенте детерминации не менее 0,93.

3 При одном и том же значении магнитного потока разброс токов (а соответственно и вращающих моментов) ТЭД одной секции, обусловленный разностью их нагрузочных характеристик, может достигать 15 % и более, что необходимо учитывать при выполнении тяговых расчетов, в том числе при проверке тяговых двигателей на нагревание.

Список литературы

1 Правила тяговых расчетов для поездной работы : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12.05.2016 № 867р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 513 с.

2 Оперативный контроль уровня энергоэффективности магистрального тепловоза рабочего парка / В. А. Перминов, М. В. Федотов, В. В. Грачев, И. Э. Нестеров // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. – 2015. – № 97. – С. 45–58. – ISSN 0452-358X.

3 **Грачев, В. В.** Прескриптивный контроль энергоэффективности силовой установки тепловоза с использованием интеллектуальных методов обработки измерительной информации встроенных средств диагностики : монография / В. В. Грачев. – Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО РГУПС, 2019. – 106 с. – ISBN 978-5-7641-1400-2.

4 **Стрекопытов, В. В.** Электрические передачи локомотивов : учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. В. Стрекопытов, А. В. Грищенко, В. А. Кручек; под редакцией В. В. Стрекопытова. – Москва : Маршрут, 2003. – 310 с. – ISBN 5-89035-081-1.

5 **Грищенко, А. В.** Новые электрические машины локомотивов : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Казаченко. – Москва : ГОУ «Учебного методического центра по образованию на железнодорожном транспорте» – 2008. – 271 с. – ISBN 978-5-89035-520-1.

6 **Курилкин, Д. Н.** Определение сопротивления в цепи тяговых электродвигателей по данным микропроцессорных систем управления / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, В. Ф. Танаев // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – Вып. 4. – С. 74–89. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-4-74-89.

7 **Гмурман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов

References

1 Rules of traction calculations for train work : approved by the Order of JSC «Russian Railways» 12.05.2016 No. 867r. – Moscow : JSC «Russian Railways», 2016. – 513 p.

2 Operational control of the energy efficiency level of the main diesel locomotive of the working park / V. A. Perminov, M. V. Fedotov, V. V. Grachev, I. E. Nesterov // Bulletin of the Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock. – 2015. – No. 97. – P. 45–58. – ISSN 0452-358X.

3 **Grachev, V. V.** Prescriptive control of the energy efficiency of a diesel locomotive power plant using intelligent methods of processing measurement information of built-in diagnostic tools: monograph / V. V. Grachev. – Saint Petersburg : FSUE VO PSTU, 2019. – 106 p. – ISBN 978-5-7641-1400-2.

4 **Strekopytov, V. V.** Electric transmission of locomotives: textbook for universities of railway transport / V. V. Strekopytov, A. V. Grishchenko, V. A. Kruchek; edited by V. V. Strekopytov. – Moscow : Marshrut, 2003. – 310 p. – ISBN 5-89035-081-1.

5 **Grishchenko, A. V.** New electric machines of locomotives : textbook for railway transport universities / A. V. Grishchenko, E. V. Kazachenko. – Moscow : SEI «Educational Methodological Center for Education in Railway Transport», 2008. – 271 p. – ISBN 978-5-89035-520-1.

6 **Kurilkin, D. N.** Determination of resistance in the chain of traction electric motors according to microprocessor control systems / D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, V. F. Tanaev // Bulletin of the results of scientific research. – 2022. – Issue 4. – P. 74–89. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-4-74-89.

7 **Gmurman, V. E.** Probability theory and mathematical statistics: a textbook for universities /

/ В. Е. Гмурман. – Москва : Высшая школа. – V. E. Gmurman. – Moscow : Higher School, 2003. – 2003. – 479 с. – ISBN 5-06-04214-6. 479 p. – ISBN 5-06-04214-6.

D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, V. F. Tanaev

CALCULATION OF LOAD CHARACTERISTICS OF DC TRACTION MOTORS ACCORDING TO MICROPROCESSOR CONTROL AND DIAGNOSTIC SYSTEMS

Abstract. The actual load characteristics of the traction electric motors of a locomotive with electric power transmission according to microprocessor control systems are necessary to clarify the real traction characteristics of locomotives when performing operational traction calculations. The methods of the theory of electrical machines, statistical processing and regression analysis of experimental data were used in the work. Based on the statistical analysis of the registration data of the on-board diagnostics subsystem of 20 sections of diesel locomotives 2TE116U and ТЕР70BS, a method for determining the actual load characteristics of traction motors is proposed and justified. The results obtained allow us to refine the parameters of the traction characteristics of the locomotive and can be used when performing operational traction calculations.

Keywords: load characteristics of traction motors, traction motors, traction drive.

For citation: Kurilkin, D. N. Calculation of load characteristics of DC Traction motors according to microprocessor control and Diagnostic systems / D. N. Kurilkin, V. V. Grachev, V. F. Tanaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 124–131. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_124.

Сведения об авторах

Курилкин Дмитрий Николаевич

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,

кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой,

e-mai: kurilkin@pgups.ru

Грачев Владимир Васильевич

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,

кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,

доктор технических наук, доцент,

e-mai: lt@pgups.ru

Танаев Валерий Фаритович

Московская железная дорога –

филиал ОАО «РЖД»,

начальник Московской железной дороги –

филиала ОАО «РЖД»,

e-mai: lt@pgups.ru

Information about the authors

Kurilkin Dmitry Nikolayevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,

Candidate of Engineering Sciences,

Associate Professor, Head of the Chair

e-mai: kurilkin@pgups.ru

Grachev Vladimir Vasilievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

Chair «Locomotives and Locomotive Facility»,

Doctor of Engineering Sciences,

Associate Professor,

e-mai: lt@pgups.ru

Tanaev Valery Faritovich

Moscow Railway – Branch of

JSC «Russian Railways»,

Head of the Moscow Railway – Branch of

JSC «Russian Railways»,

e-mai: lt@pgups.ru

Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОСУШКИ СЖАТОГО ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕОЛИТОВ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием энергоёмкости процессов осушки сжатого воздуха с применением различных марок цеолитов. Выполнен анализ теплофизических свойств рассматриваемых адсорбентов, определены условия проведения процессов адсорбции в виде задания диапазонов изменения скоростей движения сжатого воздуха через адсорбер, диапазона изменения относительной влажности атмосферного воздуха с учетом определенного класса чистоты сжатого воздуха в соответствии с нормативным документом. На основании полученных результатов, визуализированных в виде гистограмм, проведен анализ энергоэффективности рассматриваемых марок цеолитов, сформулированы выводы.

Ключевые слова: энергоэффективность, цеолит, сжатый воздух, атмосферный воздух, порозность, энергозатраты, компрессор, гистограмма.

Для цитирования: Риполь-Сарагоси, Т. Л. Исследование энергоэффективности процессов осушки сжатого воздуха с использованием цеолитов различных марок / Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 132–138. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_132.

Введение

В настоящее время в практике осушки сжатого воздуха в качестве адсорбентов используются цеолиты и молекулярные сита. Предпочтение этим типам адсорбентов отдается благодаря их высокой избирательной способности к адсорбции и уникальной способности к дифференциации поглощаемых молекул по размерам и форме. Однако следует отметить, что, если для таких адсорбентов, как силикагель и алюмогель, проводились исследования по определению энергетических затрат на реализацию процесса адсорбции влаги из сжатого воздуха [1], то для широко используемых марок цеолитов подобные исследования отсутствуют.

Следовательно, проведение исследований, направленных на определение энергетических затрат на привод компрессора при использовании цеолитов в качестве адсорбентов влаги из сжатого воздуха при различных скоростях его движения и различных относительных влажностях атмосферного воздуха является актуальным [2–3].

Материалы и методы

Для определения выбора наиболее энергетически обоснованной марки цеолита произведём расчёт энергозатрат на привод поршневого компрессора при производстве сжатого воздуха, отправляемого на осушку в адсорберы, заполненные различными марками цеолитов, и проанализируем полученные результаты [4]. В качестве компрессора был выбран поршневой компрессор СБ4/Ф-500.LB75 белорусского производителя Remeza. Рабочие характеристики данного компрессора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Рабочие характеристики компрессора СБ4/Ф-500.LB75

Тип компрессора	Поршневой
Производительность (вход/выход), л/мин	950/760
Рабочее давление, бар	9/7
Мощность двигателя, кВт	5,5
КПД компрессора	0,7
КПД привода	0,8

При проведении расчетов были рассмотрены варианты использования различных марок цеолитов при следующих условиях: относительная влажность атмосферного воздуха изменялась в пределах

от 50 до 100 %, скорость движения потока осушаемого воздуха через адсорбер изменялась в пределах от 0,2 до 0,5 м/с. Расчеты проводились для третьего класса чистоты сжатого воздуха в соответствии с ГОСТ Р ИСО 8573-1-2005. Расчёт энергозатрат на привод компрессора ΔN при использовании цеолитов в качестве сушильного агента производился по формуле [5]

$$\Delta N = \frac{k_3 \cdot G \cdot 2,3 \cdot 10^3 \cdot P_1 \cdot \left[\lg \left(\frac{P_2 + \Delta P}{P_1} \right) - \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \right]}{102 \cdot \eta_k \cdot \eta_n} \cdot 10^3,$$

где k_3 – коэффициент запаса (принимается равным 1.15); G – расход сжатого воздуха, м³/с; P_1 – атмосферное давление, бар; P_2 – давление воздуха на выходе из компрессора, бар; ΔP – аэродинамическое сопротивление слоя адсорбента (с учетом влияния межгранульного пространства, бар; η_k – коэффициент полезного действия компрессора; η_n – коэффициент полезного действия привода.

Результаты расчётов характеристик, приведённых выше, при минимально возможной скорости движения потока 0,2 м/с и относительной влажности 50 % для цеолита NaA, цеолита КА-СО, молекулярного сита RS-144M, молекулярного сита RS-CMS представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты расчёта энергозатрат на привод компрессора
при использовании различных видов цеолитов**

Характеристика	Цеолит NaA	Цеолит КА-СО	МС RS-144M	МС RS-CMS
1	2	3	4	5
d_0 , г/м ³	0,19			
d_k , г/м ³	0,09			
M_a , кг	7,75	7,68	7,02	8,02
V_a , м ³	0,009	0,009	0,012	0,012
ρ_r , кг/м ³	2,2			
D , м	0,204			
H , м	0,28	0,27	0,39	0,37
ε	0,29	0,375	0,083	0,226
ΔP , бар	0,032	0,04	0,013	0,033
ΔN , Вт	68,05	86,70	27,27	71,47

В табл. 2 d_0 – абсолютная влажность наружного воздуха при указанных выше параметрах, г/м³; d_k – влажность воздуха на выходе из адсорбера для обозначенного выше класса чистоты, г/м³; M – масса адсорбента, кг; V_a – объем адсорбера, м³; ρ_r – плотность адсорбента, кг/м³; D – диаметр адсорбера, м²; H – высота слоя адсорбента, м.

Обсуждение

Расчёт на первом режиме работы показал, что наименьшие затраты энергии на привод компрессора получаются при использовании молекулярного сита RS-144M, а наибольшие – при использовании цеолита марки КА-СО. Для определения тенденции изменения затрат энергии на осуществление процесса адсорбции при меняющихся скоростях движения сжатого воздуха и относительных влажностях атмосферного воздуха в обозначенных пределах произведём аналогичные расчёты при скоростях движения воздуха, изменяющихся в пределах от 0,2 до 0,5 м/с, третьем классе чистоты и относительной влажности атмосферного воздуха, изменяющейся от 50 до 100 %. На основании полученных расчётных величин, приведенных ранее [6–9], построим гистограммы зависимости изменения энергозатрат на привод компрессора от изменения скорости движения сжатого воздуха и изменения относительной влажности атмосферного воздуха при соблюдении требований к его качеству, характерных для третьего класса чистоты, в соответствии с приведенным выше нормативным документом. Полученные результаты представлены на рис. 1, а–г.

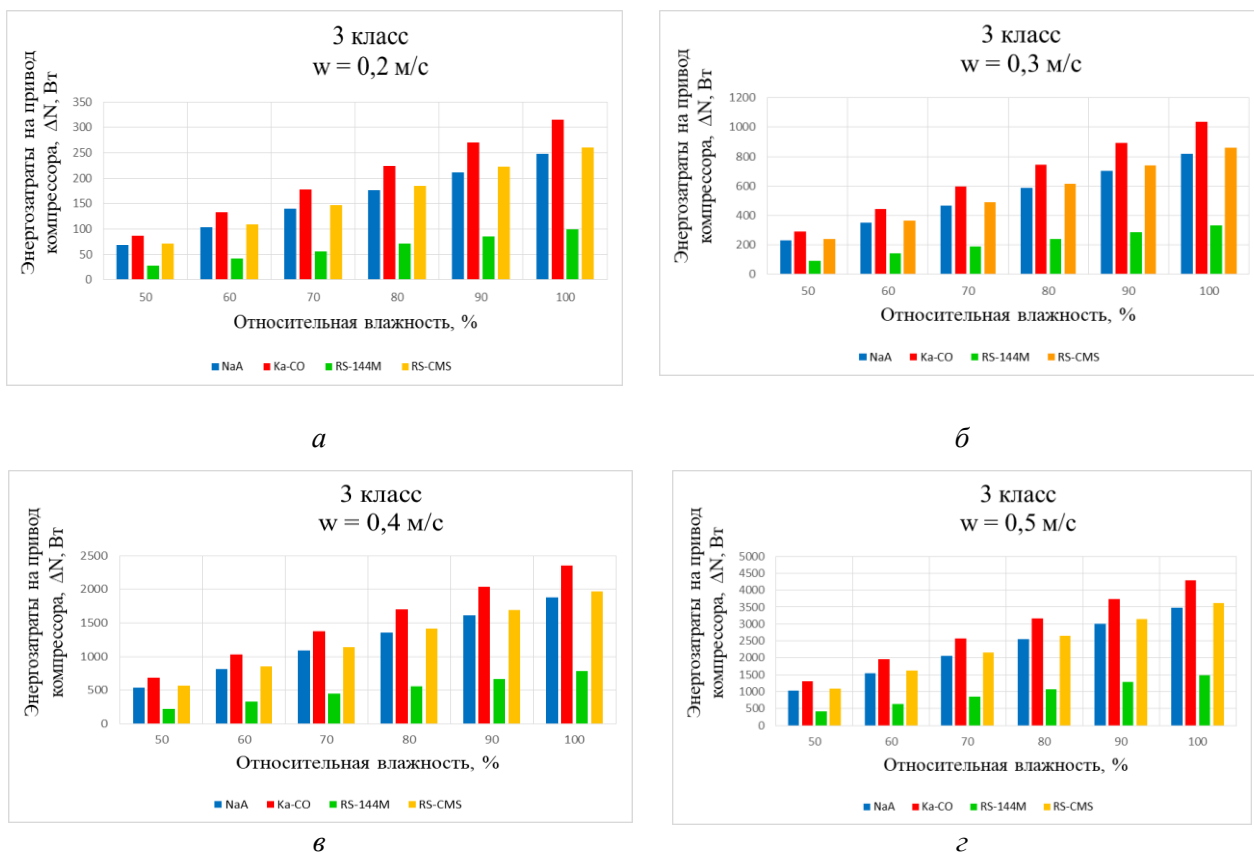
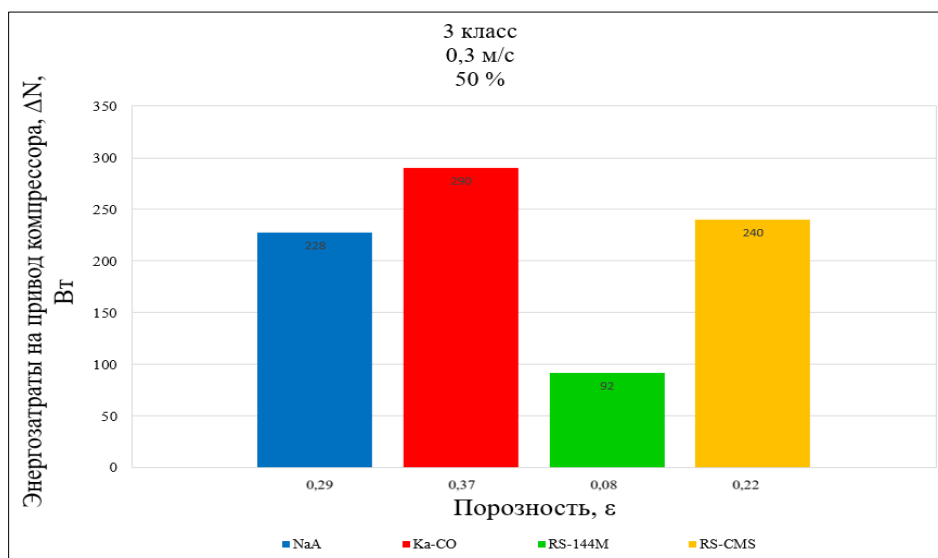


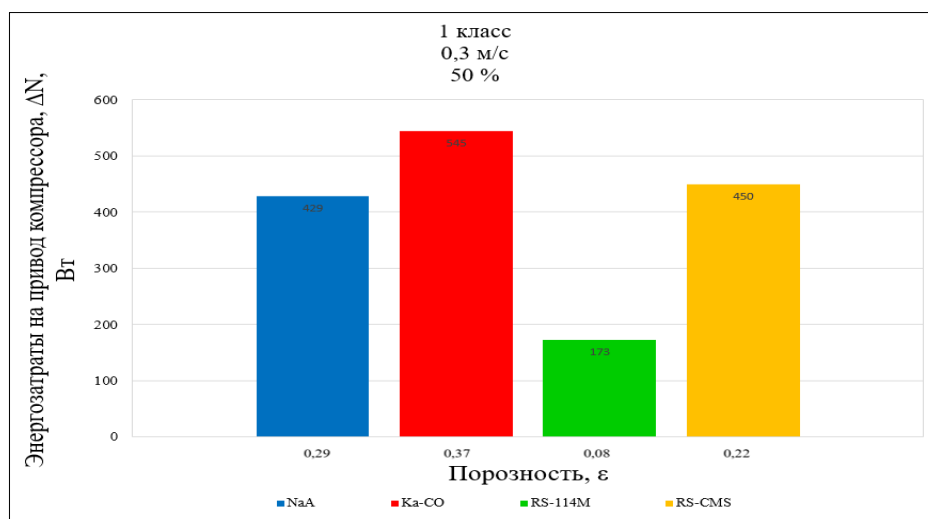
Рис. 1. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и относительной влажности атмосферного воздуха

На приведенных выше графиках отчетливо видно, что наименьшие затраты на привод компрессора обеспечивает использование в качестве сушильного агента (адсорбента) молекулярного сита RS-144M. Такое различие значений объясняется влиянием величины порозности в формуле расчета потерь давления при движении сжатого воздуха через колонну адсорбера. Как уже говорилось ранее, порозность учитывает влияние пустот между гранулами и зависит от соотношения насыпной и кажущейся плотностей. Чем меньше разница между этими двумя характеристиками, тем меньше значение порозности. Иными словами, чем меньше пустот между гранулами и чем плотнее засыпан слой адсорбента, тем меньше затрат электроэнергии потребуется на адсорбционную осушку сжатого воздуха.

Представим данную зависимость в виде гистограмм (рис. 2, а, б), на которых отображена зависимость потерь мощности на привод компрессора от порозности слоя адсорбента для 1-го и 3-го классов чистоты при скорости движения воздуха 0,3 м/с и относительной влажности воздуха 50 %.



а



б

Рис. 2. Зависимость потерь мощности на привод компрессора от вида цеолита и значения его порозности

Из приведённых гистограмм отчётливо видна тенденция увеличения энергозатрат с увеличением скорости движения потока, относительной влажности атмосферного воздуха и требуемого класса его очистки. Анализируя данные, приведённые в табл. 1, и гистограммы, представленные на рис. 1 и 2, можно сделать следующие выводы:

- молекулярное сито RS-144M имеет наименьшую массу среди всех представленных адсорбентов благодаря своей низкой плотности, что позволяет облегчить вес всей засыпки адсорбера;
- наименьший объём и высоту имеют колонны, использующие цеолиты NaA и Ka-CO, после них следуют молекулярные сита;
- в связи с выпуском молекулярного сита RS-144M в виде порошка с размером рабочих пор 3 \AA данный адсорбент обладает самой низкой насыпной плотностью и имеет очень незначительные межгранульные пространства, что обеспечивает низкое значение порозности гранул, всего 8,3 %, что гораздо ниже, чем у других марок. Данный фактор также влияет на глубину осушки сжатого воздуха: чем ниже значение порозности, тем более глубокую осушку сжатого воздуха будет гарантировать адсорбент. А размер рабочих пор идеально подходит для выборочной адсорбции молекул воды;
- наименьшие значения аэродинамического сопротивления также наблюдаются у молекулярного сита RS-144M. Несмотря на то что в формуле расчёта сопротивления присутствует высота ко-

лонны, которая у RS-144M не самая низкая, большое влияние на потери мощности оказывает порозность слоя. Невысокие значения аэродинамического сопротивления обеспечивают равномерное продвижение потока сжатого воздуха, что гарантирует равномерное и качественное его осушение;

– наименьшие значения затрат энергии на привод компрессора отмечаются у адсорбента молекулярное сито марки RS-144M. Полученные значения энергозатрат рассчитаны за период одного часа работы адсорбционной установки. С учетом того что адсорбционные установки работают практически без остановок, кажущиеся незначительными расчётные величины потерь за год накапливаются в тысячи потраченных впустую киловатт энергии. Следовательно, использование молекулярного сита RS-144M является наиболее экономически и энергетически выгодным.

Выводы

Применение молекулярных сит, в частности сита RS-144M, в качестве сушильного агента в адсорбционных процессах осушки сжатого воздуха перспективно и целесообразно, так как:

– обеспечивает равномерную скорость движения сжатого воздуха по всей высоте адсорбционной колонны за счёт низкой насыпной плотности и порозности слоя;

– позволяет произвести глубокую, избирательную осушку сжатого воздуха за счет высокой адсорбционной емкости и размера пор, соответствующего размеру молекул воды;

– форма выпуска молекулярного сита в виде активированного порошка позволяет проводить плотную укладку слоя в колонне и тем самым снижать гидравлические сопротивления при прохождении сжатого воздуха через слой адсорбента, как следствие будут снижены расходы на потребляемую электроэнергию;

– обеспечивает наименьшие расходы адсорбента, а, следовательно, низкие материальные затраты;

– благодаря сочетанию вышеописанных свойств молекулярное сито RS-144M имеет преимущества при использовании в качестве адсорбента в процессах осушки сжатого воздуха и может применяться в различных технологических процессах, связанных с повышением его качества.

На основании приведенных выше аргументов можно утверждать, что использование молекулярных сит способствует снижению энергоёмкости процесса осушки сжатого воздуха. Наиболее эффективным является молекулярное сито RS-144M. Его использование позволяет осушать сжатый воздух до требуемых классов чистоты с наименьшими энергетическими затратами. Остальные адсорбенты также позволяют осушить сжатый воздух до требуемого класса чистоты, однако будут иметь энергозатраты в несколько раз больше, чем RS-144M, что делает их применение нецелесообразным.

Список литературы

1 **Воробинская, Л. И.** Актуальные проблемы экологической политики на железнодорожном транспорте / Л. И. Воробинская, В. А. Финоченко // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» («ТрансПромЭк-2019») : труды Международной научно-практической конференции, 90-летию Ростовского государственного университета путей сообщения посвящается, Ростов-на-Дону, 24–26 октября 2019 года. Том 1. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 92–95. – ISBN 978-5-88814-994-2.

2 **Риполь-Сарагоси, Т. Л.** Снижение энергоёмкости процесса адсорбции при использовании композитных адсорбентов / Т. Л. Риполь-Сарагоси, М. А. Гладких // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2021 года. Том 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 83–86. – ISBN 978-5-907295-41-4.

References

1 **Vorobinskaya, L. I.** Actual problems of environmental policy in railway transport / L. I. Vorobinskaya, V. A. Finochenko // Collection OF scientific papers «Actual problems and prospects of development of transport, industry and economy of Russia» («TransPromEk-2019») : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, October 24–26, 2019. Volume 1. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – P. 92–95. – ISBN 978-5-88814-994-2.

2 **Ripol-Saragosi, T. L.** Reduction of the energy intensity of the adsorption process when using composite adsorbents / T. L. Ripol-Saragosi, M. A. Gladkikh // Transport: science, education, production: collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 19–21, 2021. Volume 2. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 83–86. – ISBN 978-5-907295-41-4.

3 Роль энергосбережения в современных условиях / И. А. Эстрин, И. А. Соколенко, В. Е. Мамутов, Д. С. Володин // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 24–25 февраля 2022 года. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – С. 97–101. – ISBN 978-5-907295-64-3.

4 **Ripol-Saragosi, T.** Investigation adsorption process energy capacity reducing possibility by composite adsorbents implement / T. Ripol-Saragosi, L. Ripol-Saragosi // Journal of Physics : Conference Series, Vladivostok, 2021. – P. 012022. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012022.

5 **Риполь-Сарагоси, Л. Ф.** Пути снижения энергоёмкости процессов подготовки сжатого воздуха / Л. Ф. Риполь-Сарагоси, А. В. Борисенко // Транспорт : наука, образование, производство : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. Том 1. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 360–363. – ISBN 978-5-88814-986-7.

6 **Устюшкينا, А. И.** Исследование адсорбционных характеристик различных адсорбентов / А. И. Устюшкينا // Студенческая научная весна : Тезисы докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 175-летию Н. Е. Жуковского, Москва, 01–30 апреля 2022 года. – Москва : Издательский дом «Научная библиотека», 2022. – С. 24–25. – ISBN 978-5-907497-55-9.

7 **Luferchik, Ya. S.** Analysis of modern adsorbents to identify the most effective one / Ya. S. Luferchik, M. A. Avdeeva // Modern Science. – 2016. – No. 12. – P. 38–41. – EDN XKQIRZ.

8 **Патент № 2564407 C1 Российская Федерация, МПК B01D 15/18, C07C 7/12.** Улучшение энергетической эффективности адсорбционного разделения : № 2014122862/04 : заявл. 21.09.2012 : опубл. 27.09.2015 / С. Д. Фрей, Л. Х. Петтенгиль, М. Р. Ван Де Котте. – EDN ZFKSGD.

9 **Пузырев, И. С.** Темплатный синтез и сорбция паров воды пористыми силикагелями с высокой удельной площадью поверхности / И. С. Пузырев, Е. П. Собина, С. В. Медведевских // Butlerov Communications. – 2013. – Том 36. – № 10. – С. 141–145. – ISSN 2074-0212.

3 The role of energy saving in modern conditions / I. A. Estrin, I. A. Sokolenko, V. E. Mamutov, D. S. Volodin // Energy of transport. Actual problems and tasks: collection of scientific papers of the VI International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, February 24–25, 2022. – Rostov-on-Don : RSTU, 2022. – P. 97–101. – ISBN 978-5-907295-64-3.

4 **Ripol-Saragosi, T.** Investigation adsorption process energy capacity reducing possibility by composite adsorbents implement / T. Ripol-Saragosi, L. Ripol-Saragosi // Journal of Physics : Conference Series, Vladivostok, 2021. – P. 012022. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012022.

5 **Ripol-Saragosi, L. F.** Ways to reduce the energy intensity of compressed air preparation processes / L. F. Ripoll-Saragosi, A. V. Borisenko // Transport : science, education, production: collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019. Volume 1. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – P. 360–363. – ISBN 978-5-88814-986-7.

6 **Ustyushkina, A. I.** Investigation of the adsorption characteristics of various adsorbents / A. I. Ustyushkina // Student Scientific Spring : Abstracts of the All-Russian Student Conference dedicated to the 175th anniversary of N. E. Zhukovsky, Moscow, April 01–30, 2022. – Moscow : Publishing House «Scientific Library», 2022. – P. 24–25. – ISBN 978-5-907497-55-9.

7 **Luferchik, Ya. S.** Analysis of modern adsorbents to identify the most effective one / Ya. S. Luferchik, M. A. Avdeeva // Modern Science. – 2016. – No. 12. – P. 38–41. – EDN XKQIRZ.

8 **Patent No. 2564407 C1 Russian Federation, IPC B01D 15/18, C07C 7/12.** Improvement of the energy efficiency of adsorption separation : No. 2014122862/04 : application 21.09.2012 : publ. 27.09.2015 / S. D. Frey, L. H. Pettengil, M. R. Van De Cotte. – EDN ZFKSGD.

9 **Puzyrev, I. S.** Template synthesis and sorption of water vapor by porous silica gels with a high specific surface area / I. S. Puzyrev, E. P. Sobina, S. V. Medvedevskikh // Butlerov Communications. – 2013. – Vol. 36. – No. 10. – P. 141–145. – ISSN 2074-0212.

T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi

INVESTIGATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF COMPRESSED AIR DRYING PROCESSES USING VARIOUS BRAND ZEOLITES

Abstract. The paper considers issues related to the study of the energy intensity of the drying processes of compressed air using various grades brand zeolites, analyzes the thermo-physical properties of the adsorbents under consideration, determines the conditions for the

adsorption processes in the form of setting ranges of changes in the speeds of compressed air through the adsorber, the range of changes in the relative humidity of atmospheric air using certain class of compressed air purity in accordance with the normative a document. Based on the obtained results, visualized in the form of histograms, an analysis of the energy efficiency of the brand zeolites under consideration is carried out. The conclusions are formulated.

Keywords: energy efficiency, zeolite, compressed air, atmospheric air, porosity, energy consumption, compressor, histogram.

For citation: Ripol-Saragosi, T. L. Investigation of the energy efficiency of Compressed Air Drying processes using various brand zeolites / T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 132–138. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_132.

Сведения об авторах

Риполь-Сарагоси Татьяна Леонидовна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: Ripol-saragosi@mail.ru

Риполь-Сарагоси Леонид Францискович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ripol-saragosi@mail.ru

Information about the authors

Ripoll-Saragosi Tatiana Leonidovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Heat Power Engineering on Railway Transport»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: Ripol-saragosi@mail.ru

Ripol-Saragosi Leonid Franciskovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and Cars Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: ripol-saragosi@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 005.6 ; 658.56

DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_139

*С. А. Васин, А. В. Евсеев, В. Ф. Першин, И. А. Юраскова***УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ НЕКОТОРЫХ КОМПОЗИТНЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ МОДИФИКАЦИЕЙ НАНОКОМПОНЕНТАМИ**

Аннотация. Авторы предлагают к рассмотрению новый подход к анализу формирования уровня качества некоторых композитных и других материалов при модификации их нанокompонентами. Исследуются не только вопросы модификации свойств гетерогенных смесей и композитов, но и технологические способы и особенности производства самих модифицирующих компонентов. В качестве машин и агрегатов для производства наномодифицирующих компонентов, на примере производных графена, представлены защищенные технические решения в виде роторного модуля для гидроэксплозии графита и барабанной мельницы. В качестве композитных материалов и изделий с новыми или улучшенными свойствами предложены премиксы с повышенной эффективностью использования, строительные бетоны с повышенными прочностными характеристиками, металлорежущий инструмент с повышенными демпфирующими свойствами, а также синтетические смазки и масла со сверхнизкой температурой замерзания. Сформулировано соответствие данных технологий общей концепции всеобщего управления качеством.

Ключевые слова: гетерогенные смеси, композиты, композитные изделия, всеобщее управление качеством, система менеджмента качества, модифицирование свойств, наноматериалы.

Для цитирования: Управление качеством некоторых композитных и гетерогенных материалов модификацией нанокompонентами / С. А. Васин, А. В. Евсеев, В. Ф. Першин, И. А. Юраскова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 139–145. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_139.

Введение

Производство композитных материалов является одним из наиболее важных, актуальных и приоритетных направлений развития науки и техники, что соответствует и удовлетворяет критической технологии получения и обработки функциональных наноматериалов (Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899) и Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642).

Модификация свойств композитных материалов и гетерогенных смесей, из которых будут изготовлены промышленные изделия машиностроения, материалобработки и других отраслей промышленного производства, является одним из самых перспективных и актуализированных на государственном уровне направлений развития промышленного производства. Особенно это касается продукции и оборудования двойного и специального назначения, поскольку позволяет в значительной степени управлять конечными показателями их качества.

Такая модификация позволяет в большинстве случаев не только в разы улучшать свойства и параметры традиционных конструкционных, композитных и гетерогенных материалов, но и зачастую формировать у них новые уникальные свойства, которые в свою очередь могут не только расширять области применения данных материалов, но и прогнозировать создание новых композитов и способов их использования [1–14].

Исследования и экспериментальные разработки в данном направлении проводились на примере композитных бетонов, смазок, премиксов и других материалов, и композиций. В качестве модифицирующих компонентов использовались графеновые суспензии, щелочные бетоны и соли некоторых металлов [3–7, 9–12].

Постановка и решение задач

В таблице представлены результаты испытаний полученных материалов как со значительным улучшением их эксплуатационных характеристик, так и с принципиально новыми свойствами, позволяющими их использование в совершенно новом качестве.

Результаты испытаний и показатели качества некоторых композитных и гетерогенных материалов, модифицированных нанокomпонентами

Материал (<i>T</i> – традиционный, <i>M</i> – модифицированный)	Композитный бетон		Строительный бетон		Синтетические масла и смазки		Премиксы	
	<i>T</i>	<i>M</i>	<i>T</i>	<i>M</i>	<i>T</i>	<i>M</i>	<i>T</i>	<i>M</i>
Демпфирующие свойства, %	100	до 700						
Стойкость инструмента	1.0	1.2–1.7						
Прочность, %			100	до 200				
Прочность бетона на сжатие и изгиб, %			100	до 130				
Водопоглощение, %			100	до 30				
Рабочие температуры, °С					до –20	до –70		
Износ деталей, %					100	до 30		
Соотношение компонентов							1:10	1:50
Коэффициент вариации V_0 , %							6-9	1-2

Данные технологические решения реализуются с помощью различных по морфологии технических устройств. Ниже рассмотрено несколько примеров технологических методов и реализующих их машин для получения модифицирующих нанокomпонентов и непосредственной модификации ими материалов и композитов.

На рис. 1 представлена оригинальная разработка авторов [7] – роторная машина (модуль) для гидроэксфолиации графита с целью получения модификатора композитов – малослойных и многослойных производных графена. Установка находится в стадии экспериментальной апробации, и соответствующие эмпирические результаты будут представлены авторами в последующих работах.



Рис. 1. Роторный модуль для гидроэксфолиации графита

С помощью представленного на рис. 1 модуля эксфолиации можно получать графеновые субстанции, являющиеся эффективной основой для модификации композитных бетонов.

Если рассматривать в качестве интегрального показателя преимуществ режущего инструмента его стойкость, то можно утверждать, что использование композитных бетонов в конструкциях такого инструмента повышает ее в сравнении с обычным инструментом в 1,2–1,7 раза, что подтверждается многолетними экспериментами [4, 5].

Доказано, что для изготовления державок резцов, торцевых фрез (рис. 2) можно применять бетонполимеры, шлакощелочные бетоны и бетоны на основе шлакомагнезии, что значительно снижает их себестоимость.

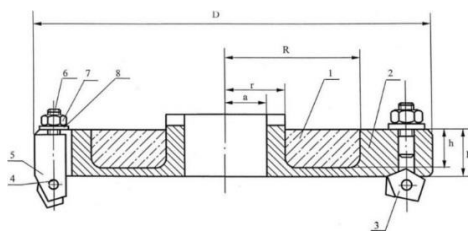


Рис. 2. Торцевая фреза с корпусом, содержащим композитный бетон:

1 – кольцеобразная выборка, заполненная композитным материалом; *2* – корпус; *3* – режущая пластина; *4* – штифт; *5* – державка; *7* – гайка; *8* – шайба

На базе зависимостей прочности и логарифмического декремента колебаний от состава композитного бетона была разработана методика выбора состава композита для изготовления державок резцов с требуемыми диссипативными и прочностными характеристиками. В результате экспериментов выявлено, что при использовании резцов с державками из композитов на основе бетона происходит подавление высокочастотных компонент в спектре динамической составляющей силы резания в диапазоне частот от 6000–15 000 Гц.

Показано, что кроме державок для резцов и торцевых фрез возможно применение корпусов и державок из композиционных материалов на основе бетона для других видов режущих инструментов (борштанг, расточных инструментов и других) [4, 5].

Гетерогенные композиции с детерминированной однородностью уже сейчас получают с помощью нового класса оборудования – нонмиксеров, позволяющих формировать упорядоченную структуру материала с заведомо гарантированными показателями качества и, соответственно, эффективностью использования [3, 8–10].

В работах [3, 6, 8, 9] рассмотрены возможные конструкции и способы получения смесей (материалов) заданного качества с высокой вероятностью и необходимыми свойствами. В частности, при испытании роторного нонмиксера для верификации математической модели детерминированного формирования однородности смеси был разработан опытный стенд, на котором проводились эксперименты по дозированию и нонмиксингу премиксов, используемых в комбикормовой промышленности и животноводстве (рис. 3) [3]. Премиксы модифицировались порошками марганца (II) углекислого основного водного (формула $MnCO_3 \cdot nMn(OH)_2 \cdot nH_2O$) и меди (II) углекислой основной (карбонат меди, формула $CuCO_3$) как ключевыми компонентами. Результаты экспериментов [3, 6, 8, 9] представлены в таблице.

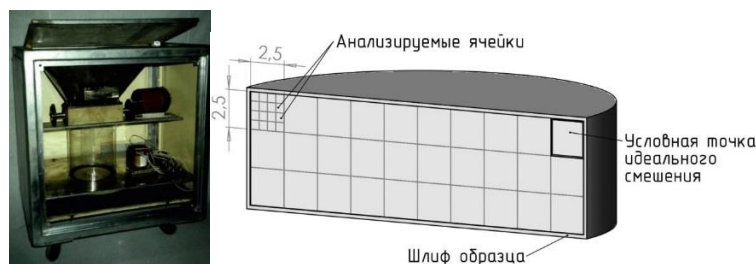


Рис. 3. Роторный нонмиксер для проведения экспериментов детерминированного формирования однородности премиксов и схема исследования образцов

При модифицировании строительного бетона графеновые пластины получают в воде, которая впоследствии используется в качестве воды затворения при приготовлении бетона. Поскольку графеновые пластины имеют огромную поверхностную энергию, при гидратации цемента они являются центрами кристаллообразования. Чем больше центров, тем больше кристаллов и тем они меньше. Чем меньше кристаллы при гидратации цемента, тем он плотнее и прочнее [11, 12]. Свойства модифицированных графеносодержащими фракциями строительных бетонов [4, 5, 11] также сведены в таблицу.

При модифицировании эпоксидной смолы и полимерных композитов на ее основе применяют графеновые пластины, которые получают в отвердителе смолы. Графеновые пластины изменяют структуру полимера. Они работают как связи между полимерными цепочками.

При модифицировании моторных масел и пластичных смазок графеновые пластины получают непосредственно в моторных маслах или смазках, которые являются основой пластичной смазки. В данном случае графен непосредственно снижает трение, поскольку связь между слоями графена очень слабая.

Для получения графеновых суспензий, а именно синтетических смазок и масел со сверхнизкой температурой замерзания, использовалась лабораторная барабанная мельница (рис. 4) с мелющими стержнями (рис. 5), которые соединены между собой. Видеозапись движения стержней в поперечном сечении вращающегося барабана показала, что стержни, соединенные между собой гибким тросом, а также свободные стержни периодически двигаются вверх вместе с барабаном, а затем сдвигаются вниз в исходное положение. Эффект сдвига на частицах может произойти только тогда, когда стержни соскальзывают вниз [13].

Экспериментально установлено, что время движения стержней вверх и время скольжения стержней вниз почти одинаковы. Таким образом, за время, когда материал и стержни остаются во вращающемся барабане, частицы графита расслаиваются. Стержни были соединены с неподвижным основанием с помощью кронштейна. Точно так же стержни были закреплены в лабораторной установке с барабаном диаметром 140 мм и длиной 100 мм. В ходе экспериментов угловая скорость вращения барабана менялась с 56 до 141 об/мин.



Рис. 4. Экспериментальная установка – барабанная мельница



Рис. 5. Компоновка мелющих стержней

Таким образом, разработчиками была создана параметрическая серия мельниц производительностью для многослойного графена от 0,077 до 0,884 г/ч [13]. Результаты практической апробации полученных модифицированных масел и смазок [7, 13, 14] также показаны в таблице, представленной выше.

Заключение (выводы)

Резюмируя вышеизложенное, авторы позиционируют предлагаемые технологии как наиболее перспективные методы при производстве новых материалов с улучшенными и новыми показателями качества на основе использования модифицирующих наноконпонентов. При этом данные научно-технические разработки полностью соответствуют общей концепции всеобщего управления качеством (TQM) и требованиям системы менеджмента качества. С этой целью авторами также был разработан программный комплекс [14], позволяющий, используя закон Парето, создавать технологические регламенты синтеза новых высококачественных и высокоэффективных материалов, а также оптимизировать их для производства гетерогенных смесей и композитных материалов максимального качества на основе имеющихся производственно-технических возможностей и перспектив их развития.

Список литературы

- 1 ГОСТ ISO 9000-2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь : межгосударственный стандарт : введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2013 г. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 декабря 2011 г. № 1574-ст ; переиздание : октябрь 2020 г. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 28 с.
- 2 ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования : национальный

References

- 1 GOST ISO 9000-2011. Quality management systems. Main provisions and vocabulary : interstate standard : put into effect as a national standard of the Russian Federation from January 1, 2013 by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 22, 2011 No. 1574-st ; reissue : October 2020 – Moscow : Standartinform, 2020. – 28 p.
- 2 GOST R ISO 9001-2015. Quality management systems. Requirements : National Standard of the

стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2015 г. № 1391-ст. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 24 с.

3 **Евсеев, А. В.** Теория и оборудование детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.02.13 / А. В. Евсеев. – Тула, 2021. – 297 с.

4 **Васин, С. А.** Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С. А. Васин. – Москва : Mashinostroenie, 2006. – 383 с. – ISBN 5-217-03333-9 (В пер.)

5 **Патент № 2280542 Российская Федерация, МКИ В23 27/00.** Резец / С. А. Васин, Л. А. Васин, Н. Н. Бородкин. – № 2005112363/02 ; заявл. 25.04.2005 ; опубл. 27.07.2006, Бюл. № 21. – 24 с.

6 **Патент № 2707998 Российская Федерация.** Способ получения смеси из сыпучих компонентов и устройство для его осуществления / А. В. Евсеев. – № 2019104861 ; заявл. : 21.02.2019 ; опубл. 03.12.2019, Бюл. № 34. – 8 с.

7 **Патент № 2783291 Российская Федерация.** Устройство для получения графеносодержащих суспензий эксфолиацией графита / А. В. Евсеев, С. А. Васин, В. Ф. Першин. – № 2022108390 ; заявл. : 29.03.2022 ; опубл. 11.11.2022, Бюл. № 32. – 20 с.

8 **Евсеев, А. В.** Нонмиксинг / А. В. Евсеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Вып. 9. – С. 27–36. – ISSN 2071-6168.

9 **Evseev, A. V.** Accuracy of discrete metering devices in relation with the criterion of formed mixture quality assessment / A. V. Evseev // Journal of Physics : Conf. Series. – 2019. – Vol. 1260. – P. 032014. – DOI 10.1088/1742-6596/1260/3/032014.

10 **Сокольчик, П. Ю.** Прогноз и управление качеством гетерогенных сыпучих смесей / П. Ю. Сокольчик, С. И. Сташков, М. В. Малимон // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2013. – № 1. – С. 64–83. – ISSN 2224-9400.

Russian Federation: official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 28, 2015 No. 1391-st. – Moscow : Standartinform, 2015. – 24 p.

3 **Evseev, A. V.** Theory and equipment of deterministic formation of homogeneity of heterogeneous mixture : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.02.13 / A. V. Evseev. – Tula, 2021. – 297 p.

4 **Vasin, S. A.** Prediction of tool vibration resistance during turning and milling / S. A. Vasin. – Moscow : Mashinostroenie, 2006. – 383 p. – ISBN 5-217-03333-9.

5 **Patent No. 2280542 Russian Federation, MKI B23 27/00.** Cutter / S. A. Vasin, L. A. Vasin, N. N. Borodkin. – No. 2005112363/02 ; filed 25.04.2005 ; published 07.27.2006, Bull. No. 21. – 24 p.

6 **Patent No. 2707998 Russian Federation.** The method of obtaining a mixture of bulk components and a device for its implementation / A. V. Evseev. – No. 2019104861 ; filed 21.02.2019 ; published 12.03.2019, Bull. No. 34. – 8 p.

7 **Patent No. 2783291 Russian Federation.** Device for obtaining graphene-containing suspensions by graphite exfoliation / A. V. Evseev, S. A. Vasin, V. F. Pershin. – No. 2022108390 ; filed 29.03.2022 ; published 11.11.2022, Bull. No. 32. – 10 p.

8 **Evseev, A. V.** Nonmixing / A. V. Evseev // Proceedings of the Tula State University. Technical sciences. – 2019. – Iss. 9. – P. 27–36. – ISSN 2071-6168.

9 **Evseev, A. V.** Accuracy of discrete metering devices in relation with the criterion of formed mixture quality assessment / A. V. Evseev // Journal of Physics : Conf. Series. – 2019. – Vol. 1260. – P. 032014. – DOI 10.1088/1742-6596/1260/3/032014.

10 **Sokolchik, P. Yu.** Forecast and quality control of heterogeneous bulk mixtures / P. Yu. Sokolchik, S. I. Stashkov, M. V. Malimon // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology. – 2013. – No. 1. – P. 64–83. – ISSN 2224-9400.

11 Аль-шиблави, Карам Али. Армирование бетонных изделий полимерными композиционными материалами: современное состояние и перспективы / Карам Али Аль-шиблави, В. П. Ярцев, В. Ф. Першин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 145. – eISSN 2223-5167.

12 Весовое дозирование зернистых материалов / В. Ф. Першин, С. В. Першина, А. В. Катыльмов, В. Г. Однолько. – Москва : Машиностроение, 2009. – 260 с. – ISBN 978-5-94275-484-6.

13 Результаты исследований смазки, модифицированной многослойным графеном / В. К. Нагдаев, В. С. Вязинкин, А. В. Забродская [и др.] // Наука в центральной России. – 2021. – № 2(50). – С. 71–77. – DOI 10.35887/2305-2538-2021-2-71-77.

14 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611457 Российская Федерация. Программа расчёта показателей качества смесей и композитов на основе диаграммы Парето / А. В. Евсеев, С. А. Васин, Д. И. Благовещенский [и др.]. – № 2023610173 ; заявл. 09.01.2023 ; зарег. 19.01.2023.

11 Al-Shiblawi, Karam Ali. Reinforcement of concrete products with polymer composite materials: current state and prospects / Karam Ali Al-Shiblawi, V. P. Yartsev, V. F. Pershin // Online journal "NAUKOVEDENIE". – 2017. – Vol. 9, No. 6. – 145 p. – eISSN 2223-5167.

12 Weight dosing of granular materials / V. F. Pershin, S. V. Pershina, A. V. Katalymov, V. G. Odolko. – Moscow : Mashinostroenie, 2009. – 260 p. – ISBN 978-5-94275-484-6.

13 Results of studies of grease modified with multilayer graphene / V. K. Nagdaev, V. S. Vyazinkin, A. V. Zabrodskaya [et al.] // Science in the Central Russia. – 2021. – No. 2(50). – P. 71–77. – DOI 10.35887/2305-2538-2021-2-71-77.

14 Certificate of state registration of a computer program No. 2023611457 Russian Federation. The program for calculating the quality indicators of mixtures and composites based on the Pareto diagram / A. V. Evseev, S. A. Vasin, D. I. Blagoveshchensky [et al.]. – No. 2023610173 ; filed 09.01.2023 ; registered 09.01.2023.

S. A. Vasin, A. V. Evseev, V. F. Pershin, I. A. Yuraskova

QUALITY CONTROL OF SOME COMPOSITE AND HETEROGENEOUS MATERIALS BY MODIFICATION WITH NANOCOMPONENTS

Abstract. The authors propose for consideration a new approach to the analysis of the formation of the quality level of some composite and other materials when modified with nanocomponents. Not only the issues of modification of the properties of heterogeneous mixtures and composites are investigated, but also technological methods and features of the production of the modifying components themselves are considered. As machines and units for the production of nano-modifying components using graphene derivatives as an example, protected technical solutions are presented in the form of a rotary module for graphite hydro exfoliation and a drum mill. As composite materials and products with new or improved properties, pre-mixes with increased efficiency of use, building concretes with increased strength characteristics, metal-cutting tools with increased damping properties, as well as synthetic lubricants and oils with ultra-low freezing point are offered. The correspondence of these technologies to the general concept of total quality management is formulated.

Keywords: heterogeneous mixtures, composites, composite products, total quality management, quality management system, property modification, nanomaterials.

For citation: Quality control of some composite and heterogeneous materials by modification with nanocomponents / S. A. Vasin, A. V. Evseev, V. F. Pershin, I. A. Yuraskova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 139–145. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_139.

Сведения об авторах

Васин Сергей Александрович

Тулльский государственный университет (ТулГУ),
кафедра «Городское строительство, архитектура
и дизайн»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: vasin_sa53@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

Евсеев Алексей Владимирович

Тульский государственный университет
(ТулГУ),
кафедра «Промышленная автоматика
и робототехника»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: ews1972@mail.ru

Першин Владимир Федорович

Тамбовский государственный технический
университет (ТГТУ),
кафедра «Техника и технологии производства
нанопродуктов»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: pershin.home@mail.ru

Юраскова Ирина Андреевна

Тульский государственный университет
(ТулГУ),
кафедра «Промышленная автоматика и
робототехника»,
аспирант, ассистент,
e-mail: yuraskova.ira@yandex.ru

Evseev Alexey Vladimirovich

Tula State University (TulSU),
Chair «Industrial Automation and Robotics»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: ews1972@mail.ru

Pershin Vladimir Fyodorovich

Tambov State Technical University (TSTU),
Chair «Engineering and Technology Production
of Nanoproducs»,
Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
e-mail: pershin.home@mail.ru

Yuraskova Irina Andreevna

Tula State University (TulSU),
Chair «Industrial Automation and Robotics»,
Postgraduate Student,
Lecture,
e-mail: yuraskova.ira@yandex.ru

С. А. Васин, Е. В. Пантюхина

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ДИСКОВЫХ БУНКЕРНЫХ ЗАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ С НЕЯВНОЙ АСИММЕТРИЕЙ

Аннотация. Рассмотрены основные проблемы ориентирования деталей с неявной асимметрией в традиционных механических дисковых бункерных загрузочных устройствах, при которых резко снижаются их надежность и производительность. Предложенные конструктивные решения обеспечат требуемые значения указанных показателей при захвате и ориентировании деталей формы тел вращения с неявной асимметрией. Показаны зоны допустимых значений основных конструктивных параметров захватывающих и ориентирующих органов, усовершенствованных механических дисковых бункерных загрузочных устройств. Разработанные конструктивные ограничения позволяют определить оптимальные параметры основных рабочих органов бункерных загрузочных устройств для широкой номенклатуры деталей с неявной асимметрией.

Ключевые слова: автоматическая загрузка, бункерное загрузочное устройство, ориентирование деталей с асимметрией, детали с неявной асимметрией, надежность ориентирования деталей.

Для цитирования: Васин, С. А. Разработка конструктивных ограничений на параметры усовершенствованных дисковых бункерных загрузочных устройств для деталей с неявной асимметрией / С. А. Васин, Е. В. Пантюхина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 146–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_146.

Штучные детали, элементы, заготовки и другие предметы обработки формы тел вращения с неявной асимметрией широко используют при производстве широкой номенклатуры изделий в различных отраслях промышленности. Координата центра масс таких деталей находится практически в середине продольной оси симметрии – $x_c \approx 0,5l$, а отношение диаметров противоположных торцов находится в диапазоне $0,6 \leq d_2/d_1 \leq 0,9$. В зависимости от геометрической формы таких деталей встречаются следующие три их группы. К первой группе относятся сплошные и полые детали с торцом в виде усеченного конуса, угол при вершине которого $2\beta \leq 30^\circ$. Отношение длины и диаметра наибольшего из торцов у таких деталей может находиться в диапазоне $3 \leq l/d_1 \leq 5$. Детали этой группы с $1,5 \leq l/d_1 \leq 3$ отличаются незначительной высотой асимметричного торца, отношение которой к общей длине детали находится в диапазоне $0,25 \leq h/l \leq 0,3$. К этой же группе относятся близкие к равномерным детали, характеризуемые отношением $1 \leq l/d_1 \leq 0,6$. Ко второй группе относятся ступенчатые детали с различными диаметрами торцов. Для них характерно отношение основных геометрических параметров в диапазонах $3 \leq l/d_1 \leq 5$ и $0,6 \leq l/d_1 \leq 1$. К третьей группе относятся детали в форме колпачка со сферическим торцом, радиус которого больше половины диаметра цилиндрического торца, и асимметричным скругленным цилиндрическим торцом, диаметр которого приблизительно равен диаметру противоположного цилиндрического торца $d_2 \approx d_1$ [1].

Автоматическую загрузку деталей с неявной асимметрией в сборочное оборудование должны осуществлять надежные и производительные системы на базе бункерных загрузочных устройств (БЗУ), обеспечивающих захват единичной детали из общей массы, ее ориентирование и выдачу в ориентированном положении в приемный лоток. БЗУ вибрационного типа реализуют процесс ориентирования деталей посредством путевых ориентаторов, в основу функционирования которых положены принципы наличия у деталей явных признаков асимметрии формы, которые позволяют правильно захваченным деталям устойчиво располагаться на дорожке, а неправильно захваченным – ориентироваться пассивным или активным способом [2]. Использование вибрационных БЗУ для ориентирования деталей с неявной асимметрией малонадежно и неэффективно, так как появление на дорожке непра-

вильно ориентированных или заклиненных деталей вызовет необходимость применения дополнительных устройств ориентирования или блокировки. Поэтому БЗУ вибрационного типа чаще применяют для плоских деталей, у которых высота значительно меньше диаметра.

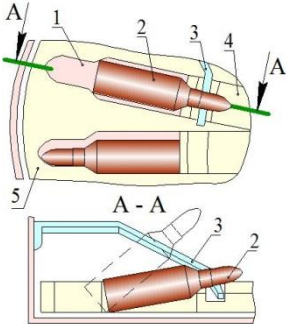
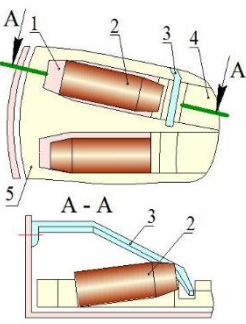
Для деталей с неявной асимметрией целесообразно использование механических БЗУ, которые можно использовать для широкой номенклатуры асимметричных деталей [3]. Однако ориентирование деталей с неявной асимметрией в традиционных конструкциях механических БЗУ, изначально используемых для явно асимметричных деталей, перестало быть надежным, так как из БЗУ в приемный лоток стали поступать неориентированные детали. Анализ данной проблемы позволил выявить основную причину снижения надежности и производительности БЗУ, заключающуюся в совмещении функций захвата и ориентирования, при котором захватывающий орган (карман) или переориентаторы, расположенные в БЗУ или приемном лотке, полностью повторяют конфигурацию детали по внешнему контуру с некоторым зазором. Рекомендованные значения этого зазора находятся в недопустимых для деталей с неявной асимметрией диапазонах, и поэтому в приемник выдаются неориентированные детали. Установление же величин зазора ниже рекомендованных приведет к значительному снижению вероятности захвата деталей и падению производительности БЗУ. Помимо этого, наличие в БЗУ повторяющихся с некоторым шагом захватывающих органов, копирующих конфигурацию загружаемых деталей, значительно повышает сложность изготовления конструкции БЗУ и, как следствие, ее стоимость, а также частоту заклиниваний при захвате деталей в неправильном положении [4].

В табл. 1 рассмотрены проблемы ориентирования деталей с неявной асимметрией в некоторых традиционных БЗУ следующих типов: I – с радиальными профильными карманами и переориентатором; тип II – с зубьями; III – с тангенциальными профильными карманами; IV – вертикальное с профильными карманами.

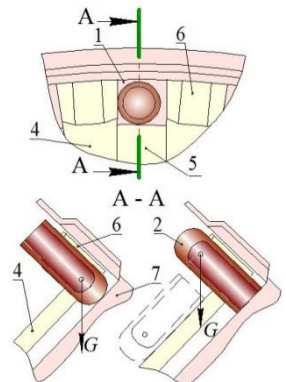
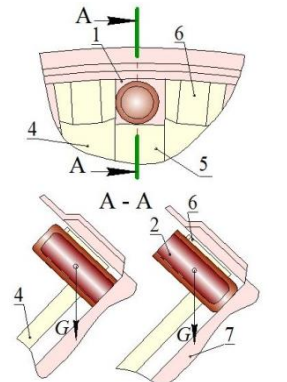
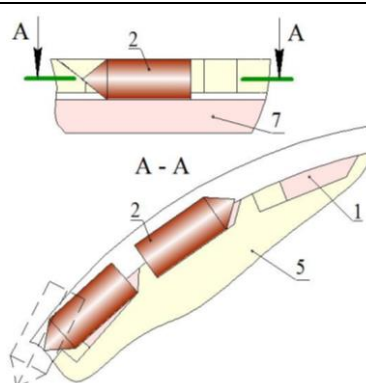
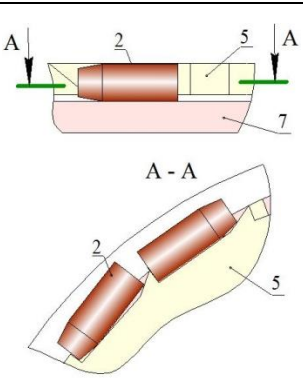
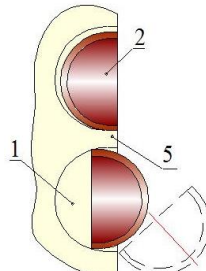
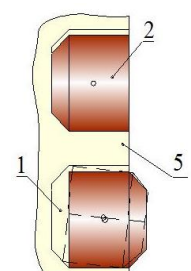
В конструкциях БЗУ типов I, III, IV принцип ориентирования деталей построен на их явной асимметрии внешней формы, а в БЗУ типа II – на явном смещении центра масс. На схемах обозначено: 1 – карман; 2 – деталь; 3 – переориентатор; 4 – радиальный паз; 5 – вращающийся диск; 6 – зубья; 7 – основание.

Таблица 1

Проблемы ориентирования деталей с неявной асимметрией в традиционных бункерных загрузочных устройствах

Тип	Схема ориентирования деталей		Описание проблемы
	С явной асимметрией	С неявной асимметрией	
I			В отличие от детали с явной асимметрией неправильно западая в карман деталь без явной асимметрии практически полностью проникает в карман и поэтому выступает из кармана незначительно, не давая переориентатору изменить ее положение в требуемое

Окончание табл. 1

Тип	Схема ориентирования деталей		Описание проблемы
	С явной асимметрией	С неявной асимметрией	
II			В отличие от детали с явным смещением центра масс неправильно западая в карман деталь, у которой центр масс находится практически посередине, под действием силы тяжести G не выпадает из кармана, а удерживается в нем
III			В отличие от детали с явной асимметрией формы неправильно западая в карман деталь, при любом из двух возможных вариантов западания, почти полностью погружается в карман и не может из него выпасть
IV			В отличие от детали с явной асимметрией неправильно западая в карман деталь с неявной асимметрией полностью погружается в профильный карман даже асимметричным торцом, вызывая заклинивание

Таким образом, при загрузке деталей с неявной асимметрией традиционные конструкции механических БЗУ перестают быть эффективными, что вынуждает предприятия во многих случаях отказаться или от производства новых видов изделий, или от их автоматической загрузки с переходом на ручную. Поэтому возникает необходимость принятия новых технических решений.

На основе результатов многолетних теоретических и экспериментальных исследований с целью повышения надежности и производительности при загрузке деталей с неявной асимметрией были усовершенствованы различные типы традиционных БЗУ, этапы трансформации которых подробно описаны в работе [5].

В табл. 2 показаны схемы захвата и ориентирования деталей с неявной асимметрией широкой номенклатуры в новых технических решениях различных типов БЗУ: I – с радиальными прямоугольными карманами, кольцевым ориентатором и радиальными пазы в виде гребенки; II – с зубьями и кольцевым ориентатором; III – с тангенциальными карманами и гребенкой; IV – с вертикальным диском и профильными роликами. На схемах обозначено: 1 – стенка бункера; 2 – деталь; 3 – кольцевой ориентатор; 4 – основание; 5 – вращающийся диск; 6 – гребенка; 7 – радиальный паз; 8 – зубья; 9 – криволинейный копир; 10 – фаски; 11 – ролики.

Таблица 2

Новые технические решения традиционных бункерных загрузочных устройств

Тип	Схема захвата	Схема ориентирования	Область применения
I			$2\beta \leq 30^\circ, 3 \leq l/d_1 \leq 5,$ $0,6 \leq d_2/d_1 \leq 0,9$
II			$2\beta \leq 30^\circ, 2 \leq l/d_1 \leq 3,$ $r > 0,5, 0,6 \leq d_2/d_1 \leq 0,9$
III			$1,5 \leq l/d_1 \leq 3,$ $0,25 \leq h/l \leq 0,3$
IV			$0,6 \leq l/d_1 \leq 1,$ $0,5 \leq h/l_1 \leq 0,6,$ $0,6 \leq d_2/d_1 \leq 0,9$

БЗУ (тип I) имеет прямоугольные, открытые в сторону кольцевого ориентатора, захватывающие органы. Кольцевой ориентатор в сечении повторяет профиль асимметричного торца детали, выполняя тем самым функцию ориентирования. Диаметр вращающегося диска меньше внутреннего диаметра кольцевого ориентатора. радиальные пазы вращающегося диска имеют форму гребенки, высота которой уменьшается до нулевого значения в центре диска. Гребенка создает препятствие для западания в карман детали с торцом наибольшего диаметра [6].

БЗУ (тип II) имеет расположенный в основании кольцевой ориентатор с переменной глубиной. Профиль кольцевого ориентатора соответствует профилю асимметричного торца детали, что позволяет деталям полностью проникать в него только в правильном положении. Захват деталей обеспечивают карманы, равномерно расположенные по периферии вращающегося диска между зубьями. Наличие в верхней части криволинейного копира позволяет удалять из карманов неправильно запавшие детали в случае их заклинивания [7].

БЗУ (тип III) содержит тангенциально расположенные карманы с направляющими фасками для захвата деталей. Расположенная в верхней части бункера гребенка способствует ориентированию неправильно запавших деталей, которые, скользя по направляющим фаскам, полностью выпадают из карманов диска [8].

БЗУ (тип IV) в отличие от предыдущих конструкций БЗУ имеет вращающийся вокруг горизонтальной оси диск, по периферии которого расположены ролики с возможностью вращения. Профиль роликов повторяет профиль детали [9].

На рис. 1 представлены расчетные схемы для разработки конструктивных ограничений на параметры органов захвата и ориентирования, усовершенствованных БЗУ.

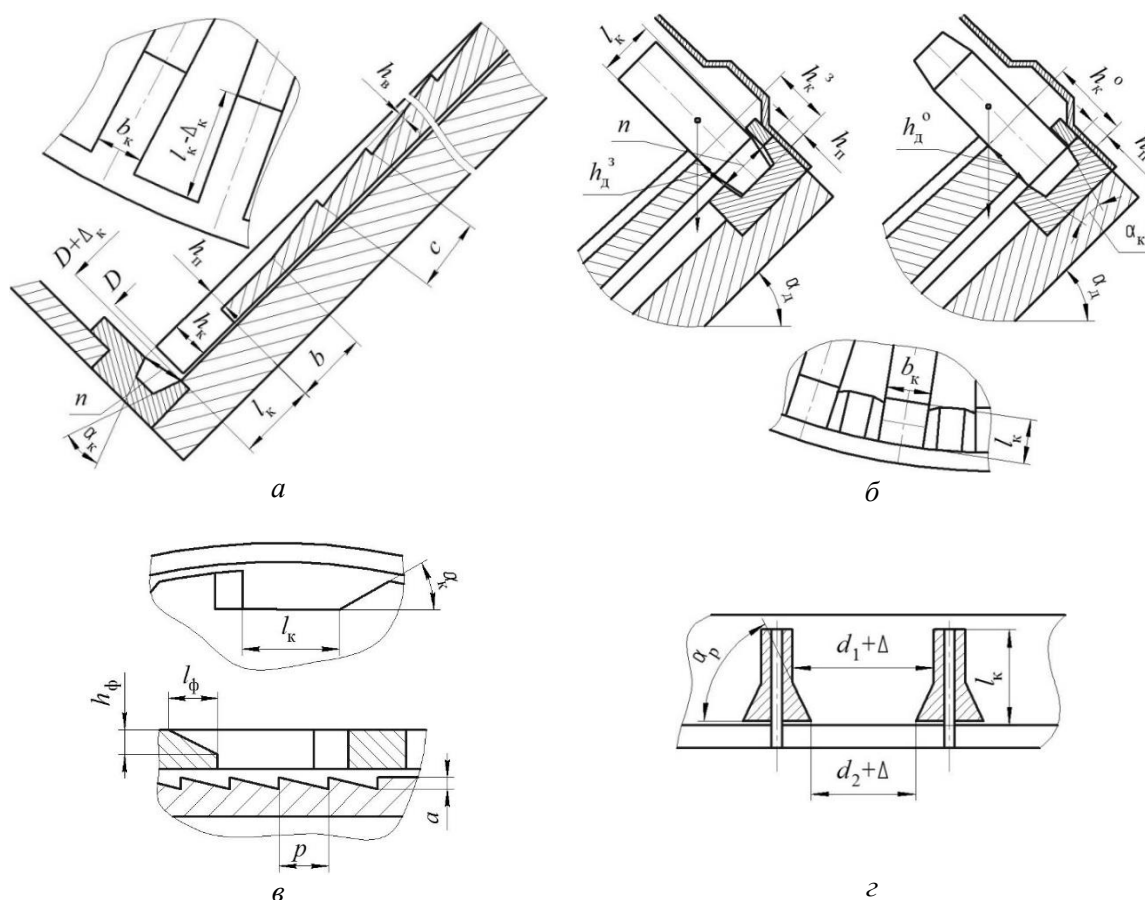


Рис. 1. Расчетные схемы для разработки конструктивных ограничений на параметры захватывающих и ориентирующих органов новых технических решений типов I (а), II (б), III (в) и IV (г)

С использованием расчетной схемы (рис. 1, а) ниже получены области допустимых значений основных параметров захватывающих и ориентирующих органов БЗУ с радиальными прямоугольными карманами, кольцевым ориентатором и радиальными пазы в виде гребенки (тип I). Ширина кармана ограничена условием, при котором будет обеспечен захват только единичной детали

$$d_1 < b_k \leq d_1 + \Delta,$$

а значение величины зазора Δ может быть значительно больше области его традиционно рекомендуемых значений, находящихся в диапазоне $(0,1-0,2)d_1$, так как захватывающий орган не осуществляет ориентирование детали. Выбор оптимальной величины зазора решается в процессе математического моделирования производительности БЗУ при параметрическом синтезе с использованием описанной в работе [10] методологии.

Длина кармана ограничена условиями полного проникновения в карман детали, движущейся в него асимметричным торцом (наименьшим диаметром), и невозможностью полного проникновения детали, движущейся в карман цилиндрическим торцом

$$l_1 < l_k \leq l - d_1 \cos \beta.$$

Высота кармана принимается равной большему диаметру детали $h_k = d_1$, что позволит детали полностью погрузиться в карман и в случае соударений с другими деталями при их ворошении не выпадать из кармана.

Конструктивные размеры кольцевого ориентатора должны способствовать проникновению в его паз только деталей, движущихся асимметричным торцом. В связи с этим угол при вершине кольцевого ориентатора и наибольший размер его паза в сечении должны соответственно находиться в диапазонах:

$$\arccos \left(\frac{l_k - l_1}{\sqrt{(l_k - l_1)^2 + 0,25(d_k - d_1)^2}} \right) \leq \alpha_k \leq 2\beta,$$

$$d_1 \sin \beta \leq n \leq d_1.$$

Радиальные пазы, выполненные в виде гребенки, должны способствовать беспрепятственному выпадению из паза деталей, завершающих пассивное ориентирование. При этом детали не должны западать во впадины гребенки, снижая скорость своего движения и увеличивая тем самым общее время пассивного ориентирования, которое может достигнуть критических значений и нарушить тем самым работоспособность БЗУ.

Исходя из этих рассуждений были определены следующие конструктивные параметры гребенки. Начальный участок гребенки имеет размер $c = l_1$, высота ее выступа $h_b = 0,5(d_1 - d_2)$, а шаг находится в диапазоне

$$l_1 - x_c + 0,5d_1 \operatorname{tg}(\alpha_d + \beta) \leq c \leq l_1,$$

где α_d – угол наклона диска (см. рис. 1, а).

В БЗУ с зубьями и кольцевым ориентатором (тип II) ограничения на параметры захватывающего и ориентирующего органов (рис. 1, б) обусловлены тем, что деталь, запавшая в карман и кольцевой ориентатор своим асимметричным торцом, должна оставаться в кармане, а деталь, оказавшаяся в кармане своим цилиндрическим торцом, должна под действием силы тяжести выпадать из него.

Поэтому высота кармана должна находиться в диапазоне

$$l - x_c - 0,5d_1 \operatorname{ctg} \alpha_d \leq h_k \leq x_c - 0,5d_1 \operatorname{ctg} \alpha_d + h_n,$$

записав высоту кармана через высоту диска и высоту кольцевого паза как $h_k = h_d + h_n$ и выполнив преобразования, получим

$$l - x_c - 0,5d_1 \operatorname{ctg} \alpha_d - h_n \leq h_d \leq x_c - 0,5d_1 \operatorname{ctg} \alpha_d.$$

Глубина паза h_n кольцевого ориентатора может находиться в диапазоне

$$0,25(l - l_1) \leq h_n \leq l - l_1.$$

На рис. 2 представлена визуализация рабочих зон высоты кармана h_k БЗУ с зубьями и кольцевым ориентатором при различных отношениях l/d_1 и значениях глубины паза из рекомендуемого диапазона.

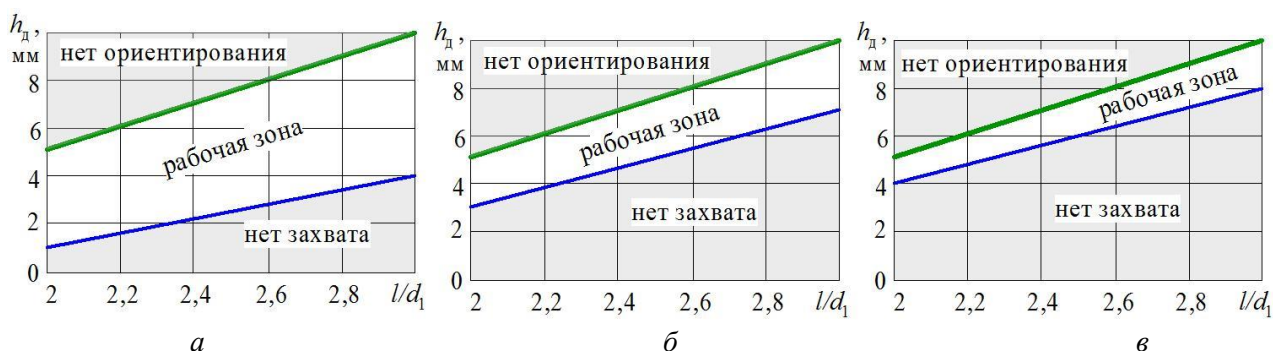


Рис. 2. Графики визуализации рабочей зоны бункерного загрузочного устройства типа II при различных значениях глубины паза кольцевого ориентатора:

$$a - h_n = l - l_1; \quad б - h_n = 0,5(l - l_1); \quad в - h_n = 0,25(l - l_1)$$

По аналогии с предыдущим техническим решением в БЗУ типа II ширина кармана ограничена лишь условием, при котором будет обеспечен захват единичной детали. Карман выполнен равнобедренным ($l_k = b_k$), каждая из сторон которого находится в диапазоне значений

$$d_1 < b_k \leq d_1 + \Delta,$$

а значение величины зазора может быть значительно больше области его традиционно рекомендуемых значений, так как захватывающий орган не осуществляет ориентирование детали (см. рис. 1, б).

В БЗУ с тангенциальными карманами и гребенкой (тип III), расчетная схема которого показана на рис. 1, в, захватывающий орган имеет длину, находящуюся в диапазоне

$$l_1 < l_k \leq l_1 + \Delta.$$

Для направления движения деталей в процессе захвата и ориентирования в кармане предусмотрены фаски, размеры которых должны соответствовать выражению $l_\phi : h_\phi = 1 : 2$. Большая грань фаски расположена со стороны западания детали в карман и имеет длину $l_\phi = 0,5l$.

Гребенка БЗУ обеспечивает выброс неправильно захваченных деталей, поэтому для ее надежного функционирования она должна иметь следующие параметры: высота $a = 0,5d_1$, шаг $p = 0,5l$ (см. рис. 1, в).

В БЗУ с вертикальным диском и профильными роликами (тип IV), карман, образованный роликами, имеет следующие рекомендуемые параметры в соответствии с расчетной схемой (рис. 1, з). Диаметры каждого торца ролика превышают диаметры торцов детали на величину Δ . Угол скоса ролика определяется как $\alpha_p = 90^\circ - \beta$, а высота кармана равна длине детали: $l_k = l$.

Таким образом, разработанные конструктивные ограничения на захватывающие и ориентирующие органы усовершенствованных БЗУ позволят обеспечить их надежное функционирование с требуемой производительностью при загрузке сборочного оборудования широкой номенклатурой деталей с неявной асимметрией. Предложенные технические решения в совокупности с разработанными конструктивными параметрами могут применяться и для деталей с явно выраженной асимметрией.

Список литературы

- 1 **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 (89). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_8.
- 2 **Давыдова, Е. В.** Автоматическая загрузка стержневых предметов обработки с неявно выраженной асимметрией по торцам /

References

- 1 **Vasin, S. A.** The main design directions of mechanical disk hopper feeding devices for asymmetric parts of the shape of rotation bodies / S. A. Vasin, E. V. Pantyukhina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1(89). – P. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_8.
- 2 **Davydova, E. V.** Automatic feeding of rod processing objects with implicitly expressed asymmetry at the ends / E. V. Davydova,

Е. В. Давыдова, В. В. Прейс / под научной редакцией В. В. Прейса. – Тула : Издательство ТулГУ, 2009. – 112 с. – ISBN 978-5-7679-1538-5.

3 **Прейс, В. В.** Автоматические загрузочно-ориентирующие устройства. Ч. 1 : Механические бункерные загрузочные устройства / В. В. Прейс, Н. А. Усенко, Е. В. Давыдова. – Тула : Издательство ТулГУ, 2006. – 125 с. – ISBN 5-7679-0869-9.

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. Т. 6. – Рязань, 2021. – С. 95–101. – ISBN 978-5-7722-0327-9.

5 **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.

6 **Патент 2720017 Российская Федерация. МПК В23Q 7/02.** Бункерное загрузочное устройство для цилиндрических заготовок с конической формой одной из концевых частей / В. В. Прейс, Е. В. Пантюхина. – № 2019119579 ; заявл. 21.06.2019 ; опубл. 23.04.2020, Бюл. № 12.

7 **Патент 159403 Российская Федерация. МПК В23Q 7/02.** Бункерное загрузочное устройство / Е. В. Давыдова, В. В. Прейс, А. В. Хачатурян. – № 2015127299/02 ; заявл. 07.07.2015 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4.

8 **Патент 158620 Российская Федерация. МПК В23Q 7/02.** Бункерное загрузочное устройство для стержневых заготовок с цилиндрической формой одного из торцов и конической формой другого / В. В. Прейс, Е. В. Давыдова, Д. А. Провоторов, К. Н. Провоторова. – № 2014152435/02 ; заявл. 23.12.2014 ; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.

V. V. Preys / under scientific edition of V. V. Preys. – Tula : Publishing House of TulSU, 2009. – 112 p. – ISBN 978-5-7679-1538-5.

3 **Preys, V. V.** Automatic feeding and orienting devices. Part 1: Mechanical hopper feeding devices / V. V. Preys, N. A. Usenko, E. V. Davydova. – Tula : Publishing House of TulSU, 2006. – 125 p. – ISBN 5-7679-0869-9.

4 **Pantukhina, E. V.** Problems of automatic feeding of parts of the shape of rotation bodies with implicit asymmetry with traditional feeding devices / E. V. Pantukhina // Modern technologies in science and education – MTSE-2021: Proceedings of the IV International Scientific and Technical Forum. In 10 vols. Vol. 6. – Ryazan, 2021. – P. 95–101. – ISBN 978-5-7722-0327-9.

5 **Pantukhina, E. V.** Mechanical bunker loading devices for small arms cartridge elements with implicit asymmetry / E. V. Pantukhina, V. V. Preys // Innovative technologies and technical means of special purpose : Proceedings of the Twelfth All-Russian Scientific and Practical Conference. In 3 vols. Vol. 2. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 79–85. – ISBN 978-5-94652-656-2.

6 **Patent 2720017 Russian Federation. IPC B23Q 7/02.** Bunker loading device for cylindrical billets with a conical shape of one of the end parts / V. V. Preys, E. V. Pantukhina. – No. 2019119579 ; appl. 21.06.2019 ; publ. 23.04.2020, Bull. № 12.

7 **Patent 159403 Russian Federation. IPC B23Q 7/02.** Bunker loading device / E. V. Davydova, V. V. Preys, A. V. Khachaturian. – No. 2015127299/02 ; appl. 07.07.2015 ; publ. 10.02.2016, Bull. No. 4.

8 **Patent 158620 Russian Federation. IPC B23Q 7/02.** Hopper feeding device for rod billets with cylindrical shape of one of ends and conical shape of the other / V. V. Preys, E. V. Davydova, D. A. Provotorov, K. N. Provotorova. – No. 2014152435/02 ; appl. 23.12.2014 ; publ. 20.01.2016, Bull. No. 2.

9 Патент 170000 РФ Российская Федерация. МПК В23Q 7/02. Бункерное загрузочное устройство / Е. В. Давыдова, В. В. Прейс, А. В. Чурочкин. – № 2016121520 ; заявл. 31.05.2016 ; опубл. 11.04.2017, Бюл. № 11.

10 **Пантюхина, Е. В.** Методология комплексного подхода для оценки производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств / Е. В. Пантюхина // Проблемы машиноведения : материалы IV Международной научно-технической конференции / научный редактор П. Д. Балакин. – Омск : ОмГТУ, 2020. – С. 380–388. – ISBN 978-5-8149-3011-8.

9 Patent 170000 RF Russian Federation. IPC B23Q 7/02. Bunker loading device / E. V. Davydova, V. V. Preys, A. V. Churochkin. – No. 2016121520 ; appl. 31.05.2016 ; publ. 11.04.2017, Bull. No. 11.

10 **Pantyukhina, E. V.** Methodology of a comprehensive approach for assessing the load rate of mechanical disk hopper loading devices / E. V. Pantyukhina // Problems of Machine Science : materials of the IV International Scientific and Technical Conference / scientific editor P. D. Balakin. – Omsk : OmSTU, 2020. – P. 380–388. – ISBN 978-5-8149-3011-8.

S. A. Vasin, E. V. Pantyukhina

DEVELOPMENT OF DESIGN LIMITS ON PARAMETERS OF THE IMPROVED DISK HOPPER LOADING DEVICES FOR PARTS WITH IMPLICIT ASYMMETRY

Abstract. The paper considers the main problems of the parts` orientation with implicit asymmetry in traditional mechanical disk hopper loading device where its reliability and load rate are sharply reduced. The proposed design solutions will provide the required values of the specified indicators when gripping and orienting parts of the shape of rotation bodies with implicit asymmetry. It is shown that there are zones of permissible values of the main design parameters of the gripping and orienting bodies of improved mechanical disk hopper loading devices. The developed design constraints make it possible to determine the optimal parameters of the main working bodies of bunker loading devices for a wide range of parts with implicit asymmetry.

Keywords: automatic loading, bunker loading device, orientation of parts with asymmetry, parts with implicit asymmetry, reliability of parts orientation.

For citation: Vasin, S. A. Development of design limits on parameters of the improved disk hopper loading devices for parts with implicit asymmetry / S. A. Vasin, E. V. Pantyukhina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 146–154. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_146.

Сведения об авторах

Васин Сергей Александрович

Тульский государственный университет (ТулГУ),
кафедра «Городское строительство, архитектура
и дизайн»,
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

С. С. Гусев, В. В. Макаров

ИССЛЕДОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ТОЧЕНИЯ ТОРЦЕВЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ КАНАВОК

Аннотация. В наши дни одним из важнейших условий в развитии машиностроения является автоматизация производственных процессов. Основными составляющими производственного процесса считаются как автоматизированные технологические процессы механической обработки, так и сборки, при помощи которых достигается необходимая производительность и качество получаемых изделий. Использование автоматизированных систем, состоящих из универсальных станков, станков с ЧПУ, обрабатывающих центров, характерно как для серийного, так и для мелкосерийного производства. Для разработки операций на станках с ЧПУ и технологического процесса необходимы определённые подходы из-за их особенности: при использовании автоматического замкнутого цикла увеличивается значение машинного времени; влияние протекающего процесса при работе; величина числа операций; использование различных инструментов; наличие автоматической загрузки, обработки, разгрузки, контроль, транспортировка; исправление управляющих программ; быстрая переналадка; выполнение различных технологических операций на одном станке; применение базовых циклов; встраивание АСУ ТП в структуру организации; создание общего и частичного управления всем процессом.

Ключевые слова: машиностроение, производственный процесс, автоматизированные системы, универсальные станки, станки с ЧПУ.

Для цитирования: Гусев, С. С. Исследование и создание универсальных циклов точения торцевых и продольных канавок / С. С. Гусев, В. В. Макаров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 155–166. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_155.

Введение

Одним из основных признаков производства в наши дни считается частая сменяемость изделий. Однако возрастают требования к производительности при мелкосерийном и среднесерийном производстве.

Мероприятия, направленные на автоматизацию процессов производства, будут более эффективны на тех предприятиях, которые характеризуются наибольшей серийностью выпускаемых продуктов, высокой надёжностью протекающих процессов, уменьшением времени и частоты переналадки, уменьшением затрат на автоматизацию оборудования [1].

Цель работы – расширение функциональных возможностей систем ЧПУ за счёт создания универсальных параметрических циклов обработки типовых поверхностей деталей типа «канавка» на языке высокого уровня.

Задачи работы:

- 1) выполнение конструктивно-технологического анализа деталей, изготавливаемых на станках с ЧПУ, и анализ токарных циклов для обработки канавок;
- 2) разработка методики проектирования параметрических циклов для токарной обработки поперечных и продольных канавок;
- 3) программная разработка параметрических циклов по готовой методике;
- 4) проверка работы разработанных параметрических циклов обработки канавок.

Новизна: разработка методики создания параметрических циклов токарной обработки торцевых и продольных канавок.

С развитием технологий производства стали появляться сложные по конструкции механизмы. Для их изготовления всё чаще требуется изготавливать детали при помощи специально спроектированных для них параметрических циклов. В связи с этим возникает потребность быстро разрабатывать данные циклы [2].

В данном проекте разрабатывается методика проектирования параметрических циклов для токарной обработки продольных и поперечных канавок. В методике будут подробно описаны шаги, позволяющие сократить время разработки [3].

1 Разработка методики проектирования параметрических циклов для токарной обработки поперечных и продольных пазов

Большая часть программного обеспечения (ПО) разрабатывается для долговременного применения [4]. В связи с этим каждое ПО должно соответствовать определённым требованиям, например, таким как: надёжность, простота использования, возможность переноса ПО на другие системы и т. д. Важнейшие из свойств будущего ПО необходимо рассматривать с самого начала разработки [5].

Для повышения качества выпускаемой продукции необходимо внедрять эффективные методики [6]. В настоящее время необходимо проектирование именно программного продукта [7].

1.1 Общий вид методики проектирования параметрических циклов обработки продольных и торцевых канавок

Данная методика позволяет в случае необходимости в короткие сроки разработать параметрический цикл для токарной обработки продольных и поперечных канавок. Срок разработки сокращается за счёт того, что в каждом шаге методики содержится подробное описание составных элементов, необходимых для разработки и реализации цикла.

Шаги методики представлены на рис. 1.

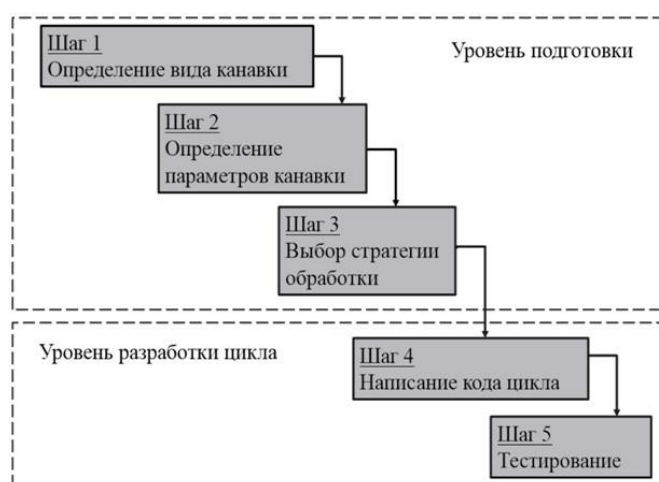


Рис. 1. Схема методики разработки параметрических циклов для токарной обработки канавок

1.2 Описание шагов методики проектирования параметрических циклов токарной обработки канавок

Первым шагом необходимо определить тип канавки, поскольку для разных типов канавок различаются как сами параметры, так и их интерпретация. В частности, они могут быть: продольные, торцевые. Кроме того, они могут быть прямоугольного профиля или трапецевидного. На рис. 2 представлены эскизы данных канавок.

Канавка	Эскиз
Продольная с прямоугольным профилем	
Продольная с трапецевидного профилем	
Поперечная	

Рис. 2. Продольные и поперечные канавки

Данный шаг необходим, так как набор параметров поперечной и торцевой канавок различный.

Вторым шагом необходимо определить набор параметров, которые позволят описать траекторию перемещения режущего инструмента.

Так, продольная канавка, представленная на рис. 3, будет описываться параметрами, представленными в табл. 1.

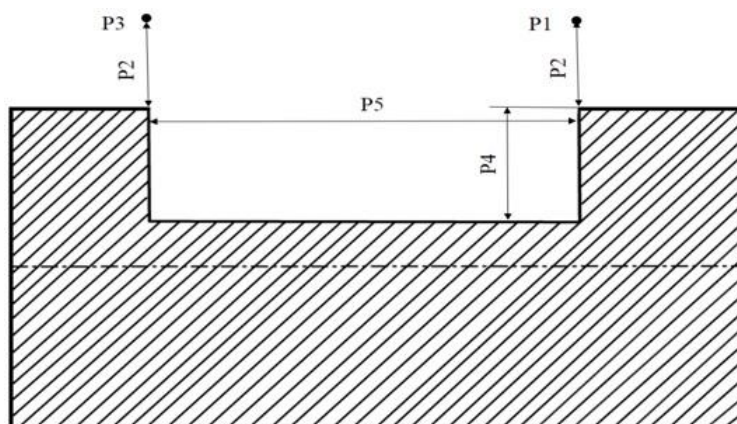


Рис. 3. Параметры продольной канавки

Таблица 1

Параметры продольной канавки

P1	Начальная точка
P2	Безопасное расстояние
P3	Конечная точка
P4	Глубина
P5	Ширина

У трапецевидной канавки, представленной на рис. 4, добавляются параметры, представленные в табл. 2.

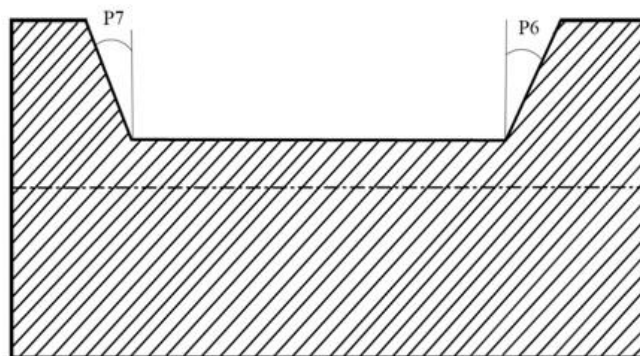


Рис. 4. Параметры продольной канавки

Таблица 2

Параметры продольной канавки

P6	Угол наклона правой стенки канавки
P7	Угол наклона левой стенки канавки

Кроме того, контур может содержать скругления, как представлено на рис. 5. В этом случае добавляются параметры, представленные в табл. 3.

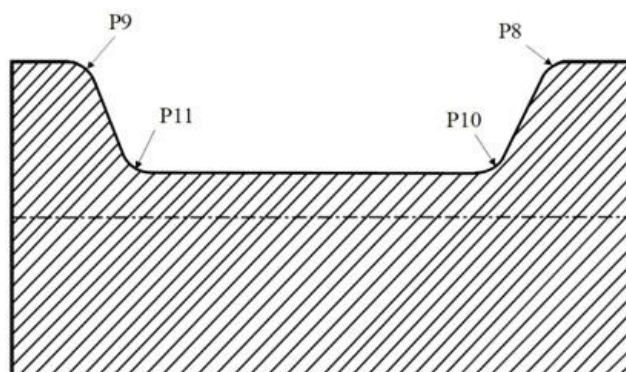


Рис. 5. Параметры продольной канавки

Таблица 3

Параметры продольной канавки

P8	Радиус наружного скругления на правой стороне канавки
P9	Радиус наружного скругления на левой стороне канавки
P10	Радиус внутреннего скругления на правой стороне канавки
P11	Радиус внутреннего скругления на левой стороне канавки

Для поперечной канавки набор параметров представлен на рис. 6 и табл. 4.

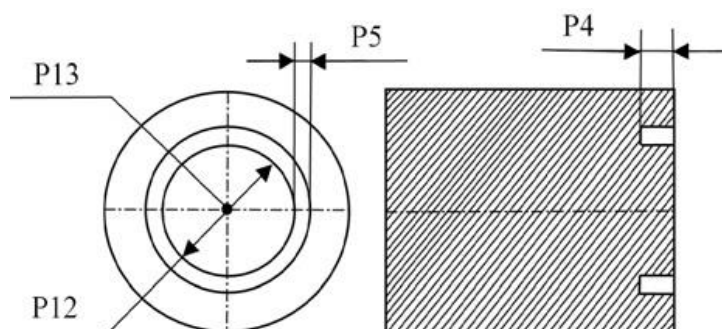


Рис. 6. Параметры поперечной канавки

Таблица 4

Параметры поперечной канавки

P4	Глубина
P5	Ширина
P12	Диаметр канавки
P13	Центр канавки

Третьим шагом необходимо определить стратегию обработки канавки в зависимости от выявленных на предыдущем шаге параметров.

Четвертым шагом проектирования параметрического цикла обработки канавок идёт написание кода цикла на языке высокого уровня.

Использование языка высокого уровня позволяет описывать сложную траекторию перемещения режущего инструмента. Применение языка высокого уровня даёт возможность переносить код цикла на различные системы ЧПУ [8].

Пятым шагом необходимо провести тестирование параметрического цикла.

Предполагается проверка работы цикла при правильно введённых значениях, например, все значения должны быть больше или равны 0 и т. д., при граничных значениях и значениях [9], введённых неверно.

2 Разработка параметрического цикла по разработанной методике

Модернизация российских машиностроительных производств требуется для ускорения развития машиностроения [9].

Под технологией создания программного обеспечения понимается совокупность методов и процессов проектирования программного обеспечения [10].

С развитием производства возникает необходимость частой смены выпускаемой продукции. В связи с чем на предприятиях применяется цеховое программирование, которое характеризуется использованием стандартных циклов механической обработки. Однако их возможностей порой не хватает для выполнения поставленных задач. В результате возникает необходимость разрабатывать дополнительные циклы.

В качестве примера можно привести параметрические циклы для токарной обработки продольной и поперечной канавок, разработанных при помощи методики.

2.1 Анализ основных параметров параметрических циклов обработки канавок различных производителей

На данный момент уже разработано огромное количество различных параметрических циклов. Поэтому, прежде чем начинать разработку нового цикла, необходимо провести анализ уже существующих циклов, выделить основные параметры и сравнить их.

В данном случае для анализа были выбраны параметрические циклы обработки канавок таких производителей, как HEIDENHAIN и SIEMENS.

Первой для анализа была выбрана система ЧПУ HEIDENHAIN TCN640.

В данной системе ЧПУ предусмотрен цикл «Поворот продольное врезание» (Цикл 813). Данный цикл предназначен для токарной обработки канавок.

Работа цикла начинается с того, что система ЧПУ принимает за начальную точку то положение инструмента, которое было при вызове цикла.

Затем система ЧПУ выполняет следующие шаги:

- 1) врезание на ускоренной подаче по оси;
- 2) снятие материала;
- 3) отвод инструмента на заданной подаче;
- 4) переход в начало резания на ускоренной подаче;
- 5) повтор шагов 1–4 до получения контура;
- 6) перевод инструмента в начальную точку на ускоренной подаче. Второй системой ЧПУ, выбранной для анализа, стала SIEMENS.

В данной системе ЧПУ предусмотрен цикл «Прорезка канавки» – CYCLE94.

В данном цикле за начальное положение может приниматься любая точка, где начинается обработка канавки, при этом исключено столкновение.

Выполнение цикла происходит по следующим шагам:

- 1) переход в начало на ускоренной подаче;
- 2) снятие материала по заданной траектории на заданной подаче;
- 3) переход в начало на ускоренной подаче.

Результат анализа параметров данных циклов представлен в табл. 5.

В данной таблице отражены и параметры разрабатываемых параметрических циклов для системы ЧПУ «АксиОМА Контрол».

Таблица 5

Результат анализа параметров различных параметрических циклов

Параметры		СЧПУ HEIDENHAIN TCN640	СЧПУ SIEMENS SINUMERIK 808D	СЧПУ «АксиОМА Контрол»
Начальная точка		+	+	+
Безопасное расстояние		+	+	+
Конечная точка		+	+	+
Глубина		+	+	+
Ширина		-	+	+
Угол наклона	Правой стенки	+	-	+
	Левой стенки	-	-	+

Как видно из таблицы, разрабатываемые циклы имеют параметры, которые отсутствуют у аналогов.

На рис. 7 представлена схема, на которой отражены некоторые перечисленные параметры.

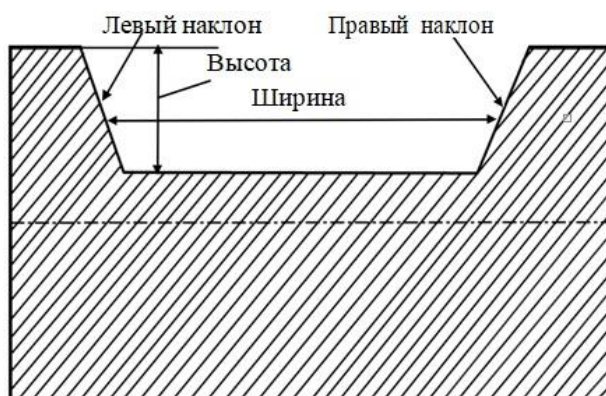


Рис. 7. Основные параметры

2.2 Проектирование параметрических циклов токарной обработки продольной и поперечной канавки на уровне подготовки

Современные производства имеют высокую степень автоматизации, которая достигается, в том числе за счёт использования систем ЧПУ.

В МГТУ «СТАНКИН» на кафедре «Компьютерных систем управления» идёт разработка отечественной системы ЧПУ «Аксиома КОНТРОЛ». Для расширения возможностей данной системы ЧПУ разрабатываются станочные циклы механообработки типовых поверхностей.

К таким поверхностям относятся пазы, канавки, выточки, которые часто присутствуют на деталях. Они могут быть торцевые или продольные.

Разработка параметрических циклов токарной обработки продольной и поперечной канавки будет опираться на методику, приведенную выше.

Первым уровнем является уровень подготовки. В него входят первые три шага.

Первый шаг заключается в определении вида канавок.

Вторым шагом необходимо определить набор параметров, которыми обладает выбранный тип канавки.

Третьим шагом требуется разработать стратегию перемещения инструмента в случае обработки продольной и поперечной канавки.

Для проектирования примера параметрического цикла для токарной обработки продольной канавки вида выбрана стратегия обработки, представленная на рис. 8.

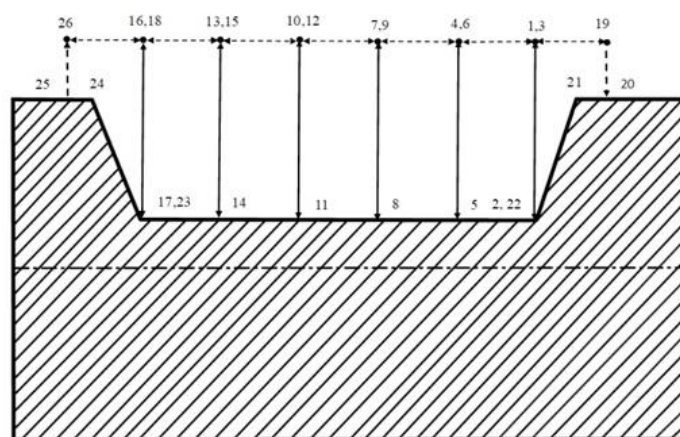


Рис. 8. Стратегии обработки продольной канавки

Ход работы параметрического цикла идёт следующим образом:

- 1) переход в начальную точку 1 – начало работы цикла на ускоренной подаче;
- 2) врезание на глубину канавки на рабочей подаче к точке 2 – на полную глубину обработки;
- 3) подъём в точку 3 – точку выхода на безопасное расстояние на рабочей подаче;
- 4) переход в точку 4 – точку врезания на рабочей подаче;

- 5) врезание на глубину канавки на рабочей подаче к точке 5 – на полную глубину обработки;
- 6) подъём в точку 6 – точку выхода на безопасное расстояние на рабочей подаче;
- 7) переход в точку 7 – точку врезания на рабочей подаче;
- 8) врезание на глубину канавки на рабочей подаче к точке 8 – на полную глубину обработки;
- 9) подъём в точку 9 – точку выхода на безопасное расстояние на рабочей подаче;
- 10) переход в точку 10 – точку врезания на рабочей подаче;
- 11) врезание на глубину канавки на рабочей подаче к точке 11 – на полную глубину обработки;
- 12) подъём в точку 12 – точку выхода на безопасное расстояние на рабочей подаче;
- 13) переход в точку 13 – точку врезания на рабочей подаче;
- 14) врезание на глубину канавки на рабочей подаче к точке 14 – на полную глубину обработки;
- 15) подъём в точку 15 – точку выхода на безопасное расстояние на рабочей подаче;
- 16) переход в точку 16 – точку врезания на рабочей подаче;
- 17) врезание на глубину канавки на рабочей подаче к точке 17 – на полную глубину обработки;
- 18) подъём в точку 18 – точку выхода на безопасное расстояние на рабочей подаче;
- 19) переход в точку 19 – точку врезания на рабочей подаче;
- 20) опускание в точку 20 на рабочей подаче;
- 21) переход в точку 21 на рабочей подаче;
- 22) врезание в точку 22 под заданным наклоном на глубину канавки на рабочей подаче;
- 23) передвижение режущего инструмента в точку 23 на заданной подаче;
- 24) подъём в точку 24 под заданным углом на рабочей подаче;
- 25) переход в точку 25 на рабочей подаче;
- 26) подъём в точку 26 на рабочей подаче.

Поскольку разрабатываемый параметрический цикл предусмотрен для токарной обработки, где вращается заготовка, то перемещение инструмента по окружности для получения канавки не требуется.

2.3 Проектирование параметрических циклов токарной обработки продольной и поперечной канавки на уровне разработки цикла

На следующем уровне разработки цикла находятся два заключительных шага – это шаг «Написание кода цикла» и шаг «Тестирование»

Чтобы приступить к реализации четвёртого шага необходимо разработать блок-схемы каждого цикла.

Блок-схема является удобным способом представления алгоритмов, которым является ГОСТ 19.701-90, принятый в 1992 году.

Блок-схема позволяет подробно описать любую задачу при помощи разбиения её на уровни, при этом количество уровней зависит от сложности поставленной задачи.

На рис. 9 представлена блок-схема разрабатываемого цикла обработки продольной канавки.

В блоке «Ввод параметров» вводятся выявленные на втором шаге параметры. Далее показана проверка введённых параметров, необходимая для устранения ошибок до запуска обработки, чтобы избежать брака. Если все параметры введены правильно, то начинается обработка, описанная по выбранной ранее стратегии в блоке «Обработка». Если есть ошибка при вводе параметров, то цикл завершается.

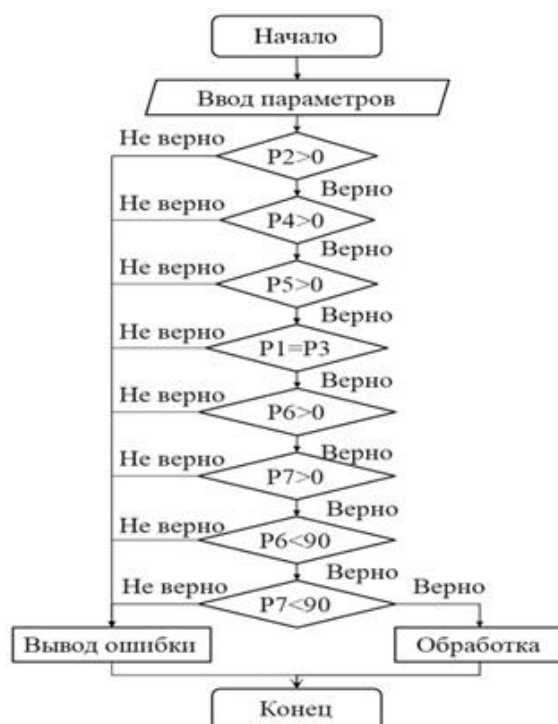


Рис. 9. Блок-схема цикла обработки продольной канавки

На рис. 10 представлена блок-схема разрабатываемого цикла обработки поперечной канавки.

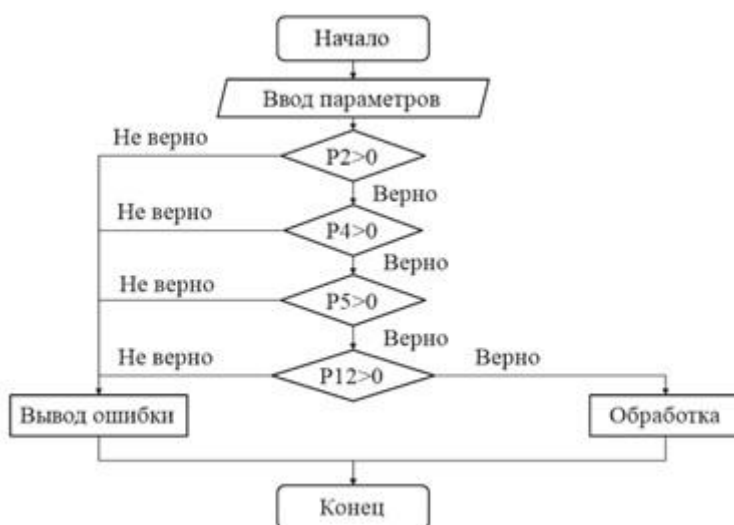


Рис. 10. Блок-схема цикла обработки поперечной канавки

3 Создание кода цикла

Параметрические циклы для токарной обработки продольной и поперечной канавок соответственно будут разрабатываться при помощи языка высокого уровня для системы ЧПУ «АксиОМА Контрол».

Система ЧПУ «АксиОМА Контрол» является многофункциональной системой. Одной из её особенностей является открытая модульная архитектура. Благодаря такой архитектуре есть возможность адаптировать систему для технологического оборудования различных типов.

Применение языка высокого уровня позволяет повысить гибкость системы ЧПУ. При его помощи станкостроители могут проектировать свои станочные циклы и встраивать их в систему.

Язык высокого уровня, применяемый в системе ЧПУ «АксиОМА Контрол», создан с использованием стандарта ANSI C, при этом учитывалась специфика при работе с задачами системы ЧПУ. Данный язык сочетает в себе простой синтаксис с эффективными средствами.

Одними из основных характеристик данного языка высокого уровня можно выделить:

- 1) набор условий, операторов и переходов цикла для эффективной работы программы;
- 2) большое количество операторов, которые позволяют сократить код при создании различных типов операций;
- 3) наличие различных типов данных: целочисленные, с плавающей точкой и т. д., которые позволяют обеспечить необходимую точность вычислений.

Благодаря применению языка высокого уровня программист имеет возможность оставлять многие решения на своё усмотрение.

4 Проверка работы разработанного параметрического цикла обработки канавок

Последним шагом в методике проектирования параметрических циклов является шаг «Тестирование». Правильное тестирование является залогом грамотной работы как целых программных систем, так и небольшого программного обеспечения.

Тесты для проверки работы программного обеспечения делятся на два типа:

- 1) позитивные – тесты, направленные на проверку необходимых действий программного обеспечения и его работоспособность;
- 2) негативные – тесты, направленные на проверку реакции программного обеспечения на некорректные входные значения.

Первым шагом в тестировании параметрических циклов будет проверка их работы при правильно введенных параметрах.

Вторым шагом будет проверка работы циклов при ошибочно введенных значениях параметров.

4.1 Тестирование параметрического цикла токарной обработки продольной канавки

Первым циклом для проверки будет параметрический цикл токарной обработки продольной канавки.

Тестирование будет заключаться в проверке вводимых параметров, представленных в табл. 6, на соответствие следующим условиям, представленным в табл. 7.

Таблица 6

Вводимые параметры

Параметр	Описание
P1	Начальная точка
P2	Безопасное расстояние
P3	Конечная точка
P4	Глубина
P5	Ширина
P6	Угол наклона правой стенки канавки
P7	Угол наклона левой стенки канавки

Таблица 7

Условия для параметров

Параметр	Условие
P1	Должен быть равен P3
P2	Должен быть больше 0
P3	Должен быть равен P1
P4	Должен быть больше 0
P5	Должен быть больше 0
P6	Должен быть больше 0 и меньше 90
P7	Должен быть больше 0 и меньше 90

Тестирование будет происходить по алгоритму, представленному на рис. 11.

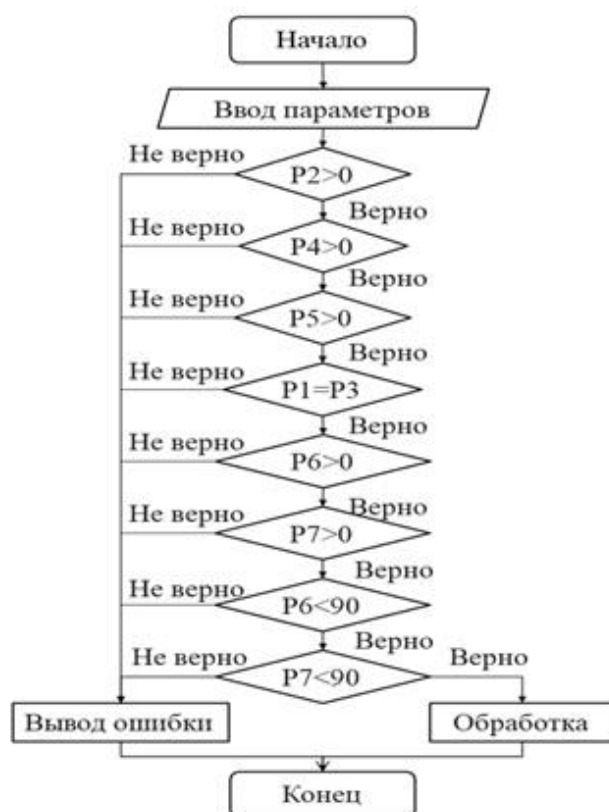


Рис. 11. Алгоритм тестирования

Выводы

В результате разработки методики проектирования параметрических циклов для токарной обработки поперечных и продольных пазов была разработана методика для проектирования параметрических циклов обработки продольных и торцевых канавок, позволяющая сократить время разработки цикла за счёт имеющегося описания основных элементов, необходимых для проектирования параметрического цикла. С развитием технологий производства стали появляться сложные по конструкции механизмы. Для их изготовления всё чаще требуется изготавливать детали при помощи специально спроектированных для них параметрических циклов. В связи с этим возникает потребность быстро разрабатывать данные циклы. В данной статье разрабатывалась методика проектирования параметрических циклов для токарной обработки продольных и поперечных канавок. В методике подробно описаны шаги, позволяющие сократить время разработки.

Список литературы

- 1 **Гордин, П. В.** Детали машин и основы конструирования : учебное пособие / П. В. Гордин, Е. М. Росляков, В. И. Эвелеков. – Санкт-Петербург : СЗТУ, 2006. – 186 с.
- 2 **Винокурова, Г. Ф.** Начертательная геометрия и графика : методические указания по определению классификационной характеристики изделия для студентов всех специальностей / Г. Ф. Винокурова, Е. В. Белоенко. – Томск : Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, 2010. – 36 с.
- 3 Методические указания по выполнению рабочих чертежей и эскизов деталей / Н. Ю. Смирнов, Г. Д. Демидова, А. А. Мельников [и др.]. – Иваново : ГОУ ВПО Ивановский государственный химико-технологический университет, 2006. – 72 с.

References

- 1 **Gordin, P. V.** Machine parts and fundamentals of design : a textbook / P. V. Gordin, E. M. Roslyakov, V. I. Evelekov. – Saint Petersburg : NWTU, 2006. – 186 p.
- 2 **Vinokurova, G. F.** Descriptive geometry and graphics : guidelines for determining the classification characteristics of the product for students of all specialties / G. F. Vinokurova, E. V. Beloenko. – Tomsk : National Research Tomsk Polytechnic University, 2010. – 36 p.
- 3 Methodological guidelines for the implementation of working drawings and sketches of parts / N. Y. Smirnov, G. D. Demidova, A. A. Melnikov [et al.]. – Ivanovo : Ivanovo State University of Chemical Technology, 2006. – 72 p.

4 **Мартыненко, А. А.** Автоматизация выбора инструментальных стратегий механической обработки деталей на станках с ЧПУ : специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. А. Мартыненко ; Волгоградский государственный технологический университет. – Волгоград, 2012. – 19 с.

5 **Мирошниченко, Е. А.** Технология программирования : учебное пособие / Е. А. Мирошниченко. – Томск : ТПУ, 1999. – 80 с.

6 **Морокина, Г. С.** Основы проектирования приборов и систем : учебно-методический комплекс / Г. С. Морокина, А. И. Потапов. – Санкт-Петербург : Санкт-петербургский горный университет, 2017. – 148 с. – ISBN 978-5-94170-470-5.

7 **Коцюба, И. Ю.** Основы проектирования информационных систем : учебное пособие / И. Ю. Коцюба, А. В. Чунаев, А. Н. Шиков. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2015. – 206 с. – ISBN 978-5-9912-0994-6.

8 **Пушков, Р. Л.** Разработка моделей и инструментальных средств подготовки и отладки параметрических программ для систем ЧПУ технологическими процессами : специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. Л. Пушков ; МГТУ «СТАНКИН». – Москва, 2018. – 22 с. – ISBN 978-5-7028-0607-5.

9 **Григорьев, С. Н.** Развитие отечественного станкостроения – фундамент машиностроительного производства / С. Н. Григорьев // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 5. – С. 4–7. – ISBN 978-5-7695-6240-2.

10 Технология разработки программного обеспечения : конспект лекций / И. И. Савенко. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 67 с. – ISBN 5-7511-1991-0.

4 **Martynenko, A. A.** Automation of the choice of instrumental strategies for machining parts on CNC machines : specialty 05.13.06 «Automation and control of technological processes and productions» : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Engineering Sciences / A. A. Martynenko ; Volgograd State Technological University. – Volgograd, 2012. – 19 p.

5 **Miroshnichenko, E. A.** Programming technology : a textbook / E. A. Miroshnichenko. – Tomsk : TPU, 1999. – 80 p.

6 **Morokina, G. S.** Fundamentals of designing devices and systems : an educational and methodological complex / G. S. Morokina, A. I. Potapov. – Saint Petersburg : Saint Petersburg Mining University, 2017. – 148 p. – ISBN 978-5-94170-470-5.

7 **Kotsyuba, I. Yu.** Fundamentals of information systems design : a textbook / I. Yu. Kotsyuba, A. V. Chunaev, A. N. Shikov. – Saint Petersburg : ITMO University, 2015. – 206 p. – ISBN 978-5-9912-0994-6.

8 **Pushkov, R. L.** Development of models and tools for the preparation and debugging of parametric programs for CNC systems by technological processes : specialty 05.13.06 «Automation and control of technological processes and productions (technical sciences)» : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Engineering Sciences / R. L. Pushkov ; MSTU «STANKIN». – Moscow, 2018. – 22 p. – ISBN 978-5-7028-0607-5.

9 **Grigoriev, S. N.** The development of domestic machine-tool construction - the foundation of machine-building production / S. N. Grigoriev // Automation in industry. – 2012. – No. 5. – С. 4–7. – ISBN 978-5-7695-6240-2.

10 Software development technology : lecture notes / I. I. Savenko. – Tomsk : Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2014. – 67 p. – ISBN 5-7511-1991-0.

S. S. Gusev, V. V. Makarov

RESEARCH AND CREATION OF UNIVERSAL TURNING CYCLES OF END AND LONGITUDINAL FLUTES

Abstract. Nowadays, one of the most important values in the development of mechanical engineering is the automation of production processes. The main components of the production process are considered to be both automated technological processes of mechanical processing and assembly, with the help of which the necessary productivity and quality of the resulting products are achieved. The use of automated systems consisting of universal machines, CNC machines, machining centers is typical for both serial and small-scale production. For the development of operations on CNC machines and the technological process, certain approaches are necessary because of their features: when using an automatic closed cycle, the value of machine time increases; the influence of the process during operation; the number of operations increases; the use of various tools; the presence of automatic loading, processing,

unloading, control, transportation; correction of control programs; fast changeover; execution of various technological operations on one machine; application of basic cycles; integration of automated process control systems into the structure of the organization; creating general and partial management of the entire process.

Keywords: mechanical engineering, production process, automated systems, universal machines, CNC machines.

For citation: Gusev, S. S. Research and creation of universal turning cycles of end and longitudinal flutes / S. S. Gusev, V. V. Makarov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 155–166. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_155.

Сведения об авторах

Гусев Сергей Сергеевич

ПАО «Ростелеком»,
инженер-энергетик,
e-mail: gs-serg@mail.ru

Макаров Вадим Владимирович

Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: makfone@mail.ru

Information about the authors

Gusev Sergey Sergeevich

PJSC «Rostelecom»,
Energy Engineer,
e-mail: gs-serg@mail.ru

Makarov Vadim Vladimirovich

V. A. Trapeznikov Institute of Control
Sciences of the Russian Academy of
Sciences,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: makfone@mail.ru

М. А. Кравченко

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ СИСТЕМ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ШУМОЗАЩИТЫ ОПЕРАТОРОВ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

Аннотация. Каждая компрессорная установка включает два агрегата – непосредственно компрессор и источник энергии (двигатель). Причем используется два типа двигателей: электродвигатели для компрессоров малой мощности и двигатели внутреннего сгорания для компрессоров большой мощности. Следует отметить, что практически на всех участках компрессорных станций уровни звукового давления превышают допустимые нормативные величины, в особенности у компрессоров большой мощности. В условиях эксплуатации компрессоров и двигателей снизить уровни шума в самом источнике не представляется возможным, поэтому была разработана методика виброакустического расчета для замкнутых помещений и фактически на этой основе обоснованы системы шумовиброзащиты операторов компрессорных станций по критерию выполнения санитарных норм на рабочих местах. Получающиеся в ходе расчета собственные моды колебаний распределяются по ширине соответствующих октав, серединой которых являются среднегеометрические частоты соответствующих октавных фильтров.

Ключевые слова: компрессорные станции, системы звукопоглощения, производственные помещения, кабины, дистанционное управление.

Для цитирования: Кравченко, М. А. Методика расчета выбора рациональных вариантов систем звукопоглощения для систем шумозащиты операторов компрессорных станций / М. А. Кравченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 167–171. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_167.

Введение

Методика акустического расчета дает возможность рассчитать уровни шума, воздействующие на операторов компрессорных установок. В основу инженерного расчета и акустического проектирования систем шумозащиты заложены требования выполнения санитарных норм шума. Наличие методики инженерного расчета дает широкие возможности для автоматизированного проектирования звукозащитных ограждений как непосредственно компрессоров, так и помещений для дистанционного управления с единых позиций. Реальным резервом снижения акустической активности на рабочих местах операторов являются [1–3]:

- установка звукопоглощающих облицовок на ограждениях двигателей;
- организация помещения дистанционного управления с обеспечением требуемой звукоизоляции элементов ограждения помещения и, в первую очередь, остекления.

Методика расчета выбора рациональных вариантов систем звукопоглощения

Зависимости уровней звукового давления, полученные расчетным путем, для рабочих мест, находящихся в производственном помещении, а компрессорная станция имеет звукозащитное ограждение, и в случае, когда компрессор находится в производственном помещении, а оператор в помещении дистанционного управления, структурно одинаковы. Поэтому расчет систем шумозащиты может быть выполнен с единых позиций. Использование звукозащитного ограждения компрессора однозначно определяет возможное снижение шума в рабочей зоне оператора. Проектируя предлагаемые варианты систем шумозащиты, достаточно определить критерий минимизации акустических характеристик [4–6].

Учитывая различную степень влияния на организм звуков различной частоты и зная, что высокочастотные звуки являются наиболее неблагоприятными, для каждой октавной полосы формируются критерии оптимизации. Критерий оптимизации является средневзвешенной суммой, величину которой необходимо минимизировать, а для его максимальной адекватности следует ввести весовой коэффициент (K):

$$K = \min_{U,W} \left(\sum_{i=1}^9 (L_{i_p} - L_{i_{норм}}) \theta_i \right); \quad L_{i_p} > L_{i_{норм}}, \quad (1)$$

где L_{i_p} фактический и $L_{i_{норм}}$ – предельно-допустимые октавные уровни звукового давления;

θ_i – весовой коэффициент;

U – параметр, влияющий на акустические характеристики;

W – параметр, определяющий технологические и конструкционные характеристики.

Причем расчёт проводится только для спектральных составляющих, превышающих нормативные значения. Так, на рис. 1 фактический спектр шума показан наложенным на предельно допустимый.

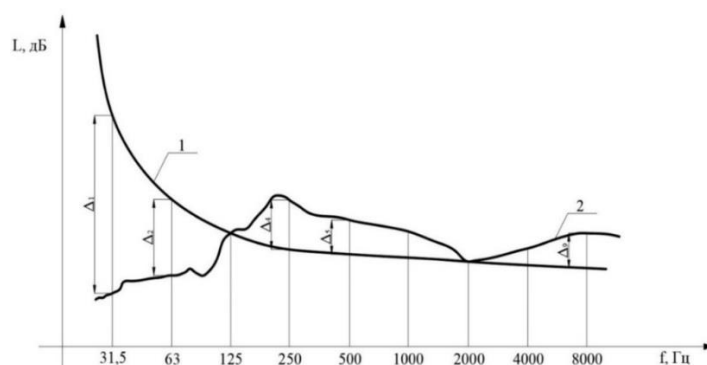


Рис. 1. Сравнительная характеристика нормируемого и фактического спектров шума:

1 – нормируемый спектр; 2 – фактический спектр

Разность фактического и нормативного значений уровней звукового давления на i -й октавной частоте ($L_{ip} - L_{инорм}$) $\Delta_1 \dots \Delta_9$ имеет отрицательные значения, а $\Delta_4 \dots \Delta_9$ – положительные значения. Минимизация критерия оптимизации (1) «притягивает» фактические уровни шума к нормативным в зоне $\Delta_i > 0$. Для оценки весовых коэффициентов θ_i предлагается принцип (рис. 2):

– разность в средней части спектра на частоте 500 Гц принимается $\Delta_5 = 1$;

– осью симметрии, относительно которой нормируемый спектр $L_{инорм}$ отображается в кривую L_{ip} будем считать прямую, параллельную оси ординат $c-c$, тогда весовой коэффициент оптимизации (θ_i) для i -й полосы спектра будет определяться отношением:

$$\theta_i = \frac{L_{ia}}{L_{инорм}}. \quad (2)$$

Весовой коэффициент является важным критерием оптимизации, значение которого приведены в таблице. Это позволяет учесть усиление влияния высокочастотных составляющих, а также учитывает ослабление влияния низкочастотных составляющих звука на величину критерия оптимизации.

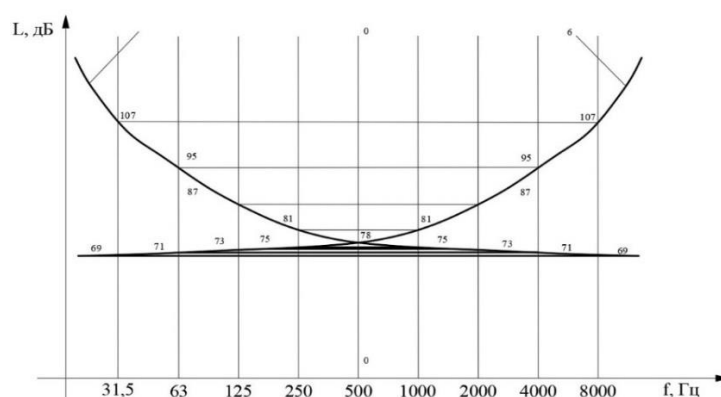


Рис. 2. Графическая зависимость определения весовых коэффициентов:

a – нормируемый спектр ($L_{инорм}$); b – кривая, полученная симметричным отображением нормативного спектра (a) относительно оси $c-c$ (L_{ia})

Необходимо отметить, что, несмотря на свою условность весового коэффициента (2), этот критерий достаточно объективно оценивает степень близости рассчитанных и нормативных значений уровней шума в октавных полосах.

Весовые коэффициенты (θ_i) для слагаемых критерия оптимизации

№ полосы	Среднегеометрическая частота в октавных полосах	$L_{i_{норм}}$	L_{i_a}	θ_i
1	31,5	107	69	0,645
2	63	95	71	0,747
3	125	87	73	0,839
4	250	81	75	0,962
5	500	78	78	1,000
6	1000	75	81	1,080
7	2000	73	87	1,192
8	4000	71	95	1,338
9	8000	69	107	1,551

Анализируя параметры и управляемые переменные, можно сделать вывод о зависимости уровня шума в октавных полосах частот, среди которых можно выделить такие, как [7, 8]:

Физические параметры: C_0 – скорость звука в воздушной среде, $C_0 = 340$ м/с; ρ_0 плотность воздуха, $\rho_0 = 1,29$ кг/м³.

Геометрические параметры: габаритные размеры внутреннего объема помещения (длина \times ширина \times высота) ($l_1 \times l_2 \times l_3$); A – площадь внутренней поверхности помещения, м², r – расстояние от расчетной точки до источника генерации шума, м.

Параметры, характерные для октавной полосы, вычисляются с помощью параметров физических и геометрических констант: N_i – число собственных частот колебаний воздушного объема; m и n – постоянные числа, определяющие модуль колебания элементов ограждения.

Управляемые переменные, которые рассчитываются в ходе проектирования, а их значения должны обеспечить максимум критерию:

- толщина элементов ограждения в пределах $h_1 \leq h \leq h_2$, м;
- коэффициенты звукопоглощения a_s для облицовочных шумопоглощающих материалов N_2 .

Максимальная толщина h учитывается при подборе шумопоглощающего материала, который сможет обеспечить минимальные значения по всем октавным полосам для компоненты M_2 :

$$M_2 = 10 \lg \sum_N \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{13,7 f_N A a_s + (f_N - f_{mn})^2}$$

где f_{mn} – собственные частоты колебаний, Гц;

a_s – коэффициент звукопоглощения.

В связи с дискретностью величины a оптимальная величина компоненты M_2 находится в результате перебора заданных в матрице значений a_s для каждой октавы.

На основании полученных результатов составляется выражение уровней воздушной и структурной составляющей шума по всем октавным полосам и формируется функция весового коэффициента для трех вариантов облицовочных материалов близких по применению.

Из базы данных выбираются среднегеометрические частоты колебаний октавных фильтров: 31,5–8000 Гц и ряды коэффициентов δ , соответствующих октавным полосам со звукопоглощением – 14,6; 43,8; 73; 43,3; 43,8; 43,8; 43,8; 87,6 Гц.

Вначале вычисляется триада целых чисел, определяющих частоты собственных колебаний воздушного объема:

$$n_i = \text{trunk} \left(\frac{2l_i}{C_0} \right), \quad i = 1, 2, 3, \dots,$$

где $\text{trunk}()$ – оператор округления содержимого скобок до целого.

Вспомогательные величины, определяющие геометрические размеры производственного помещения и звуковое давление, рассчитываются по ниже приведенным формулам:

$$V = l_1 \times l_2 \times l_3, \quad P = \frac{\rho_0^2 \cdot C_0^4}{2 \cdot V^2}.$$

С учетом выше приведенных зависимостей определяется спектр собственных мод колебаний производственного помещения:

$$f_{mn} = \frac{C_0}{2} \sqrt{\left(\frac{i}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{j}{l_2}\right)^2 + \left(\frac{k}{l_3}\right)^2},$$

где f_{mn} – собственные частоты колебаний, Гц;
 i, j, k – численные параметры указанных циклов.

Заключение

Получающиеся в ходе расчета собственные моды колебаний распределяются по ширине соответствующих октав, серединой которых являются среднегеометрические частоты соответствующих октавных фильтров [9, 10]. В этом случае счетчик собственных мод колебаний в соответствующей полосе частот увеличивает свое значение на единицу. Собственные частоты колебаний выше 11200 Гц не учитываются, так как именно это значение является верхней границей полосы пропускания девятой октавы.

Список литературы

- 1 **Тишина, А. В.** Критерий оптимизации шума оборудования на стадии проектирования / А. В. Тишина, Д. А. Рудиков // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – № 3–4. – С. 118–120. – EDN YKRJMR.
- 2 **Борисов, Л. П.** Звукоизоляция в машиностроении / Л. П. Борисов, Д. Р. Гужас. – Москва : Машиностроение, 1990. – 256 с. – ISBN 5-217-00885-7.
- 3 Методические рекомендации по оценке условий труда для основных профессий ОАО «РЖД» (утв. распоряжением ОАО «РЖД» 19.12.2012 № 2614р) / В. А. Финоченко, Т. А. Финоченко, Е. П. Чубарь [и др.]. – Ростов-на-Дону, 2012. – 73 с.
- 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 Экспериментальные исследования шума и вибрации при местном упрочнении деталей шарико-стержневым упрочнителем / С. А. Морозов, А. Н. Чукарин, Т. А. Финоченко // Мониторинг. Наука и технологии. – 2019. – № 1(39). – С. 65–69. – ISSN 2076-7358.
- 6 **Финоченко, Т. А.** Теоретическое исследование шума на участках обкатки двигателей / Т. А. Финоченко, В. Э. Фролов, И. А. Яицков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – Вып. 10. – С. 111–115. – ISSN 2071-6168.

References

- 1 **Tishina, A. V.** The criterion for optimizing equipment noise at the design stage / A. V. Tishina, D. A. Rudikov // Modern trends in the development of science and technology. – 2017. – No. 3–4. – P. 118–120. – EDN YKRJMR.
- 2 **Borisov, L. P.** Soundproofing in mechanical engineering / L. P. Borisov, D. R. Guzhas. – Moscow : Mashinostroenie, 1990. – 256 p. – ISBN 5-217-00885-7.
- 3 Guidelines for assessing working conditions for the main professions of Russian Railways (approved by order of Russian Railways on December 19, 2012 No. 2614r) / V. A. Finochenko, T. A. Finochenko, E. P. Chubar [et al.]. – Rostov-on-Don, 2012. – 73 p.
- 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 Experimental studies of noise and measurements with appropriate hardening with a part-rod hardener / S. A. Morozov, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko // Monitoring. Science and technology. – 2019. – No. 1(39). – P. 65–69. – ISSN 2076-7358.
- 6 **Finochenko, T. A.** Theoretical study of noise in the areas of engine running-in / T. A. Finochenko, V. E. Frolov, I. A. Yaitskov // Izvestiya TulGU. – Technical science. – 2020. – Issue 10. – P. 111–115. – ISSN 2071-6168.

7 **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.

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

9 **Кравченко, М. А.** Теоретическое исследование процессов шумообразования компрессорных установок / М. А. Кравченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4. – С. 19–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_19.

10 The estimation coefficient of the vibration transmission to the engines' support structures / I. Yaitskov, T. Finochenko, V. Frolov // Akustika. – 2021. – Т. 39. – P. 129–133. – DOI 10.36336/akustika 202139127.

7 **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.

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

9 **Kravchenko, M. A.** Theoretical study of the processes of excitation of vibrations and noise generation of compressor installations / M. A. Kravchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4. – P. 19–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_19.

10 The estimation coefficient of the vibration transmission to the engines' support structures / I. Yaitskov, T. Finochenko, V. Frolov // Akustika. – 2021. – Т. 39. – P. 129–133. – DOI 10.36336/akustika 202139127.

M. A. Kravchenko

CALCULATION METHODOLOGY OF THE CHOICE OF RATIONAL OPTION SYSTEMS OF SOUND ABSORPTION FOR OPERATOR SOUND PROTECTION SYSTEMS OF THE COMPRESSOR STATIONS

Abstract. Each compressor unit includes two units the compressor and the energy source, namely the engine. Moreover, two types of engines are used such as electric motors for low-power compressors and internal combustion engines for high-power compressors. It should be noted that in almost all sections of compressor stations, sound pressure levels exceed the permissible standard values, especially for high-capacity compressors. Since, under the operating conditions of compressors and engines, it is not possible to reduce noise levels in the source itself. Therefore, a method of vibroacoustic calculation for closed premises has been developed and, in fact, on this basis, noise-vibration protection systems for compressor room operators have been substantiated by the criterion of fulfilling sanitary standards at workplaces. The eigenmodes of oscillations obtained during the calculation are distributed over the width of the corresponding octaves, the middle of which are the geometric mean frequencies of the corresponding octave filters.

Keywords: compressor stations, sound absorption systems, industrial premises, cabins, remote control.

For citation: Kravchenko, M. A. Calculation methodology of the choice of rational option systems of sound absorption for operator sound protection systems of the compressor stations / M. A. Kravchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 167–171. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_167.

Сведения об авторах

Кравченко Михаил Александрович
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Массовые коммуникации и прикладная лингвистика»,
кандидат филологических наук, доцент,
e-mail: mak@rgups.ru

Information about the authors

Kravchenko Mikhail Alexandrovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Mass Communications and Applied Linguistics»,
Candidate of Philological Sciences,
Associate Professor,
e-mail: mak@rgups.ru

М. А. Савенкова, С. А. Воляник, А. П. Сычев, В. В. Авилов, П. Г. Иваночкин

ЭФФЕКТИВНАЯ ПОЛИМЕРНАЯ ФОСФОМОЛИБДАТНАЯ ПРИСАДКА ДЛЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Методами физико-химического анализа – термогравиметрическим, рентгенометрическим, ИК-спектроскопическим исследована диаграмма состояния системы метафосфат меди – триоксид молибдена, в которой образуется соединение $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$. Изучалось использование присадки фосфоромолибдата меди для улучшения физико-химических свойств пластичных смазок, применяемых в узлах трения железнодорожной техники. Проводились триботехнические испытания созданных смазочных материалов с многофункциональной присадкой $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$. Рассмотрен механизм смазочного действия противоизносной, противозадирной, антикоррозионной присадки фосфоро-молибдата меди в модельных основах, в качестве которых использовали пластичные смазки: ЛЗ-ЦНИИ, применяемая в узлах трения железнодорожной техники, и ЦИАТИМ-201, предназначенная для узлов трения автомобильной и авиационной техники.

Ключевые слова: трение, износ, смазочные материалы, диаграмма состояния системы, фосфоромолибдат меди, многофункциональная присадка, триботехнические испытания, смазочное действие.

Для цитирования: Эффективная полимерная фосфоромолибдатная присадка для смазочных материалов / М. А. Савенкова, С. А. Воляник, А. П. Сычев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

Введение

Конструкционным элементом трибосистем, снижающим силу трения и, следовательно, интенсивность изнашивания, являются смазочные материалы.

Увеличение ресурса надёжности и безремонтной эксплуатации трибосистем, их энергосберегающего и экологически безопасного функционирования обеспечивают смазочные материалы с запрограммированным комплексом свойств. Во многие узлы трения транспортных средств, работающих в условиях высоких скоростей и больших нагрузок, вводятся пластичные смазки. Оптимизация свойств пластичных смазок (ПС) достигается использованием присадок определённой химической природы и с заданными физико-химическими свойствами [1].

Для узлов трения транспортных средств, в том числе и железнодорожного транспорта, применяются пластичные смазки с антифрикционными, противоизносными и противозадирными свойствами, работающие в условиях граничного трения. При разделении металлических поверхностей трибосопряжения тонким слоем смазочного материала в условиях граничного трения возможно соприкосновение поверхностей и появление сухого трения, поэтому широко используются различные виды присадок.

Как отмечено в обзоре о влиянии смазочных материалов (СМ), а также различных присадок на триботехнические свойства твёрдых тел, актуальными противозадирными, противоизносными присадками являются неорганические полимерные фосфаты метафосфатного состава [2]. Метафосфатному составу отвечает соотношение оксид металла (II) / пентаоксид фосфора, равное единице, т.е. $\text{MeO}/\text{P}_2\text{O}_5 = 1$. Отмечено, что полимерные метафосфаты одно- и двухвалентных металлов отличаются высокой склонностью к комплексообразованию [3]. Уникальной способностью полимерных метафосфатов является взаимодействие с оксидами *d*-элементов (оксидами молибдена (VI) и вольфрама (VI), ванадия (V)), приводящее к образованию гетерополифосфатов.

По результатам проведённых триботехнических испытаний установлено, что присадки неорганической природы, а именно, фосфоромолибдаты некоторых *s*-элементов – лития и натрия, и *d*-элементов – цинка и никеля являются эффективными, обладают многофункциональностью, олеофильностью и значительно улучшают физико-химические и трибологические свойства смазочных композиций [4]. Поэтому целесообразно продолжить обоснованный системный поиск эффективных многофункциональных присадок внутри класса гетерополифосфатов.

Получение новых материалов с заданными свойствами – одно из важных направлений современного материаловедения, развивается на основе исследований фазовых диаграмм состояния систем

методами: термогравиметрическим, рентгенофазовым, ИК-спектроскопическим. Установлено, что основным типом взаимодействия в системах из метафосфатов одно- и двухвалентных металлов с оксидом молибдена (VI) является комплексобразование, приводящее при кристаллизации из расплавов к образованию соединений со стехиометрическим соотношением компонентов 1:1 [3, 4].

В тяжело нагруженных узлах трения железнодорожного транспорта в жёстких режимах эксплуатации происходит ухудшение эксплуатационных характеристик всех составляющих компонентов трибосистем – деструкция смазочного материала, разложение молекул присадок органической и элементоорганической природы, появление граничного и, далее, возможно, сухого трения, что увеличивает износ узлов трения. Исследования в этой области трибологии проводились и ранее [5].

По результатам триботехнических испытаний, проведённых нами ранее, установлено, что фосфоромолибдаты лития и натрия, а также цинка, никеля в качестве присадок к пластичным смазочным материалам существенно улучшают их физико-химические и реологические свойства [6]. Поэтому целесообразно продолжить поиск эффективных многофункциональных присадок внутри класса гетерополифосфатов.

Получение новых материалов с заданными свойствами – одно из важных направлений современного материаловедения, развивается на основе исследования фазовых диаграмм состояния. При исследовании диаграмм состояния установлено, что в системах из метафосфатов одно- и двухвалентных металлов с оксидом молибдена (VI) преобладающими являются реакции комплексобразования, приводящие при кристаллизации расплавов к образованию соединений со стехиометрическим соотношением компонентов 1:1 [7].

Проведены триботехнические испытания пластичных смазочных материалов, основу которых составили пластичные смазки (ПС) ЛЗ-ЦНИИ и ЦИАТИМ-201, используемые в узлах транспортных средств. В указанные ПС вводили соединение $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$, эффективность которого в качестве многофункциональной присадки проявилась в модельных смазочных средах – вазелиновом масле и глицерине [8].

Выполнялись лабораторные и стендовые исследования смазочных материалов с присадкой фосфоромолибдата меди с целью установления антифрикционных, противозадирных, противоизносных и антикоррозионных свойств этого соединения. Установлено увеличение работоспособности и уменьшение износостойкости узла трения.

Материалы и методы исследования

Один из компонентов системы метафосфат меди – триоксид молибдена $\text{Cu}(\text{PO}_3)_2$ синтезировали из гексагидрата нитрата меди и однозамещённого ортофосфата аммония марок «хч», взятых в стехиометрическом соотношении. Полученное соединение плавится при 935°C . Методами ИК-спектроскопии и восходящей хроматографии на бумаге установлена индивидуальность соединения и определена структура аниона $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$. Анион соединения является тетраметафосфатом. Циклический анион содержит четыре атома фосфора, соединённые друг с другом через атомы кислорода.

В системе $\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 - \text{MoO}_3$ выявлено образование новой фазы при соотношении исходных компонентов 1:1. Дериватограмма образца такого состава имеет чёткий глубокий эндоэффект при 935°C . Следовательно, соединение плавится конгруэнтно, без разложения, химически и термически стабильно не имеет фазовых переходов. Даже при перегреве соединения на 150°C выше температуры плавления в течение 3 ч потери массы образца не происходит.

ИК-спектр $\text{Cu}(\text{PO}_3)_2$ фиксирует в области антисимметричных колебаний связей $\text{V}_{\text{as}} \text{POP}$ только одну сильную полосу поглощения при 1037см^{-1} и в интервале симметричных колебаний $\text{V}_s \text{POP}$ узкий дуплет при $720-750\text{см}^{-1}$. Такие отличительные особенности характерны для ИК-спектров тетраметафосфатов. Хроматографический анализ метафосфата меди показал присутствие аниона циклотетрафосфата $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$.

При образовании фосфоромолибдата меди происходит усложнение анионной структуры, в которой сохраняются фрагменты связей P-O-P и O-P-O , но возникают новые P-O-Mo . Такие анионы в виде терминальных тетраэдров с атомами молибдена характеризуют способность пентавалентного фосфора и молибдена с валентностью шесть образовывать разнообразные циклические структуры.

Индивидуальность выделенного фосфоромолибдата меди подтверждена рентгенофазовым, ИК-спектроскопическим анализом, тонкослойной хроматографией на бумаге, электронно-оптическим и кристаллографическими исследованиями [9]. Применение указанных методов исследования показало, что фосфоромолибдат меди имеет анионную молибденофосфатную структуру из молибдатных и фосфатных фрагментов, соединённых мостиковыми связями P-O-Mo . На рис. 1 приведена структура циклического аниона соединения $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$.

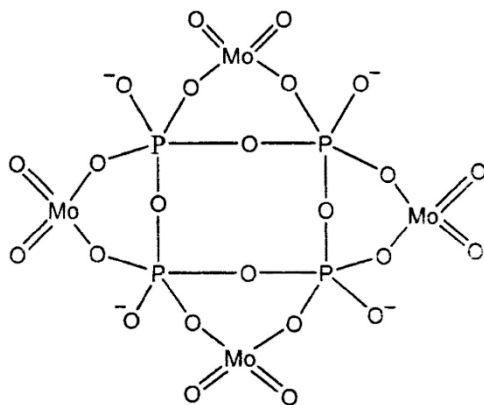


Рис. 1. Структура циклического аниона $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$

Колебательный ИК-спектр поглощения $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ имеет особенности, характерные для спектров метафосфатов с циклическими тетраметафосфатными анионами.

На контуре полосы в области $820\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ отражаются четыре максимума при $835, 910, 970$ и 988 см^{-1} , отвечающие валентным антисимметричным колебаниям связей O-Mo-O и P-O-P , которые происходят вдоль оси связей без изменения угла между ними. Валентные симметричные колебания V_s фрагментов O-Mo-O фиксируются при $840, 905, 980$ и 985 см^{-1} .

Полосы сильной интенсивности при $575, 598$ и 670 см^{-1} отнести к симметричными V_s и антисимметричным колебанием связей Mo-O-Mo .

Деформационные колебания, связанные с изменением значений валентных углов, δPO_2 и γPO_2 выявлены в интервале значений волновых чисел $450\text{--}580\text{ см}^{-1}$, а деформационные колебания фрагментов P-O-Mo проявляются при $565\text{--}725\text{ см}^{-1}$.

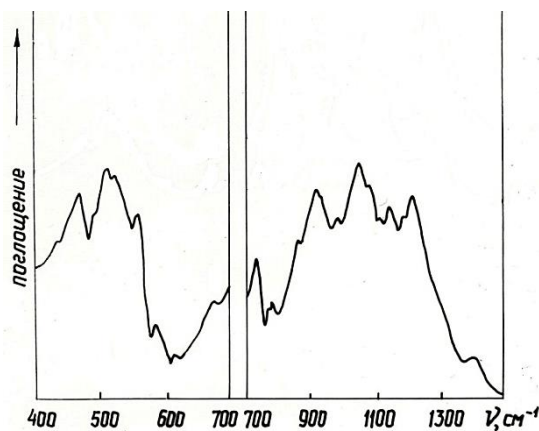


Рис. 2. ИК-спектр фосфоромолибдата меди

Интерпретация результатов восходящей тонкослойной хроматографии на бумаге, как и данные ИК-спектроскопии, позволяет однозначно определить гетероанион соединения как кольцевую структуру, подобную тетраметафосфатному аниону $(\text{P}_4\text{O}_{12})^{4-}$ [9]. На каждой из хроматограмм, полученных при использовании кислого и щелочного растворителя, имеется только одно пятно, характерное для тетраметафосфатного кольца.

Данные электронно-микроскопического исследования показывают, что соединение $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ можно отнести к моноклинной сингонии, что является характерным признаком для большинства фосфоромолибдатов такого стехиометрического соотношения [10] и благоприятным факторам формирования вторичных структур на поверхностях трения.

Цель работы и методы исследования

Триботехническим испытаниям подвергали смазочные материалы, основу которых составляли пластичные смазки (ПС) ЦИАТИМ-201 и ЛЗ-ЦНИИ, применяемые для трибосопряжений многих транспортных средств. В указанные ПС вводили присадку $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$. Выполнялись лаборатор-

ные и стендовые исследования смазочных материалов с присадкой фосфоромолибдата меди с целью установления антифрикционных, противоизносных, противозадирных и антикоррозионных свойств этого соединения. Экспериментально установлено увеличение работоспособности и уменьшение износа узла трения при использовании созданных смазочных материалов.

С помощью прибора синхронного термического анализа NETZSCH STA 443F3 Jupiter выполняли термогравиметрические исследования в атмосфере воздуха в интервале 20–1200 °С, регистрируя фазовые превращения и температурные эффекты. ИК-спектры поглощения образцов записывали на спектрометре Specord 75IK в диапазоне частот 400–3500 см⁻¹. Прибор ДРОН-3 с камерой, медным анодом и Ni-фильтром использовали для снятия рентгенограмм со скоростью 1 град/мин.

Восходящая тонкослойная хроматография на кислом и щелочном растворителях использовалась наряду с ИК-спектроскопией для идентификации типа аниона полимерных фосфатов.

На электронном микроскопе TESLA BS-500 выполняли электронно-микроскопическое исследование Cu(PO₃)₂ и 2Cu(PO₃)₂·4MoO₃. Присадка фосфоромолибдата меди, диспергированная на бисерной мельнице NETZSCH MICRO CER, вводилась в модельные ПС в виде наноразмерных частиц размерами от 45 до 55 нм. Размеры частиц диспергированной присадки определяли на дисковой центрифуге CPS Model BC 24000.

Противоизносные свойства созданных смазочных материалов исследовали, измеряя диаметр пятна износа. Лабораторные исследования выполняли на четырёхшариковой машине трения ЧМТ-1 в течение 1 часа, при нагрузке 196 Н и скорости вращения шпинделя верхнего шарика 1460 мин⁻¹. Измеряли диаметр пятна износа на стереоскопическом микроскопе с 100-кратным увеличением и программным обеспечением colormix. С помощью комплекса ZYGO New View-600S определяли шероховатость поверхностей пятен износа и микроструктуру поверхностей в трёх измерениях.

Результаты

Проведено ИК-спектроскопирование созданных смазочных композиций (СК) после триботехнических испытаний. В ИК-спектрах поглощения образцов выявлены признаки, проявляемые длинноципочечными анионами полимерных фосфатов. Таковыми являются совокупности частот в интервалах 860–940, 680–710 см⁻¹, характерных для валентных колебаний связей Р-О-Р и О-Мо-О. В табл. 1 указаны результаты триботехнических испытаний ПС ЦИАТИМ-201 и ЛЗ-ЦНИИ с присадкой фосфоромолибдата меди. Некоторые наиболее часто определяемые физико-химические свойства созданных смазочных композиций приведены в табл. 2.

Таблица 1

Диаметр и шероховатость поверхности пятен износа

Смазочная среда	Диаметр пятна износа, мм			Среднее значение	Шероховатость Ra, мкм
	измеренный				
	0,569	0,563	0,611		
ЦИАТИМ-201				0,581	2,586
ЦИАТИМ-201 + 3% ПРИСАДКИ	0,348	0,351	0,342	0,347	0,998
ЛЗ-ЦНИИ	0,548	0,562	0,540	0,550	2,520
ЛЗ-ЦНИИ + 3% ПРИСАДКИ	0,329	0,334	0,326	0,330	0,990

Сравнение средних значений по диаметру пятна износа для созданных СК показывает уменьшение этого показателя на 60 % для ЦИАТИМ-201 и для ЛЗ-ЦНИИ, что является хорошим результатом для узла трения в условиях значительных скоростей и больших нагрузок. Сопоставление значений средней шероховатости поверхностей пятен износа образцов также выявило уменьшение такой характеристики для СК в обоих случаях почти в 2,5 раза.

Таблица 2

Физико-химические свойства СК

Показатель	ЦИАТИМ-201	ЦИАТИМ-201 +3 % присадок	ЛЗ-ЦНИИ	ЛЗ-ЦНИИ + 3 % присадки
Пенетрация при 25 °С	270	289	228	241
Температура каплепадения	175	208	130	188
Коллоидная стабильность	25	17	22	12
Коррозионное воздействие	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает
Массовая доля воды, %	Отсутствие	Отсутствие	Следы	Отсутствие
Содержание механических примесей	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствие

Как следует из сравнения данных по физико-химическим свойствам используемых нормативных ПС ЦИАТИМ-201 и ЛЗ-ЦНИИ с созданными СК, последние показали трибостабильность и хорошие противоизносные свойства.

Обсуждение результатов

По результатам испытаний (табл. 1, 2) добавка $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ в качестве присадки в модельные смазочные среды (ПС) эффективна и значительно улучшает триботехнические свойства созданных СК. Корреляция по значениям диаметра пятна износа и шероховатости поверхностей образцов в СК свидетельствует об ориентированном расположении антифрикционных защитных слоёв вторичных структур, образующих плосковершинный рельеф, что снижает контактные локальные давления в узле трения.

Так как в ИК-спектрах, созданных СК, после испытаний зафиксированы колебания фрагментов связей, свойственные линейным структурам, то исходная циклическая структура, присоединяя кислород из окружающей среды, раскрывается без нарушения молекулярной стехиометрии и, сохраняя тетраэдрические группировки MoO_4 и PO_4 , преобразуется в длинноцепочечную (рис. 3).

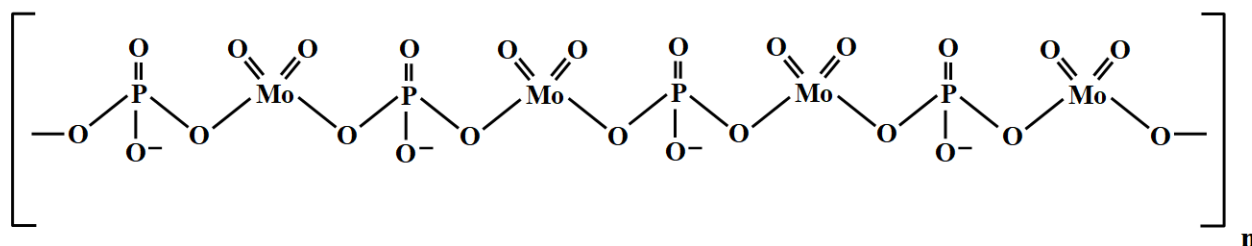


Рис. 3. Линейная форма аниона фосфомолибдата меди

Анионы линейной формы фосфомолибдата меди присоединяются к металлу поверхности трения и образуют на ней сглаженный рельеф, поскольку значительно уменьшаются расстояния между линиями выступов и впадин. Такая топография возможна только при образовании слоёв вторичных структур на поверхности трения.

Анализ ИК-спектров образцов после триботехнических испытаний показывает отсутствие окислительного разложения смазочной основы исходных ПС в созданных СК, так как очень снижена интенсивность колебания связей $-\text{OH}$ ($3100\text{--}2930\text{ см}^{-1}$), карбонильных групп альдегидов ($1650\text{--}1910\text{ см}^{-1}$), карбоксилат-анионов ($1550\text{--}1600\text{ см}^{-1}$) по сравнению с перечисленными чётко выраженными колебаниями тех же группировок в ИК-спектрах исходных ПС без присадки фосфомолибдата меди.

Полученные результаты обоснованы данными, приведёнными в табл. 3. Коллоидная стабильность (отделение масляной фазы) понизилась почти в два раза, а стойкость к влагопоглощению и окислению возросла так же, как длительность и надёжность работы узла трения. Причём отсутствие следов

воды, механических примесей подтверждает и отсутствие коррозионного разрушения металла в созданных СК. Улучшились такие показатели, как пенетрация и температура каплепадения, что необходимо для обеспечения работоспособности независимо от сезонности использования созданных СК.

Выводы

Установлено, что присадка фосфомолибдата меди, благодаря лабильности структуры и способности к изменению строения аниона, способствует проявлению смазочного действия. Проведённые триботехнические испытания созданных СК с присадкой $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ выявили значительное улучшение физико-химических, триботехнических показателей новых СК, поэтому синтезированная полимерная присадка действует как многофункциональная. Созданные СК могут найти применение в узлах трения железнодорожного транспорта в условиях высоких скоростей и нагрузок.

Список литературы

- 1 Трибологические исследования для разработки модификаторов трения в системе «колесо – рельс» / С. М. Захаров, И. Г. Горячева, А. П. Краснов [и др.] // Трение и износ. – 2015. – Т. 36. – № 6. – С. 468–475. – DOI 10.3103/S10683661.
- 2 Свойства смазочных материалов пума и буксол, модифицированных неорганическими присадками двойных полифосфатов / В. И. Колесников, М. А. Савенкова, В. В. Авилов [и др.] // Трение и износ. – 2015. – Т. 36. – № 3. – С. 273–281. – DOI 10.3103/S1068366615030071.
- 3 Улучшение трибологических параметров смазочных материалов введением неорганической полимерной присадки / И. В. Колесников, М. А. Савенкова, А. П. Сычев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2021. – № 1. – С. 329–332. – DOI 10.3103/S1068798X21040134.
- 4 Синтез и исследование триботехнических характеристик новой наноразмерной керамической присадки фосфомолибдата никеля к пластичным смазкам / В. И. Колесников, С. Ф. Ермаков, Ф. Даниэль [и др.] // Трение и износ. – 2010. – Т. 31. – № 6. – С. 426–432. – DOI 10.3103/S1068366610060048.
- 5 Сидашов, А. В. Образование поверхностных пленок на стали при трении полимерных композитов, содержащих микрокапсулы со смазкой / А. В. Сидашов, М. В. Бойко // Конспект лекций по машиностроению. – 2020. – С. 1259–1268. – DOI 10.1007/978-3-030-22041-9_131.
- 6 Влияние коэффициента трения в узле «пятник-подпятник» грузовых вагонов на работу сил трения при движении в кривой / В. И. Колесников, А. А. Зарифьян, А. П. Сычев [и др.] // Трение и износ. – 2016. – Т. 31. – № 6. – С. 476–481. – DOI 10.3103/S1068366616050081.
- 7 Трибоиндуцированный эффект экранирующего действия этаноламинов и соединений холестерина при динамическом контакте металлов в пластичных смазках / В. И. Колесников, С. Ф. Ермаков, А. П. Сычев [и др.] // Научная

References

- 1 Tribological studies for developing friction modifiers in the «wheel – rail» system / S. M. Zakharov, D. P. Markov, A. V. Ovechkin [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36. – No. 6. – P. 468–475. – DOI 10.3103/S10683661.
- 2 Properties of Puma and Buksol lubricants modified by inorganic additives of binary polyphosphates / V. I. Kolesnikov, M. A. Savenkova, V. V. Avilov [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36. – No. 3. – P. 273–281. – DOI 10.3103/S1068366615030071.
- 3 Improving Lubricants by Adding Inorganic Polymers / I. V. Kolesnikov, M. A. Savenkova, A. P. Sychev [et al.] // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2021. – No. 1. – P. 329–332. – DOI 10.3103/S1068798X21040134.
- 4 Synthesis and study of triboengineering characteristics of a new nanosize ceramic nickel phosphomolybdate additive to greases / V. I. Kolesnikov, S. F. Ermakov, F. Daniel [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2010. – Vol. 31. – No. 6. – P. 426–432. – DOI 10.3103/S1068366610060048.
- 5 Sidashov, A. V. Surface Films Formation on Steel During Friction of Polymer Composites Containing Microcapsules with Lubricant / A. V. Sidashov, M. V. Boiko // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – P. 1259–1268. – DOI 10.1007/978-3-030-22041-9_131.
- 6 The effect of the coefficient of journal friction in «ball-and-socket» bogie body pivots on the work done by friction forces in curvilinear motion / V. I. Kolesnikov, A. A. Zarifiyan, A. P. Sychev [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2016. – Vol. 31. – No. 6. – P. 476–481. – DOI 10.3103/S1068366616050081.
- 7 The Tribo-Induced Effect of Shielding Action of Ethanolamines and Compounds of Cholesterol under the Dynamic Contact of Metals in Plastic Lubricants / V. I. Kolesnikov, S. F. Ermakov, A. P. Sychev [et al.] // Scientific article. – 2020. –

статья. – 2020. – Т. 493. – № 1. – С. 79–83. – DOI 10.1134/S1028335820080030.

8 Триботехнические характеристики химически неактивных поверхностей в смазочных материалах, легированных соединениями холестерина и жирных кислот / С. Ф. Ермаков, А. П. Сычев, И. В. Колесников [и др.] // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 1. – С. 7–10. – DOI 10.3103/S1068366621010025.

9 Смазочные материалы молекулярной инженерии : синтез, активация и трибологическая характеристика комплексов серебра в качестве присадок к смазочным материалам / Ch. P. Twist, A. M. Seyam, Ch. Chen [et al.] // Передовые инженерные материалы. – 2012. – V. 14. – P. 101–105. – DOI 10.1002/adem.201100193.

10 Механизм смазочного действия присадок полифосфатов и гетерополифосфатов в трибосистемах / В. И. Колесников, М. А. Савенкова, Ю. Ф. Мигаль [и др.] // Научная статья. – 2020. – Т. 90. – № 5. – С. 743–753 (2017). – URL: <https://doi.org/10.1134/S1070427217050135> (дата обращения 03.05.2023).

11 Влияние внешних воздействий на процессы структурирования в смазочных материалах / В. Г. Савкин, Т. Г. Чмыхова, И. О. Деликатная, Е. Н. Волнянко // Трение и износ. – 2007. – Т. 28. – № 6. – С. 634–639. – DOI 10.3103/51068366620020051.

12 **Чжан, Дж.** Смазывание границ адсорбционной пленкой. Статья 3 / Дж. Чжан, Ю. Мэн. – С. 115–147. (2015). – URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0084-4>. (дата обращения 03.05.2023).

13 Образование граничных смазывающих пленок в присутствии комплексообразующих присадок / М. В. Бойко, И. В. Колесников, С. Ф. Ермаков [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – Т. 41. – С. 927–930. – DOI 10.36652/0202-3350-2020-21-8-367-371.

14 Формирование поверхностных структур при трении в синтетических маслах / А. В. Сидашов, М. В. Бойко, А. Т. Козаков, В. В. Лесняк // Трение и износ. – 2020. – Т. 41. – № 5. – P. 417–420. – DOI 10.3103/S1068366620050165.

15 Исследование частиц износа, образующихся в некоторых сложноэфирных смазочных материалах / М. В. Бойко, И. В. Колесников, Т. Г. Бойко [и др.] // Материалы конференции. – 2019. – Т. 2188. – DOI 10.1063/1.5138375.

Vol. 493. – No. 1. – P. 79–83. – DOI 10.1134/S1028335820080030.

8 Tribological Characteristics of Chemically Inactive Surfaces in Lubricants Doped with Cholesterol and Fatty Acid Compounds / S. F. Ermakov, A. P. Sychev, I. V. Kolesnikov [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2021. – Vol. 42. – No. 1. – P. 7–10. – DOI 10.3103/S1068366621010025.

9 Molecularly-Engineered Lubricants : Synthesis, Activation, and Tribological Characterization of Silver Complexes as Lubricant Additives / Ch. P. Twist, A. M. Seyam, Ch. Chen [et al.] // Advanced engineering materials. – 2012. – V. 14. – P. 101–105. – DOI 10.1002/adem.201100193.

10 Mechanism of lubricating action of polyphosphate and heteropolyphosphate additives in tribosystems / V. I. Kolesnikov, M. A. Savenkova, Y. F. Migal [et al.] // Scientific article. – 2020. – Vol. 90. – P. 743–753 (2017). – URL: <https://doi.org/10.1134/S1070427217050135> (date of access: 05/03/2023).

11 Influence of external effects on structuring of lubricants / T.G. Chmykhova, I.O. Delikatnaya, E. N. Volnyanko // Journal of Friction and Wear. – 2010. – Vol. 28. – No. 6. – P. 634–639. – DOI 10.3103/51068366620020051.

12 **Zhang, J.** Boundary lubrication by adsorption film. Friction 3 / J. Zhang, Y. Meng. – P. 115–147. (2015). – URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0084-4>. (date of access: 05/03/2023).

13 Formation of boundary lubricating films in the presence of complexing additives / M. V. Boiko, I. V. Kolesnikov, S. F. Ermakov [et al.] // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41. – P. 927–930. – DOI 10.36652/0202-3350-2020-21-8-367-371.

14 Formation of Surface Structures under Friction in Synthetic Oils / A. V. Sidashov, M. V. Boiko, A. T. Kozakov, V. V. Lesnyak // Journal of Friction and Wear. – 2020. – Vol. 41. – No. 5. – P. 417–420. – DOI 10.3103/S1068366620050165.

15 Study of wear particles formed in some ester lubricants / M. V. Boiko, I. V. Kolesnikov, T. G. Boiko [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2188. – DOI 10.1063/1.5138375.

M. A. Savenkova, S. A. Volyanik, A. P. Sychev, V. V. Avilov, P. G. Ivanochkin

THE EFFICIENT POLYMER PHOSPHOR-MOLYBDENUM ADDITIVE FOR LUBRICANTS

Abstract. The state diagram of the copper metaphosphate – molybdenum trioxide system, in which $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ compounds are formed, has been studied by the methods of physical and chemical analysis such as thermogravimetric, X-ray and IR-spectroscopic. The use of

copper phosphoromolybdate additive to improve the physicochemical properties of greases used in friction units of railway equipment was studied. Tribotechnical tests of the created lubricants with a multifunctional additive $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ were carried out. The mechanism of the lubricating action of antiwear, extreme pressure, anticorrosion additives of copper phosphoromolybdate in model bases, which used LZ-TsNII greases, used in roller bearings of railway cars and TsIATIM-201, intended for friction units of automobile and aviation equipment, is considered.

Keywords: friction, wear, lubricants, system state diagram, copper phosphoromolybdate, multifunctional additive, tribotechnical tests, lubricating effect.

For citation: The efficient polymer phosphor-molybdenum additive for lubricants / M. A. Savenkova, S. A. Volyanik, A. P. Sychev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

Сведения об авторах

Савенкова Мария Андреевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Химия»,
кандидат химических наук, доцент,
e-mail: him@rgups.ru

Воляник Светлана Алексеевна

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

Сычев Александр Павлович

Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН),
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: Aleks_sap@mail.ru

Авилов Виктор Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Лаборатория «Нанотехнологии и новые материалы», научный сотрудник,
e-mail: Avilov_Victor@mail.ru

Иваночкин Павел Григорьевич

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

Information about the authors

Savenkova Mariya Andreevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Chemistry»,
Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: him@rgups.ru

Volyanik Svetlana Alekseevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Chemistry»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: him@rgups.ru

Sychev Alexander Pavlovich

Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (UNC RAS),
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher,
e-mail: Aleks_sap@mail.ru

Avilov Viktor Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Laboratory «Nanotechnology and New Materials»,
Researcher,
e-mail: Avilov_Victor@mail.ru

Ivanochkin Pavel Grigorievich

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

В. В. Шаповалов, О. И. Коваленко, И. А. Колодяжный, К. А. Кручинин, А. Л. Озябкин

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

Аннотация. Рассмотрена перспективная силовая автоматическая трансмиссия, разработанная учёными РГУПС. В конструкции этой автоматической коробки перемены передач (АКПП) используется оригинальная, не имеющая аналогов муфта-шестерня, использующаяся в качестве фрикционного усилительного звена. Благодаря применению муфты-шестерни удалось увеличить КПД АКПП, ввиду того что практически отсутствуют разрывы потока передаваемой мощности, благодаря этому скорость включения передач увеличилась. Также был разработан алгоритм управления трансмиссией. Его принцип действия основан на движении электромагнита, перемещающегося параллельно герконам, которые являются активаторами для замыкания ключей. Электромагнит жестко закреплен на соленоиде,двигающемся вверх и вниз в соответствии с ростом или уменьшением напряжения, изменяющегося в большую или меньшую сторону за счет скорости вращения выходного вала двигателя. Конструкция схемы управления трансмиссией проста в исполнении и обладает высокой надежностью.

Ключевые слова: трансмиссия, муфта-шестерня, система управления, алгоритм, контакт, геркон, электромагнит, надежность.

Для цитирования: Разработка алгоритма управления автоматической силовой трансмиссией / В. В. Шаповалов, О. И. Коваленко, И. А. Колодяжный [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения – 2023. – № 2. – С. 180–188. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_180.

Введение

С появлением механических коробок перемены передач в автомобилях инженеры и конструкторы задумались над упрощением процесса управления транспортными средствами путем создания автоматических версий силовых трансмиссий. Созданию конструкции автоматической трансмиссии предшествовало огромное количество конструкторских разработок и экспериментов в области силовых трансмиссий. Но только в 1948 году на автомобиле Buick появилась первая в мире серийная двухступенчатая автоматическая трансмиссия Dynaflo [1], в которой стал использоваться гидротрансформатор вместо применяемой ранее гидромуфты, ухудшающей разгонную динамику.

На протяжении следующих десятилетий количество различных трансмиссий увеличивалось ввиду того, что перед инженерами и конструкторами стояла задача по созданию наиболее эффективного и экономичного типа трансмиссии, появились: КПП с вариатором, электрогидравлические коробки передач, роботизированные коробки перемены передач, а также гибридные силовые трансмиссии [2–6].

Основная часть

Сегодня автоматические трансмиссии получили распространение не только на автомобильном транспорте, но и на железнодорожном, а также на строительной, землеройно-транспортной и военной технике. В связи с уходом с российского рынка зарубежных поставщиков автоматических силовых трансмиссий, стал особенно актуальным вопрос замещения импортных трансмиссий на отечественные. На базе фундаментальных теоретических основ динамической анизотропии фрикционных связей [7–10] учёными РГУПС был создан эскизный вариант перспективной трансмиссии (рис 1, а) с фрикционной муфтой-шестерней, не имеющей аналогов (рис. 1, б). Она имеет электронно-электромагнитное управление, которое за счёт сокращения времени разрыва потока передаваемой мощности – t_w ($t_w \rightarrow 0$) в процессе переключения передач последовательно и параллельно соединенных элементов позволяет значительно увеличить КПД. Муфта-шестерня обеспечивает высокую надежность из-за отсутствия сложных технических систем в своем составе, а по своим технико-экономическим характеристикам не имеет конкурентных аналогов. Трансмиссия легко может быть адаптирована для путевых машин, например, для погрузочно-транспортного мотовоза МПТ-6К.

Поскольку разработанная перспективная трансмиссия (рис 1, а) не предусматривает в своей конструкции дополнительные планетарные ряды с дополнительными зубчатыми зацеплениями, а имеет только одно зацепление, как и обыкновенная механическая КПП, то вероятность выхода из строя

у неё значительно снижена. Например, 8-ступенчатая трансмиссия ZF [3] имеет 4 ряда планетарных передач, каждый из которых состоит из одной солнечной шестерни, одного водила, трех сателлитов и одной коронной шестерни, такая техническая система является сложной, поэтому согласно формуле по вычислению вероятности на отказ получаем:

$$P(t) = \frac{N_0 - n_t}{N_0}, \quad (1)$$

где N_0 – исходное число работоспособных объектов,
 n_t – число отказавших объектов за время t .

$P(t) = \frac{6-1}{6} = \frac{5}{6} = 0,833$ – вероятность отказа планетарного ряда трансмиссии ZF [3] при отказе первого элемента из шести в одном из планетарных рядов.

Зубчатая передача обладает высоким ресурсом при наличии масляного клина при контактировании зубьев. Она работает в режиме граничного, а затем переходит в жидкостное трение, при больших скоростях полностью разрывает контакт между зубьями, и зубья опираются на масляный клин. В нашей перспективной трансмиссии используется одно зубчатое зацепление с одной шестерней и одной муфтой-шестерней, то есть применяется 2 элемента, значит вероятность отказа зубчатого зацепления:

$$P(t) = \frac{2-1}{2} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ – вероятность отказа одной из двух шестерён.}$$

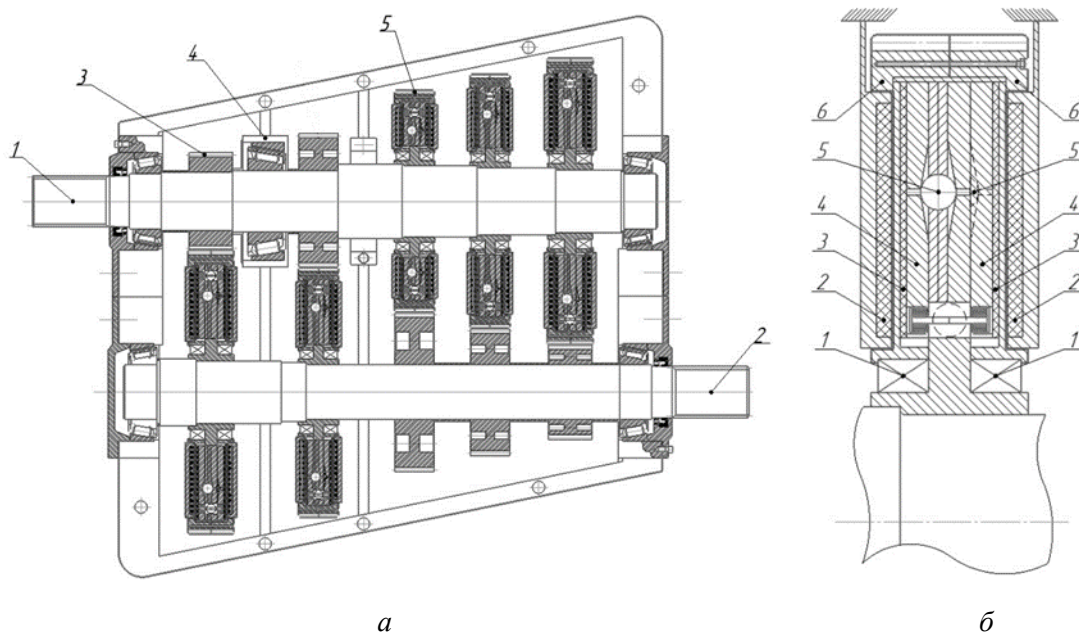


Рис. 1. Эскизный вариант перспективной силовой трансмиссии и ее основного компонента – фрикционной муфты-шестерни:

а – общий вид разработанной пятиступенчатой роботизированной автоматической силовой трансмиссии: 1 – входной вал; 2 – выходной вал; 3 – ведущая шестерня;

4 – подшипник; 5 – муфта-шестерня;

б – конструкция основного элемента трансмиссии – муфты-шестерни: 1 – подшипник;

2 – магнит; 3 – металлокерамический диск; 4 – диск включения; 5 – тело вращения;

6 – полукорпус

Таким образом, вероятность выхода из строя одного планетарного ряда, состоящего из шести элементов, у восьмиступенчатой трансмиссии ZF [3] выше по сравнению с зубчатой передачей, состоящей из двух элементов, у трансмиссии, предлагаемой учеными РГУПС, согласно расчету вероятности, на отказ по формуле (1).

При интеграции в корпус шестерни зеркальной обгонной муфты реализуется комбинированное усилительное звено. Для создания высокого значения коэффициента усиления $K_{ус} \rightarrow \infty$ в усилитель-

ном элементе АКПП необходимо обеспечить высокую стабильность коэффициента трения между металлокерамическим диском и диском включения. Реализация же апериодического звена фрикционной пары обеспечивает монотонно нарастающий переходной процесс и динамическую ошибку регулирования, стремящуюся к нулю.

Встроенное фрикционное усилительное звено при высокой стабильности коэффициента трения f (т.е. $\Delta f \rightarrow 0$) имеет коэффициент усиления $K_{ус} \rightarrow \infty$ и обладает высокой компактностью, что позволяет вписать его в корпуса шестерён АКПП.

Муфта-шестерня имеет несколько режимов работы:

- 1 Переходной режим (в этом случае ни резонансное, ни антирезонансное напряжение на муфту не передается);
- 2 Режим включения (подача на электромагнит антирезонансного динамического воздействия);
- 3 Режим выключения (подача на электромагнит резонансного динамического воздействия).

Разработанная учеными РГУПС пятиступенчатая АКПП имеет следующий оригинальный алгоритм управления: ее включение осуществляется путем нажатия на кнопку «пуск (П) (ручной пуск)». На выходном валу АКПП располагается ротор тахогенератора (ТГ), на клеммах которого вырабатывается напряжение, пропорциональное скорости вращения выходного вала (В-2). При нажатии кнопки «пуск» напряжение с клемм тахогенератора подается на первый электромагнит ИЭМ (рис. 2, 3), в результате этого происходит закрытие контакта ИЭМ-6, подающего напряжение на обмотку ЭМ-I, включающее муфту сцепления 1-й передачи, и начинается движение мобильной технической системы на первой передаче. При этом происходит блокирование всех остальных передач (второй, третьей, четвертой, пятой) за счет открытия контактов ИЭМ-2, ИЭМ-3, ИЭМ-4, ИЭМ-5.

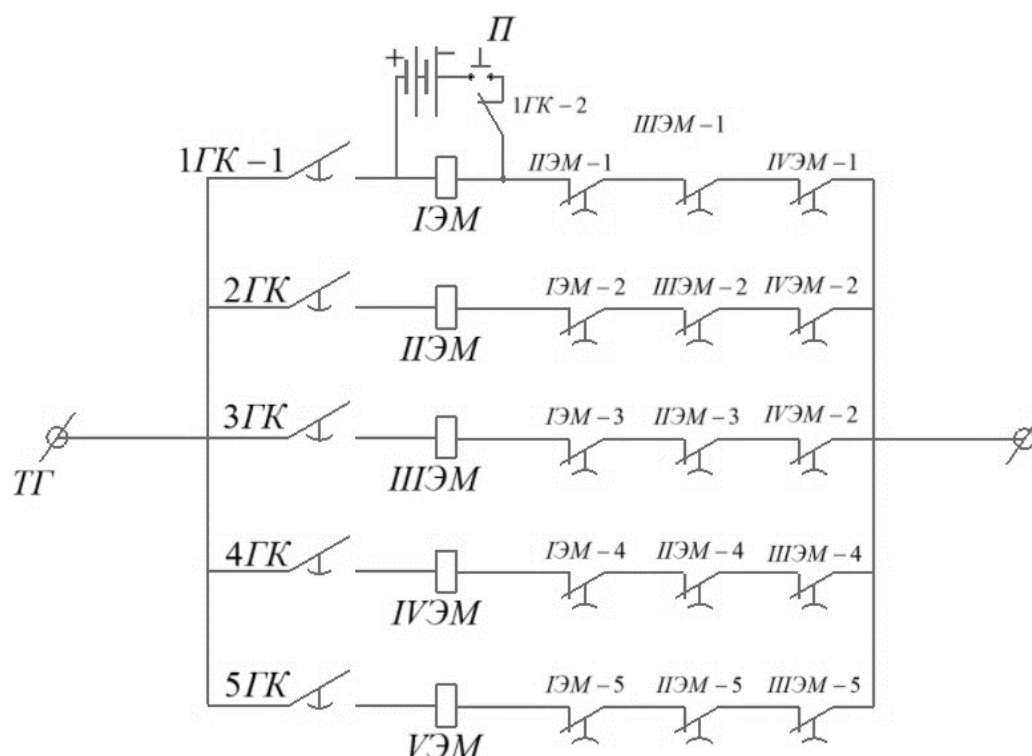


Рис. 2. Электросхема включения контактов, управляющих коробкой передач

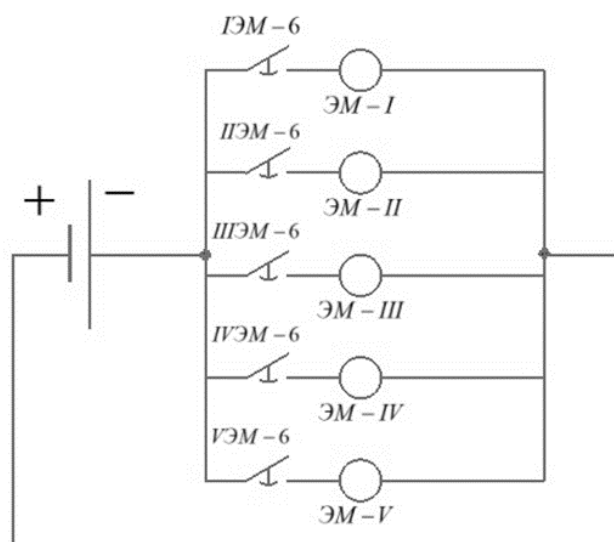


Рис. 3. Электросхема обмотки

В момент включения первой передачи на клеммах генератора, находящегося на втором валу (В-2), где расположен ротор ТГ, вырабатывается напряжение $U_{ТГ}$ необходимой величины. После включения и самовозврата в исходное (открытое) положение кнопки П, питание на обмотку IЭМ подается с клемм ТГ за счет включения замыкающего контакта с задержкой времени на открытие 1ГК (контакт геркона 1ГК).

По мере роста скорости и нахождения магнита в стабильном состоянии, соответствующем устойчивому взаимодействию магнита и геркона 1Г, происходит включение контакта 1ГК. Геркон 1Г специальный, имеющий два контакта: один контакт замыкающий – 1ГК-1, а второй – размыкающий – 1ГК-2, замыкающий контакт геркона 1ГК подает напряжение на обмотку IЭМ, размыкающий контакт установлен в цепи питания ручного пуска обмотки IЭМ, с задержкой по времени происходит разрыв размыкающего контакта 1ГК-2, и обмотка IЭМ питается за счет включенного контакта геркона 1ГК-1. Контакт геркона 1ГК-1 имеет задержку по времени на отключение, с увеличением роста скорости мобильной технической системы возрастает напряжение на клеммах тахогенератора, сердечник соленоида (СС) 1 (рис. 4) перемещается вверх, сжимая при этом пружину 2, происходит перемещение магнита 3 и выход на позицию постоянного взаимодействия с герконом 2Г.

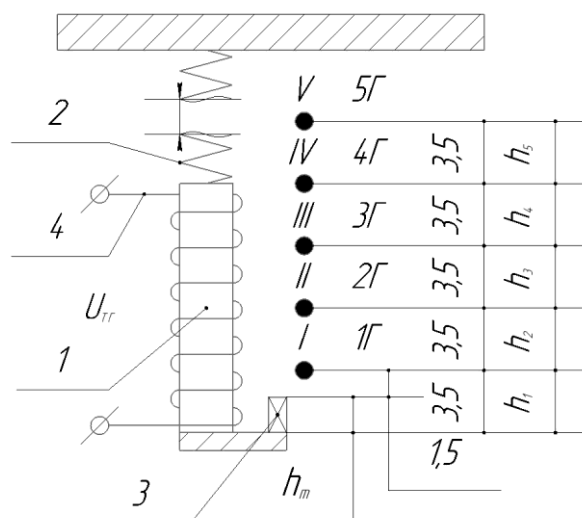


Рис. 4. Схема движения регулирующего постоянного магнита:

1 – сердечник соленоида; 2 – пружина; 3 – регулирующий постоянный магнит;
4 – обмотка электромагнитного соленоида; 1Г, 2Г, 3Г, 4Г, 5Г – герконы

В результате этого происходит устойчивое закрытие контакта 2ГК, подача напряжения на обмотку ПЭМ, включение контакта ПЭМ-6, который находится в цепи питания электромагнита ЭМ-II. На сердечнике соленоида закреплен регулирующий постоянный магнит 3, который при перемещении сердечника позиционируется в районе расположения геркона 1 до наступления момента включения второй передачи, (до набора скорости, превышающей скорость движения на первой передаче). При прохождении позиции первого геркона (рис. 4 и 5) и движении постоянного магнита в позиции взаимодействия с герконом 2Г осуществляется движение мобильной системы на второй передаче путем предварительного открытия контакта геркона 1ГК-1 с задержкой по времени, отсоединения питания обмотки IЭМ и соответственно закрытие контакта IЭМ-2. Электромагнит ЭМ-II под напряжением, включена 2-я передача. Включение обмотки ПЭМ приводит к разрыву цепи питания IЭМ за счет разрыва контакта ПЭМ-1, а отключение обмотки ШЭМ – за счет открытия контакта ПЭМ-3, отключение цепи питания IVЭМ – за счет открытия контакта ПЭМ-4 и отключения обмотки VЭМ за счет открытия контакта ПЭМ-5. Таким образом, включая 2-ю передачу, мы исключаем возможность включения остальных передач: 1, 3, 4 и 5-й, так как происходит отключение контактов ПЭМ-1, ПЭМ-3, ПЭМ-4, ПЭМ-5 цепи питания обмоток IЭМ, ШЭМ, IVЭМ и VЭМ, что исключает параллельное включение передач 1, 3, 4 и 5-й параллельно второй передаче.

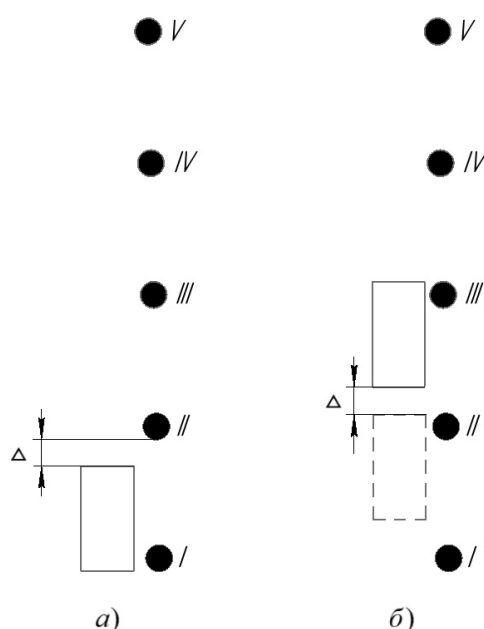


Рис. 5. Схема движения электромагнита между герконами

Расположение контактов-герконов исключает включение сразу двух муфт-шестерен (М-Ш):

$$h_m < h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h_5 . \quad (2)$$

Контакты 1ГК-1, 2ГК, 3ГК, 4ГК, 5ГК имеют задержку по времени на их отключение, а контакты IЭМ-6, IVЭМ-6, VЭМ-6 также имеют задержку по времени на отключение. Наличие данных контактов с задержкой на отключение, а также расположение герконов 2 относительно регулирующего магнита 3 исключают «ложное» срабатывание или частое переключение муфт-шестерен при переходе граничных положений регулирующего постоянного магнита (РПМ).

Регулярная замена трансмиссионного масла является залогом долговечной работы коробки перемены передач, то есть свежее масло не будет иметь продуктов износа в процессе перехода от жидкостного трения к граничному за счет локальных включений, при попадании которых происходит изнашивание зубьев шестерен, что положительно скажется на надежности автоматической коробки перемены передач.

Также, модернизируя в дальнейшем силовую трансмиссию, планируется внедрение искусственного интеллекта в работу данного механизма. Прототипом такой системы могла бы послужить система переключения передач Information and Communication Technology (ICT) Connected Shift System совместной разработки компаний Hyundai Motor Company и Kia Motors Corporation [11]. Она позволяет автомобилю переходить трансмиссии на оптимальную передачу, основываясь на информационных

данных о дорожной обстановке и плотности транспортного потока впереди. Система ICT Connected Shift System использует специальное интеллектуальное программное обеспечение блока управления трансмиссией TCU (Transmission Control Unit), которое собирает и обрабатывает в режиме реального времени информацию от обеспечивающих систем, в частности – камер и радара интеллектуального круиз-контроля, а также навигации, в памяти которой заложены высокоточные картографические маршруты. Навигационная система учитывает наличие спусков и подъемов, градиент дорожного полотна, профили поворотов, а также разнообразные дорожные ситуации, текущее состояние транспортного потока. Радарный датчик позволяет определить скорость и расстояние между автомобилем и другими участниками движения, а фронтальная камера обеспечивает информацию о дорожной разметке и полосах движения.

На основе этих данных TCU имеет возможность прогнозировать наиболее оптимальный сценарий смены передачи в режиме реального времени, при этом не прекращая движение. Эти сценарии строятся при помощи алгоритма, создаваемого искусственным интеллектом, и в соответствии с ними происходят переключения передач. К примеру, когда прогнозируется относительно продолжительное замедление, а радар определяет, что движущееся впереди транспортное средство не прибегает к резким изменениям скорости, возможно временное размыкание сцепления в трансмиссии и переход на движение накатом (на нейтральной передаче) для повышения топливной экономичности.

Выводы

Таким образом, специалистами и учеными РГУПС был разработан способ переключения передач для перспективной автоматической силовой трансмиссии, использующей в качестве своего усиленного звена – муфту-шестерню. Он основан на движении электромагнита, расположенного параллельно герконам, которые служат активаторами для замыкания ключей электроцепи в определенной последовательности. Электромагнит жестко закреплен на соленоиде, перемещающемся вверх и вниз в соответствии с ростом или уменьшением напряжения. Напряжение изменяется в большую или меньшую сторону за счет скорости вращения выходного вала двигателя, на котором установлен ротор тахогенератора. Подобная конструкция позволяет плавно менять передачи по мере движения транспортного средства, что обеспечивает высокий уровень комфорта в процессе вождения. Также предложенная схема проста в реализации и адаптации под различные виды наземного транспорта, начиная от легковых автомобилей, заканчивая путевыми машинами и специализированной техникой (бульдозерами, автогрейдерами, экскаваторами).

В результате выполнения комплекса научно-исследовательских и проектных работ был проработан вопрос по замещению импортных комплектующих, а именно механических и электронных компонентов, в области автоматизации силовых трансмиссий для мобильных технических систем (МТС). Данная задача была выполнена, опираясь на фундаментальные теоретические основы динамической анизотропии фрикционных связей [7–10], найдены пути решения целого ряда задач, позволивших создать проект конструкции автоматической коробки перемены передач (АКПП) с использованием компактных усилительных звеньев зеркальных обгонных муфт, которые интегрированы в шестерни. Благодаря такому решению значение коэффициента полезного действия (КПД) превосходит уровень КПД силовых трансмиссий ближайших зарубежных аналогов [2–6], в АКПП предусмотрены мероприятия, исключающие явления разрыва потока передаваемой мощности, а время включения передач снижено до минимума – $t_{\text{вкл.}}$ ($t < 0,1$), повышен уровень надежности за счет простоты конструкции, а также технико-экономические характеристики, которые можно противопоставить лучшим иностранным аналогам.

Разработанная специалистами РГУПС конструкция АКПП предназначена для мобильных технических систем легковых, спортивных и грузовых автомобилей, землеройно-транспортных машин, дорожно-строительной и специализированной техники.

Список литературы

1 Первая автоматическая коробка. История развития коробки передач // Историческая справка с технического сайта по устройству узлов и агрегатов автомобиля : сайт. – 2023. – URL: <https://tdiesel.ru/pervaya-avtomaticheskaya-korobka-istoriya-razvitiya-korobki-peredach.html> (дата обращения: 22.04.2023).

References

1 The first automatic transmission. The history of the development of the gearbox // Historical reference from the technical site on the components and assemblies of cars : [website]. – 2023. – URL: <https://tdiesel.ru/pervaya-avtomaticheskaya-korobka-istoriya-razvitiya-korobki-peredach.html> (date of access: 04/22/2023).

2 Product information. Product Lineup // Материалы официального сайта японского бренда Jatco – транснациональной японской компании, одного из крупнейших производителей автокомпонентов : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://www.jatco.co.jp/english/products/> (дата обращения: 22.04.2023).

3 Продукция для легковых автомобилей. Автоматические коробки передач // Материалы официального сайта технологического концерна мирового масштаба ZF, производящего трансмиссии и автокомпоненты : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://www.zf.com/> (дата обращения: 22.04.2023).

4 Автоматические силовые трансмиссии. Силовые агрегаты // Материалы официального сайта японской машиностроительной компании Aisin : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://www.aisin.com/en/product/mobility/powertrain/> (дата обращения: 22.04.2023).

5 **Петров, А. П.** Современные конструкции автоматических коробок передач : учебное пособие / А. П. Петров ; Курганский государственный университет. – Курган : Изд-во Курганского государственного университета, 2015. – 80 с. – ISBN 978-5-4217-0333-4.

6 **Харитонов, С. А.** Автоматические коробки передач : научная литература / С. А. Харитонов. – Москва : Астрель, 2003. – 335 с. – ISBN 5-17-017672-4.

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

8 **Патент № 2748933 Российская Федерация, МПК G01N 3/56** Динамический мониторинг узлов трения мобильных технических систем / В. И. Колесников, В. В. Шаповалов, И. В. Колесников [и др.] ; заявитель РГУПС. – № 2020111610А ; заявл. 03.19.2020 ; опубл. 01.06.2021, Бюл. № 16. – 10 с.

9 **Metal Plating of Friction Surfaces of the “Wheel–Rail” Pair** / V. V. Shapovalov, Yu. F. Migal, A. L. Ozyabkin, I. V. Kolesnikov, R. A. Kornienko, E. S. Novikov, E. E. Feyzov & P. V. Kharlamov // Journal of Friction and Wear. – V. 41, P. 338–346. – DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012034.

10 Tribological testing of MI-26T helicopter tail driver couplings : XV International Scientific-Technical Conference “Dynamic of Technical Systems” (DTS-2019) / V. V. Shapovalov, A. L. Ozyabkin,

2 Product information. Product line // Materials of the official website of the Japanese brand Jatco – a transnational Japanese company, one of the largest manufacturers of automotive components : official website. – 2023. – URL: <https://www.jatco.co.jp/english/products/> (date of access: 04/22/2023).

3 Products for cars. Automatic transmissions // Materials of the official website of the technological concern of the French scale ZF, which produces transmissions and auto components : official website. – 2023. – URL: <https://www.zf.com/> (date of access: 04/22/2023).

4 Automatic power transmissions. Power units // Materials of the official website of the Japanese engineering company Aisin : official website. – 2023. – URL: <https://www.aisin.com/en/product/mobility/powertrain/> (date of access: 04/22/2023).

5 **Petrov, A. P.** Modern designs of automatic transmissions: textbook / A. P. Petrov ; Kurgan State University. – Kurgan : Publishing House of Kurgan State University, 2015. – 80 p. – ISBN 978-5-4217-0333-4.

6 **Kharitonov, S. A.** Automatic transmissions : scientific literature / S. A. Kharitonov. – Moscow : Astrel, 2003. – 335 p. – ISBN 5-17-017672-4.

7 **Patent No. 2674899 Russian Federation, IPC F16D 65/00 (2006.01).** A way to improve the efficiency of friction systems / V. V. Shapovalov, M. M. Shestakov, R. A. Kornienko [et al.] ; applicant V. V. Shapovalov. – No. 2016128401 ; dec. 07.12.2016 ; publ. 12.13.2018, Bull. No. 35. – 20 p.

8 **Patent No. 2748933 Russian Federation, IPC G01N 3/56** Dynamic monitoring of nodes of mobile technical systems / V. I. Kolesnikov, V. V. Shapovalov, I. V. Kolesnikov [et al.] ; applicant RSTU. – No. 2020111610A ; dec. 03.19.2020 ; publ. 06.01.2021, Bull. No. 16. – 10 p.

9 **Metal Plating of Friction Surfaces of the “Wheel–Rail” Pair** / V. V. Shapovalov, Yu. F. Migal, A. L. Ozyabkin, I. V. Kolesnikov, R. A. Kornienko, E. S. Novikov, E. E. Feyzov & P. V. Kharlamov // Journal of Friction and Wear. – V. 41, P. 338–346. – DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012034.

10 Tribological testing of MI-26T helicopter tail driver couplings : XV International Scientific-Technical Conference “Dynamic of Technical Systems” (DTS-2019) / V. V. Shapovalov, A. L. Ozyabkin,

I. V. Kolesnikov, P. V. Kharlamov, V. B. Mischenko. – New York : AIP Conference Proceedings, 2019. – Volume 2188. – P. 020013–1...020013–10. – DOI 10.1063/1.5138387.

11 Hyundai и KIA разработали первую в мире систему переключения передач на основе технологий информации и связи – ICT Connected Shift System // Материалы официального сайта корейской автомобильной компании Kia : официальный сайт. – 2020. – URL: <https://www.kia.ru/press/news/81/> (дата обращения: 23.04.2023).

I. V. Kolesnikov, P. V. Kharlamov, V. B. Mischenko. – New York : AIP Conference Proceedings, 2019. – Volume 2188. – P. 020013–1...020013–10. – DOI 10.1063/1.5138387.

11 Hyundai and KIA have developed the first transmission shift system based on information and communication technologies – ICT Connected Shift System // Materials of the official website of the Korean automobile company Kia : official website. – 2020. – URL: <https://www.kia.ru/press/news/81/> (date of access: 04/22/2023).

V. V. Shapovalov, O. I. Kovalenko, I. A. Kolodyazhny, K. A. Kruchinin, A. L. Ozyabkin

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC POWER TRANSMISSION CONTROL ALGORITHM

Abstract. In this paper, a prospective power automatic transmission developed by RSTU scientists was considered. The design of this automatic transmission uses an original, unparallelled gear clutch, which is used as a friction reinforcement link. Due to the use of a gear-clutch, it was possible to increase the efficiency of the automatic transmission in view of the fact that there are practically no interruptions in the flow of transmitted power, thanks to which the gear shift speed has increased. Also, a transmission control algorithm was developed. Its operational principle is based on the movement of an electromagnet moving parallel to the reed switches, which are activators for closing the keys. The electromagnet is rigidly fixed to the solenoid, which moves up and down in accordance with the increase or decrease in voltage, which changes up or down due to the speed of rotation of the motor output shaft. The design of the transmission control circuit is simple in execution and has high reliability.

Keywords: transmission, gear clutch, control system, algorithm, contact, reed switch, electromagnet, reliability.

For citation: Development of an automatic power transmission control algorithm / V. V. Shapovalov, O. I. Kovalenko, I. A. Kolodyazhny [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 180–188. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_180.

Сведения об авторах

Шапвалов Владимир Владимирович
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Транспортные машины и
триботехника»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: tmt@rgups.ru

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

Information about the authors

Shapovalov Vladimir Vladimirovich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Vehicles and Tribotechnics»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: tmt@rgups.ru

Kovalenko Oleg Igorevich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Vehicles and Tribotechnics»,
Postgraduate Student,
e-mail: olegkovalenko2000@mail.ru

Колодяжный Илья Алексеевич

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

Кручинин Кирилл Антонович

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

Озябкин Андрей Львович

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

Kolodyazhny Ilya Alekseevich

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

Kruchinin Kirill Antonovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Vehicles and Tribotechnology»,
Postgraduate Student,
e-mail: Krutchinin.Kirill@yandex.ru

Ozyabkin Andrey Lvovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Transport Vehicles and Tribotechnology»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Associate Professor,
e-mail: ozyabkin@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.2.003 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_189

*И. С. Абдуллаев***КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Аннотация. Рассмотрен вопрос оптимизации параметров проектирования объектов инфраструктуры. Проанализированы возможные признаки, по которым можно сгруппировать отдельные участки и направления железных дорог в кластеры, определены наиболее приоритетные из них применительно к вопросу проектирования. Исходя из задач, которые должны решать кластеры внутри полигонов, а также ряда принципов, сформулированных для выделения кластеров из полигонов железных дорог, предложен новый подход, который позволит синхронизировать процесс проектирования с перевозочным процессом. Кластеризация позволит повысить эффективность вложения финансов в развитие железнодорожной инфраструктуры и создать предпосылки для автоматизации процесса формирования набора технических и технологических параметров объектов.

Ключевые слова: железнодорожный кластер, алгоритм выбора параметров развития сети железных дорог, повышение эффективности развития инфраструктуры, полигонное проектирование.

Для цитирования: Абдуллаев, И. С. Кластеризация сети железных дорог как инструмент оптимизации параметров проектирования объектов инфраструктуры / И. С. Абдуллаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 189–196. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_189.

Введение

Железнодорожный транспорт в России – это один из крупнейших железнодорожных комплексов в мире с общей протяженностью эксплуатационной длины путей свыше 122 тыс. км. По состоянию на 2019 год железные дороги имеются в 80 из 85 регионов России от Калининграда до Сахалина, а это целых 9 часовых поясов. Для повышения управляемости транспортным комплексом вся железнодорожная сеть разделена на отдельные железные дороги, границы которых проходят, как правило, по границам субъектов Российской Федерации. Это позволяет повысить эффективность взаимодействия руководителей железных дорог с главами субъектов РФ и решать ряд общехозяйственных задач на местном уровне.

В то же время каждая железная дорога – это отдельный филиал ОАО «РЖД» со своими эксплуатационными и экономическими показателями, а также политикой руководителей железных дорог по их выполнению на местах. Не всегда политика на местах, особенно на стыках железных дорог, направлена на выполнение единого «сквозного» технологического процесса и повышение эффективности работы всего железнодорожного транспорта. Поэтому для повышения производительности локомотивного комплекса, оптимизации технологических потерь от предоставления «окон» для ремонта инфраструктуры, улучшения эксплуатационных показателей сети железных дорог и реализации федеральных задач по модернизации инфраструктуры для вывоза экспортных грузов из центра России в порты и погранпереходы были выделены полигоны железных дорог [2, 3].

Параметры проектирования новых и реконструируемых объектов инфраструктуры при этом должны быть достаточными для обеспечения потребностей перспективной технологии работы участков, направлений и полигонов железных дорог, но не быть избыточными. Это сложно контролируемая задача, так как она далеко не всегда решается в границах одной железной дороги, а в границах целого полигона набор параметров проектирования должен меняться в зависимости от специфики поставленных перед ним задач. Как следствие, объекты одного направления могут иметь разные проектные скорости движения, подходы к развитию станций и системы централизации и блокировки, обеспечивающие межпоездной интервал. Безусловно, эти факты единичные, так как при проектировании объектов

одного инвестиционного проекта в одни и те же годы реализации логика «сквозного» технологического процесса прослеживается всеми участками инвестиционной деятельности. Однако, учитывая большое количество проектных институтов, сменяемость непосредственных исполнителей подразделений, работающих с предпроектной документацией, различные годы реализации объектов и огромное их разнообразие, риски появления не синхронизированных между собой параметров проектирования объектов на схожих по каким-либо условиям участках инфраструктуры довольно велики [1, 4].

Основная часть

Решением проблемы может стать условное выделение из полигонов кластеров. Кластер – это объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определенными свойствами. Значит, для формирования кластеров необходимо понимать признаки однородности.

Анализ возможных признаков, по которым можно сгруппировать отдельные участки и направления в кластеры, показал, что их может быть большое количество:

- единая технология (пропуск транзитного грузопотока, преимущественные пассажирские, высокоскоростные или контейнерные перевозки, массовая погрузка, экспорт, внутригородские перевозки и т.д.);
- участки зарождения и погашения массового пассажиропотока;
- точки зарождения или погашения грузов;
- общие показатели (эксплуатационные, технические, инфраструктурные и т.д.);
- единые климатические условия;
- идентичные топографические условия;
- общие ценовые параметры, формирующие стоимость объектов;
- социально-экономические особенности (перспективная ветка на Магадан, проекты продления диаметров МЖД до границ Московской области);
- различные формы собственности (отдельные железнодорожные ветки ООО «ЭльгаУголь», ООО «СШХ»);
- особенности размещения (остров Сахалин, Калининградская железная дорога);
- применение особых инновационных или экспериментальных методов организации движения поездов или управления на транспорте (интервальное регулирование движения поездов с применением «виртуальной» сцепки, высокоскоростное движение по выделенной инфраструктуре);
- стратегические особенности (проекты развития Арктической зоны, строительство моста на остров Сахалин);
- политические особенности (строительство железнодорожной ветки Журавка – Миллерово в обход территории Украины, строительство мостового перехода в Крым);
- очень крупные железнодорожные узлы (Московский, Санкт-Петербургский);
- единый полигон развития инфраструктуры для мультимодальных перевозок;
- взаимодействие с сопредельными государствами (железнодорожные пограничные переходы, морские порты);
- железнодорожные подходы к крупным промышленным предприятиям;
- особенности плана формирования поездов;
- особенности графика движения поездов;
- общие проблемы различного характера (природоохранная зона, плотность городской застройки, экологические особенности, отчуждение территорий под строительство железнодорожной инфраструктуры и т.п.).

Наиболее приоритетные признаки должны определяться, исходя из поставленной перед кластером задачи. Так, например, применительно к задаче оптимизации параметров проектирования объектов железнодорожной инфраструктуры из 20 приведенных признаков определяющими будут являться технологический, топографический, климатический и географический.

Исходя из вышеуказанного, можно дать определение кластера применительно к железнодорожному транспорту. Кластер – это часть полигона железной дороги, состоящая из множества объектов инфраструктуры, объединенных общими технологическими, климатическими, топографическими, географическими и другими признаками, предназначенная для решения уникальных задач по достижению общей цели работы полигона. При этом целью работы полигона является достижение экономических и технологических показателей, поставленных Правительством Российской Федерации.

Каким же образом выделение кластеров из полигонов железных дорог по тем или иным признакам могут оказать положительное влияние на работу железнодорожного транспорта? Параметры проектирования должны полностью соответствовать перспективным технологическим потребностям кластера и быть идентичными (синхронизированными) на всем его протяжении для реализации «бесшовной» работы всего направления, узла или участка. А перспективная технология работы кластера должна отвечать требованиям государственных и корпоративных задач. Таким образом, определение оптимальных параметров объектов проектирования железнодорожной инфраструктуры и контроль их согласованности между собой через выделение кластеров из полигонов может повысить эффективность решения поставленных перед железнодорожным транспортом задач без перерасхода на необоснованное развитие.

Важно отметить, что задачи должны ставиться не только перед полигоном, но и перед каждым кластером, так как в противном случае развитие инфраструктуры может либо не отвечать всем требованиям, предъявляемым к железнодорожному транспорту, либо носить избыточный характер. Так, в Юго-Западный полигон входит как грузовое транзитное направление от Волгограда до портов Таманского полуострова, так и перспективное скоростное пассажирское направление Центр – Юг. Очевидно, что задачи, поставленные перед данными кластерами внутри одного полигона, совершенно разные, соответственно, перспективная технология и набор параметров для проектирования объектов инфраструктуры данных направлений должны быть направлены на решение уникальных задач. Приведем пример таких задач, которые должны решать кластеры внутри полигона.

1 Обеспечение перевозки пассажиров. Эффектами решения данной задачи будут являться: рост ВВП, объединение субъектов РФ, различных экономических зон, поднятие престижа страны, удовлетворение потребностей населения.

2 Обеспечение плана погрузки или выгрузки. Эффекты: формирование экономической базы, предоставление рабочих мест, пополнение бюджета региона и страны, поддержка бизнеса и градообразующих предприятий, развитие субъекта РФ.

3 Обеспечение транзитных перевозок. Эффекты: выполнение народно-хозяйственных задач, выполнение внешних экономических и политических обязательств по экспорту и импорту, предоставление услуг инфраструктуры для транзита через РФ другим странам, конкурентная борьба с другими видами транспорта, удовлетворение спроса на перевозки грузоотправителей, грузополучателей и операторов подвижного состава.

4 Обеспечение стратегических задач. Эффекты: выполнение плана воинских перевозок, специальных перевозок, освоение новых территорий, повышение эффективности взаимодействия с другими государствами, создание стратегических преимуществ на перспективу, укрепление государственных границ и территориальной целостности.

5 Обеспечение внутригородских перевозок. Эффекты: обеспечение жизнедеятельности города, удовлетворение потребностей пассажира (населения) и бизнеса (грузоотправителей), повышение качества (сервис, экология, логистика) предоставления услуг и развитие мультимодальных перевозок.

При определении кластеров следует придерживаться следующих рекомендаций и принципов:

1) основной приоритет – характер выполняемой или планируемой работы и принцип единой технологии. Границы кластеров определяются, исходя из технологии, и должны проходить по техническим (участковым, сортировочным, грузовым или пассажирским) станциям, при этом они могут не совпадать с границами железных дорог;

2) для выбора общих признаков и задач кластеров наиболее эффективно использовать метод экспертных оценок с привлечением специалистов разного профиля;

3) при использовании нескольких кластеров для пропуска единого вагонопотока должны применяться единые подходы и методы проектирования. Для этого целесообразно привлекать один проектный институт, наиболее подходящий по компетенциям для работы с конкретным кластером;

4) для каждого выбранного кластера должны быть определены свои технические и технологические параметры, задачи и перспективы развития, которые будут способствовать достижению общей цели полигона сети железных дорог.

Используя данные принципы и четыре признака (технологический, топографический, климатический и географический), всю сеть железных дорог можно представить в виде 37 кластеров с привязкой к четырем полигонам с определением основных технических и технологических параметров

(норма массы, норма длины, скорости движения поездов, межпоездные интервалы) для проектирования объектов железнодорожной инфраструктуры (таблица).

Применение кластеров для формирования параметров проектирования объектов

№	Наименование кластера	Технология работы	Топография	Климат	Расположение	Норма массы, тонн			Норма длины, м			Скорости движения груз./пасс., км/ч			Межпоезд. интервал, мин			
						6000	6300 - 7100	>7100	850	1050	1500	90/120	90/140	>140	10	8	≤6	
1	Сахалин	местная работа	побережье	прохладный	островное													
				влажный														
2	Хабаровск - Находка	экспорт	равнина	влажный	приграничное													
			горы															природо-охранная зона
			побережье															
3	Комсомольск-Сортировочный - Ванино	экспорт	горы	холодный	внутри страны													
			побережье	влажный														
4	Тайшет - Хабаровск	пасс/конт	равнина	прохладный	внутри страны													
		транзит	горы	сухой														природо-охранная зона
5	Тында - Комсомольск-Сортировочный	транзит	равнина	холодный	внутри страны													
			горы															
			мерзлота															
6	Тайшет - Тында	транзит	равнина	холодный	внутри страны													
			горы															
7	Мариинск - Тайшет	пасс/конт	равнина	прохладный	внутри страны													
		транзит																
8	Междуреченск - Тайшет	транзит	равнина	прохладный	внутри страны													
		погрузка	горы															
9	Мариинск / Междуреченск - Входная	погрузка	равнина	прохладный	внутри страны													
		местная работа		сухой														
		транзит																
10	Новосибирск - Кемерово - Томск	пасс/конт	равнина	прохладный	внутри страны													
		транзит		сухой														

Окончание табл.

27	Санкт-Петербург ЖУ (между СВО и ЮЗО, Лигово - Ораниенбаум)	внутригород ское	равнина	умеренный	внутри страны															
		пасс/конт	побережье			природо- охранная зона														
		местная работа																		
28	Санкт-Петербург ЖУ – Псков / Новгород / Выборг	пасс/конт	равнина	умеренный	внутри страны															
		местная работа				приграничное														
29	Волховстрой - Петрозаводск - Беломорск	транзит	равнина	прохладный	внутри страны															
		пасс/конт	болото																	
30	Беломорск - Мурманск	погрузка	болото	холодный	внутри страны															
		экспорт	мерзлота																	
		местная работа																		
31	Калининградская ж.д.	экспорт	равнина	умеренный	островное															
		пасс/конт				приграничное														
32	Челябинск - Уфа - Самара - Саратов - Волгоград	транзит	равнина	умеренный	внутри страны															
		экспорт																		
33	Челябинск - Оренбург - Сенная - Саратов	транзит	равнина	умеренный	приграничное															
		экспорт	горы																	
34	Волгоград – Тамань / Астрахань	экспорт	равнина	жаркий	внутри страны															
35	Ростов-на-Дону - Самур	транзит	горы	жаркий	приграничное															
		пасс/конт	побережье			природо- охранная зона														
		экспорт																		
36	Москва - Ожерелье - Елец - Воронеж - Ростов- на-Дону - Адлер	пасс/конт	равнина	умеренный	внутри страны															
		транзит	побережье	жаркий		природо- охранная зона														
37	БМО - Рыбное - Кочетовка - Ртищево - Саратов	транзит	равнина	умеренный	внутри страны															
	Восточный полигон																			
	Центральный полигон																			
	Северо-Западный полигон																			
	Юго-Западный полигон																			

Выводы

Таким образом, представление сети железных дорог в виде кластеров дает ряд дополнительных возможностей для повышения эффективности в вопросах проектирования:

- 1) исключить избыточное развитие инфраструктуры;
- 2) обосновать применение тех или иных технических и технологических мероприятий;
- 3) повысить качество контроля процесса проектирования путем закрепления одного проектного института за одним кластером;
- 4) продолжить развитие инструмента «Инфобазы» [5] в части выделения кластеров и привязки стоимостных параметров для оценки проектов методом «полигонного проектирования» [1, 4–8];
- 5) автоматизировать процесс формирования задания на проектирование новых или реконструируемых объектов, сразу закладывая в него технологические и технические параметры, характерные для конкретного кластера.

Список литературы

- 1 **Абдуллаев, И. С.** Подходы технологического интегратора при выборе параметров реализации объектов на предпроектной стадии / И. С. Абдуллаев // Транспорт Урала. – 2023. – № 1. – С. 3–7. – ISSN 1815-9400.
- 2 **Власенский, А. А.** Новая структура управления тяговыми ресурсами / А. А. Власенский // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 3. – С. 30–35. – ISSN 0044-4448.
- 3 Технологический процесс работы центра управления перевозками восточного полигона (ЦУП ВП) / В. Л. Зобнин, А. Т. Осминин, Е. А. Сотников, М. А. Осминин // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2017. – № 76(3). – С. 146–152. – ISSN 2223-9731.
- 4 **Абдуллаев, И. С.** Оценка экономических показателей на основании средних удельных стоимостей / И. С. Абдуллаев, Э. А. Чумарин // Экономика железных дорог. – 2023. – № 3. – С. 19–24. – ISSN 1727-6500.
- 5 **Абдуллаев, И. С.** Инструментарий перехода от локального развития инфраструктуры объектов железнодорожного транспорта к полигонному подходу в проектировании / И. С. Абдуллаев, Н. И. Лукин // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 3. – С. 50–54. – ISSN 2074-9325.
- 6 **Абдуллаев, И. С.** Оценка эффективности развития инфраструктуры на долгосрочную перспективу / И. С. Абдуллаев, В. Г. Саргсян // Экономика железных дорог. – 2022. – № 9. – С. 63–69. – ISSN 1727-6500.
- 7 **Абдуллаев, И. С.** Алгоритм расчета оптимального развития инфраструктуры участка / И. С. Абдуллаев, В. Г. Саргсян // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 4. – С. 55–60. – ISSN 2074-9325.

References

- 1 **Abdullaev, I. S.** Approaches of a technological integrator when choosing parameters for the implementation of objects at the pre-project stage / I. S. Abdullaev // Transport of the Urals. – 2023. – No. 1. – P. 3–7. – ISSN 1815-9400.
- 2 **Vlasensky, A. A.** New structure of traction resources management / A. A. Vlasensky // Rail transport. – 2014. – No. 3. – P. 30–35. – ISSN 0044-4448.
- 3 Technological process of operation of the transportation control center of the Eastern polygon (MCC VP) / V. L. Zobnin, A. T. Osminin, E. A. Sotnikov, M. A. Osminin // Bulletin of the Research Institute of Railway Transport (Bulletin of VNIIZHT). – 2017. – No. 76(3). – P. 146–152. – ISSN 2223-9731.
- 4 **Abdullaev, I. S.** Assessment of economic indicators based on average unit values / I. S. Abdullaev, E. A. Chumarin // Economics of Railways. – 2023. – No. 3. – P. 19–24. – ISSN 1727-6500.
- 5 **Abdullaev, I. S.** Instrumentality of transition from local development of infrastructure of railway transport facilities to a polygon approach in design / I. S. Abdullaev, N. I. Lukin // Science and Technology of transport. – 2022. – No. 3. – P. 50–54. – ISSN 2074-9325.
- 6 **Abdullaev, I. S.** Evaluation of the effectiveness of infrastructure development for the long term / I. S. Abdullaev, V. G. Sargsyan // Economics of Railways. – 2022. – No. 9. – P. 63–69. – ISSN 1727-6500.
- 7 **Abdullaev, I. S.** Algorithm for calculating the optimal development of the infrastructure of the site / I. S. Abdullaev, V. G. Sargsyan // Science and Technology of transport. – 2022. – No. 4. – P. 55–60. – ISSN 2074-9325.

8 **Романова, А. Т.** Региональная экономическая эффективность внедрения мероприятий по увеличению пропускной способности пассажирских станций / А. Т. Романова, И. С. Абдуллаев // Транспортное дело России. – 2016. – № 2. – С. 208–211. – ISSN 2072-8689.

8 **Romanova, A. T.** Regional economic efficiency of the implementation of measures to increase the capacity of passenger stations / A. T. Romanova, I. S. Abdullaev // Transport business of Russia. – 2016. – No. 2. – P. 208–211. – ISSN 2072-8689.

I. S. Abdullaev

RAILWAY NETWORK CLUSTERING AS A TOOL FOR OPTIMIZING DESIGN PARAMETERS OF THE INFRASTRUCTURE OBJECTS

Abstract. The issue of optimizing the design parameters of infrastructure facilities is considered. Possible signs are analyzed, according to which it is possible to group individual sections and directions of railways into clusters, the most priority of them in relation to the design issue are identified. Based on the tasks that clusters within polygons should solve, as well as a number of principles formulated for the selection of clusters from railway polygons, a new approach is proposed that will allow synchronizing the design process with the transportation process. Clustering will improve the efficiency of financial investments in the development of railway infrastructure and create prerequisites for automating the process of forming a set of technical and technological parameters of facilities.

Keywords: railway cluster, algorithm for selecting parameters for the development of the railway network, improving the efficiency of infrastructure development, polygon design.

For citation: Abdullaev, I. S. Railway network clustering as a tool for optimizing design parameters of the infrastructure objects / I. S. Abdullaev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 189–196. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_189.

Сведения об авторе

Абдуллаев Ильдар Салимович

заместитель начальника управления комплексной экспертизы проектов ОАО «РЖД», кандидат технических наук, e-mail: abilsa84@gmail.com

Information about the author

Abdullaev Idar Salimovich

Deputy Head of the Department of Integrated Project Expertise of JSC "Russian Railways", Candidate of Engineering Sciences, e-mail: abilsa84@gmail.com

В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко, О. А. Ворон, И. Д. Долгий

АНАЛИЗ И МЕРЫ ПО СОКРАЩЕНИЮ ОБОРОТА ВАГОНА НА СЕВЕРО-КАВКАЗСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Аннотация. Выполнен анализ оборота вагона в условиях государственного управления вагонным парком и рыночной экономики. Установлено, что в условиях советской экономики оборот вагона в действительности в большей степени характеризовал эффективность его использования и за его выполнением осуществлялся постоянный контроль. В рыночных условиях, когда весь вагонный парк находится в собственности множества компаний – операторов подвижного состава, оптимизация оборота вагона не отражается на доходности операторов от перевозок грузов, и, соответственно, по их мнению, не следует уделять должного внимания его ускорению. Отсюда следует вывод, что в условиях большого количества собственников подвижного состава оборот вагона перестал быть основным показателем качества эксплуатационной работы железных дорог. Как следствие, происходит рост встречного порожнего пробега, увеличение оборота вагона и локомотива, что ведет к дополнительным затратам ОАО «РЖД», вызывает потребность увеличения поездных локомотивов и бригад, усиления инфраструктуры из-за задержки большого количества поездов и др. Предложены меры по ускорению оборота вагона и повышению эффективности эксплуатационной работы транспорта.

Ключевые слова: собственники вагонного парка, оборот общего вагона, разновидности оборота вагона, эффективность использования вагонного парка, меры по сокращению оборота вагона, экономическая оценка ускорения оборота.

Для цитирования: Зубков, В. Н. Анализ и меры по сокращению оборота вагона на Северо-Кавказской железной дороге / В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко, О. А. Ворон, И. Д. Долгий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 197–205. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_197.

Введение

В условиях, когда весь грузовой вагонный парк находился в государственной собственности, оборот вагона был важнейшим качественным показателем работы железнодорожного транспорта и за его выполнением осуществлялся постоянный контроль. Например, когда в 1935 году ухудшилось использование подвижного состава вследствие завышения нормы оборота вагона, тогдашний нарком путей сообщения Л. М. Каганович издал приказ № 100/Ц 15 апреля 1935 г. об ускорении оборота вагона. В этом историческом приказе народный комиссар поставил перед железнодорожниками задачу о проведении анализа причин завышения оборота вагона и необходимых исследований, на основе которых были разработаны меры его сокращения. Это наглядный пример того, что в условиях советской экономики оборот вагона в действительности в большей степени характеризовал эффективность его использования, поскольку у железнодорожников цель и действия по её реализации были едины.

После перехода к рыночной экономике, когда весь вагонный парк оказался в собственности множества компаний – операторов подвижного состава, также произошло увеличение оборота вагона. Однако в связи с тем, что оптимизация оборота вагона не отражается на доходности операторов от перевозок грузов, то, соответственно, по их мнению, не следует уделять должного внимания его ускорению [1]. Основной задачей собственников вагонов стало получение от их использования как можно больших доходов. Кроме того, поиск операторами высокодоходных грузов приводит к увеличению простоев их вагонов на путях общего пользования в ожидании заадресовки выгодных грузов, появлению дефицита железнодорожной инфраструктуры. Дальность заадресовки собственниками своих порожних вагонов в этом случае также не имеет ограничений. Отсюда следует вывод, что в рыночных условиях оборот вагона, при большом количестве собственников подвижного состава, перестал быть основным показателем качества эксплуатационной работы железных дорог [2, 3]. Это приводит к росту встречного порожнего пробега, увеличению оборотов вагона и локомотива, к дополнительным затратам ОАО «РЖД», вызывает потребность увеличения поездных локомотивов и бригад, ведет к необходимости усиления инфраструктуры и др.

В свою очередь грузоотправители, преследуя свою выгоду, тоже допускают неравномерность отгрузки грузов, что приводит к неравномерному подводу их к станциям назначения, а грузополучатели своевременно не обеспечивают выгрузку или перевалку грузов в портах из-за недостатка складских емкостей и судов, неблагоприятных погодных условий. Все это ведет к ухудшению использования подвижного состава и требует большего внимания к соблюдению норм оборота вагона всеми участниками перевозочного процесса, в том числе перечисленными выше. Исходя из этих требований проведен анализ оборота вагона, разработаны меры по его выполнению. Как известно, общий оборот грузового вагона включает время от момента окончания одной его погрузки до момента окончания следующей погрузки. Он определяется и нормируется не только для общего рабочего парка сети, но и для разновидностей вагонных парков по характеру работы: местных, транзитных или порожних вагонов. В связи с этим ответственность за выполнение общего оборота рабочего парка вагонов должна возлагаться как на перевозчика, так и на оператора вагонного парка, грузоотправителя и грузополучателя.

Основная часть

Однако в рыночных условиях, когда вагон является собственностью коммерческих компаний, использование вагона стало частным делом, его задержка может быть выгодна собственнику, но перевозчика это не устраивает, он несет большие эксплуатационные потери. По нашему мнению, должны устанавливаться нормы времени на простои вагона, связанные с грузовыми операциями, и система стимулов, состоящая из различных штрафов и дополнительных плат за эффективное использование вагона. Эта система должна позволять своевременно получать информацию о том, по какой причине и по чьей вине не выполнены норма простоя и своевременное отправление вагона. Каждый участник перевозочного процесса должен нести ответственность за обеспечение бесперебойной перевозочной деятельности, эффективное использование подвижного состава и железнодорожной инфраструктуры [4].

При определении факторов, влияющих на общий оборот грузового вагона, используется трехчленная формула, которая учитывает время движения вагонов и их нахождения на технических и грузовых станциях:

$$\Theta = \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{l_{\text{п}}}{V_{\text{уч}}} + \frac{l_{\text{п}}}{L_{\text{в}}} \cdot t_{\text{тех}} + k_{\text{м}} \cdot t_{\text{пр гр}} \right), \text{ сут}, \quad (1)$$

где $l_{\text{п}}$ – полный рейс вагона, км;
 $V_{\text{уч}}$ – участковая скорость на дороге, км/ч;
 $L_{\text{в}}$ – вагонное плечо, км;
 $t_{\text{тех}}$ – простой транзитного вагона на технической станции, ч;
 $k_{\text{м}}$ – коэффициент местной работы;
 $t_{\text{пр гр}}$ – простой под одной грузовой операцией, ч.

В этой формуле два первых элемента: время вагона в движении $l_{\text{п}}/V_{\text{уч}}$ и его нахождение на технических станциях $(l_{\text{п}}/L_{\text{в}}) \cdot t_{\text{тех}}$, – в зоне ответственности ОАО «РЖД», а третий элемент – время нахождения на грузовых станциях $k_{\text{м}} \cdot t_{\text{пр гр}}$ – в сфере ответственности грузовладельцев.

За последние три года оборот вагона растет: $\Theta_{2020} = 9,56$ сут., $\Theta_{2021} = 9,79$ сут., $\Theta_{2022} = 10,15$ сут., при этом наибольшее время в обороте вагона наблюдается в третьем элементе, на станциях:

$$\begin{aligned} \Theta_{2020} &= \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{960,2}{36,1} + \frac{960,2}{136,58} \cdot 11,3 + 1,21 \cdot 101,741 \right) = \\ &= \frac{1}{24} \cdot (26,6 + 79,26 + 123,1) = 9,56 \text{ сут.}; \\ \Theta_{2021} &= \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{982,6}{35,8} + \frac{982,6}{149,3} \cdot 14,5 + 1,173 \cdot 95,45 \right) = \\ &= \frac{1}{24} \cdot (27,4 + 95,46 + 112) = 9,79 \text{ сут.}; \\ \Theta_{2022} &= \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{995,4}{33,8} + \frac{995,4}{157,9} \cdot 15,24 + 1,154 \cdot 102,23 \right) = \\ &= \frac{1}{24} \cdot (29,4 + 96,1 + 118) = 10,15 \text{ сут.} \end{aligned}$$

Выполненный анализ оборота вагона за последние пять лет показал его рост, из-за чего увеличился рабочий парк вагонов (рис. 1), практически по всем его элементам произошло завышение, что значительно ухудшило эксплуатационное положение на дороге, в том числе вызвало снижение участковой скорости на 1,8 км/ч, производительности локомотивов на 0,7 %, простой вагонов.

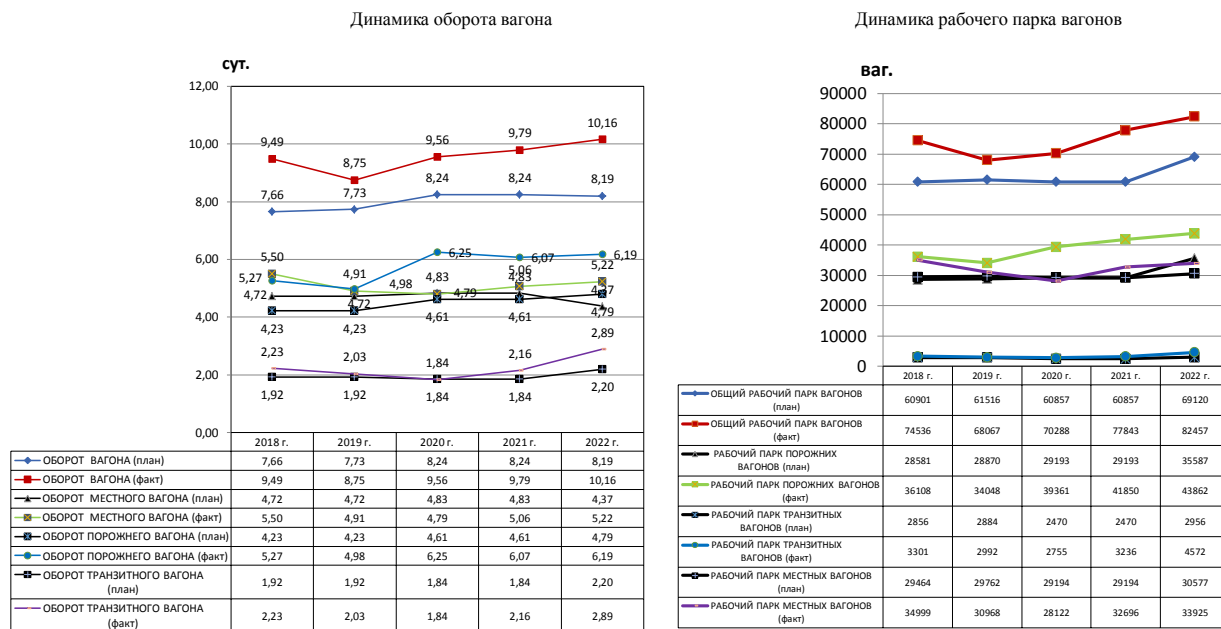


Рис. 1. Анализ полного оборота вагона и рабочего парка за последние 5 лет

Для ускорения оборота вагона в движении необходимо увеличить участковую скорость поездов, так как её повышение является наиболее эффективным способом дальнейшей интенсификации перевозочного процесса. Анализом установлено, что факторами, снижающими величину участковой скорости, являются отсутствие должной прочности и устойчивости железнодорожного пути, недостаточная мощность локомотивного парка, ограниченная скорость грузовых поездов, внеплановые стоянки грузовых поездов на промежуточных станциях в большом количестве, влияние человеческого фактора. К снижению участковой скорости приводит несоблюдение перегонного времени хода локомотивными бригадами грузовых поездов, наличие ограничений скорости их движения, проведение плановых ремонтно-строительных работ на СКЖД и соседних дорогах. Проблема заключается в несогласованности вариантных графиков пропуска поездов на смежных дорогах и передачи их по стыкам.

Избыток парка порожних вагонов затрудняет перевозки грузов и, как следствие, увеличивает их простой, дополнительно занимает пути станций дороги, ограничивая их пропускную способность, что приводит к увеличению количества отставленных поездов до 250 единиц в среднем за сутки. Учитывая, что на СКЖД около 70 % грузовых перевозок осуществляется в адрес портов Азово-Черноморского бассейна, это значительно влияет на выполнение оборота вагона. Поэтому требуется больше уделять развитию припортовых станций и прежде всего станции Новороссийск, которая становится все более востребованной для перевалки важнейших грузов, в том числе контейнеров и зерна. В 2022 году общий объем перевалки грузов предприятиями, обслуживаемыми припортовой станцией, суммарно составил 31,2 млн т. При этом перерабатывающие мощности предприятий рассчитаны на ежегодную переработку 68,5 млн т, а в перспективе они могут возрасти до 86,7 млн т.

Однако проект развития станции Новороссийск, который предусматривает строительство парка Б с 13 приемоотправочными путями параллельно парку А, реконструкцию нечетной горловины парка Восточный, дополнительных ходовых путей до станции Гайдук, реализуется низкими темпами, что требует ускорения выполнения проекта.

Для сокращения времени оборота вагона, его пробега в порожнем состоянии от станции выгрузки до станции погрузки требуется увеличить количество сдвоенных операций на станциях выгрузки. Кроме

того, формирование длинносоставных и соединенных поездов из порожних вагонов, позволяет сократить число грузовых поездов с ограничением скорости из-за наличия в составе таких вагонов [5, 6].

На основе результатов анализа рабочего парка на дороге было выявлено, что рост оборота вагона приводит к увеличению рабочего парка вагонов (рис. 2).

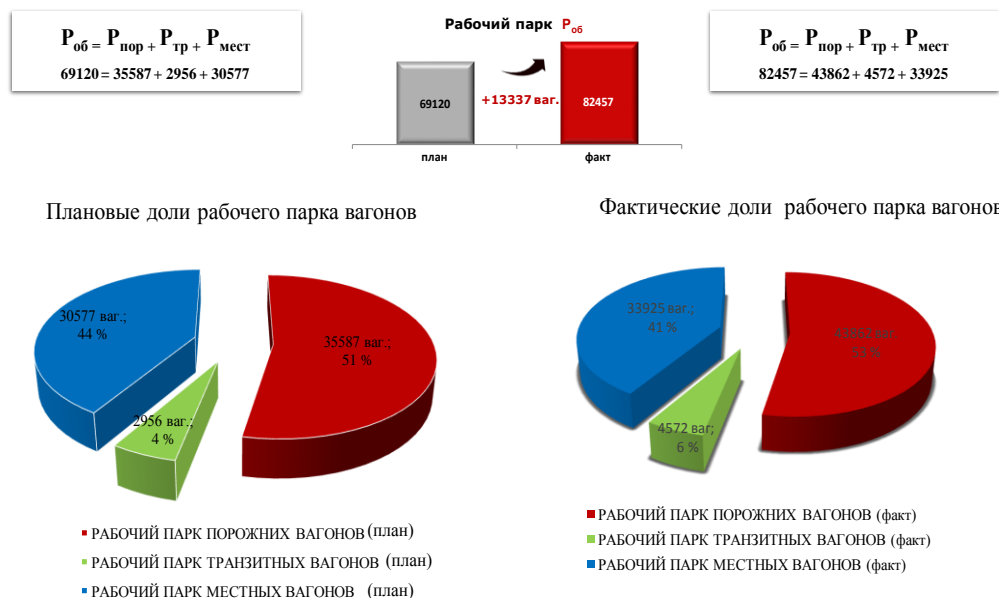


Рис. 2. Анализ рабочего парка вагонов

Из данного рисунка видно, что завышены рабочие парки порожних и транзитных вагонов. В связи с этим выполнен анализ оборота порожнего и транзитного вагонов (рис. 3, 4).

Как известно, оборот порожнего вагона определяется по формуле:

$$\Theta_{пор} = \frac{P_{пор}}{U_{п} + U_{сд пор}}, \text{ сут.}, \quad (2)$$

где $P_{пор}$ – наличие порожних вагонов рабочего парка на дороге;

$U_{п}$ – количество вагонов, погруженных на дороге;

$U_{сд пор}$ – сдача порожних вагонов на другую дорогу.

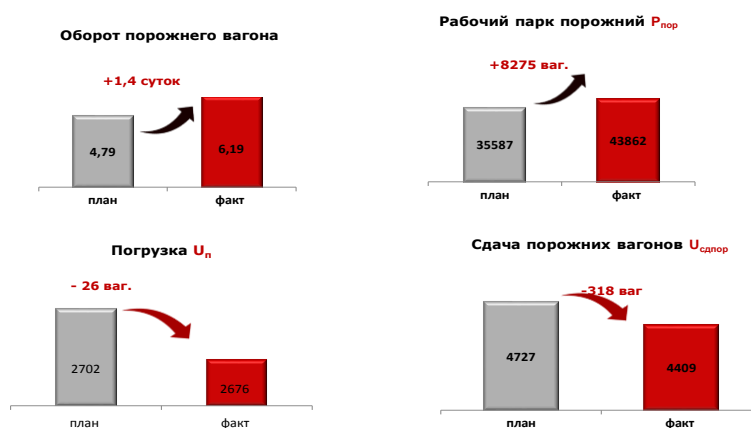


Рис. 3. Анализ оборота порожнего вагона и его влияние на рабочие парки



Рис. 4. Анализ оборота транзитного вагона и его влияние на рабочий парк и сдачу вагонов

Оборот транзитного вагона можно определить по формуле:

$$\Theta_{тр} = \frac{P_{тр}}{U_{сд гр}}, \text{сут.}, \quad (3)$$

где $P_{тр}$ – наличие парка транзитных вагонов на дороге;
 $U_{сд гр}$ – сдача груженых вагонов на другую дорогу.

На основе выполненного анализа общего оборота вагона разработаны меры его сокращения по категориям, которые приведены на рис. 5.

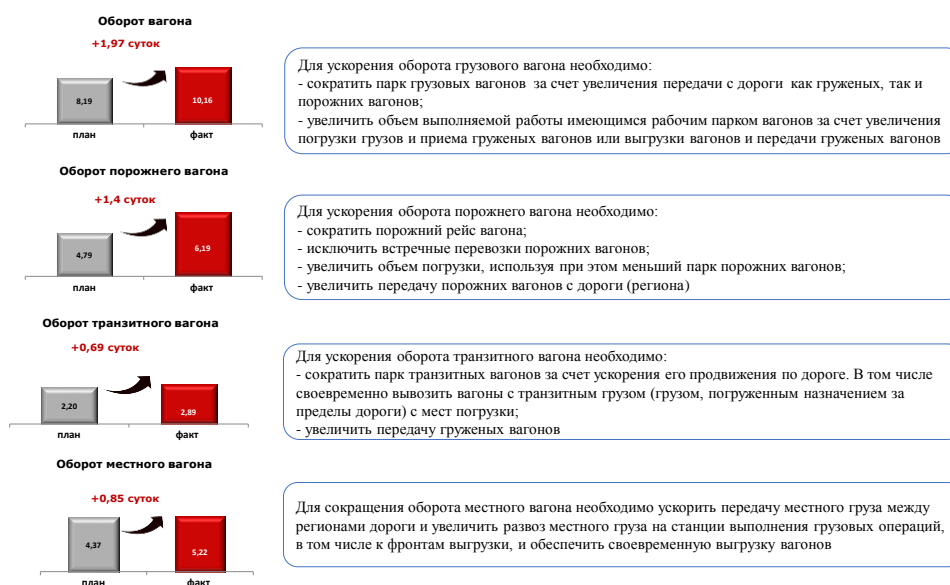


Рис. 5. Меры по сокращению оборота вагона по его категориям

В целях уменьшения общего оборота вагона на СКЖД Северо-Кавказской дирекцией управления движением (Д) совместно с Северо-Кавказским территориальным центром фирменного транспортного обслуживания (ТЦФТО) и рабочей группой РГУПС предлагаются следующие технологические мероприятия [7, 8]:

1) обеспечение своевременного планирования отправления вагонов на выход с дороги по расписанию, что позволит сократить простой вагонов на станциях выгрузки и снизить величину рабочего парка порожних вагонов на дороге;

2) разработка технологии, исключаящей заадресовку порожних вагонов на СКЖД с других дорог, обеспечивая на станциях внутри дороги погрузку имеющимся подвижным составом;

3) приведение рабочего парка дороги к плановой норме за счет выполнения нормативов рабочих парков, прежде всего на основных решающих станциях полигона дороги: Лихая, Батайск, Сальск,

Тихорецкая, Краснодар-сортировочный, Разъезд 9-й километр, Белореченская, Кавказская, – что позволит увеличить участковую скорость, исключая неприем поездов, и тем самым сократить простой вагонов на указанных станциях;

4) содержание парка маневровых локомотивов на грузовых и портовых станциях согласно объему маневровой работы, что позволит обеспечить своевременную подачу вагонов и выполнение грузовых операций, в результате чего сократится простой местных вагонов;

5) формирование составов поездов на выход с дороги из порожних вагонов условной длиной до 100 вагонов (данное мероприятие позволяет более качественно использовать поездной локомотив, повышая его производительность, сокращать оборот порожнего вагона и снижать его рабочий парк на полигоне дороги).

С целью дальнейшего снятия инфраструктурных ограничений инвестпрограммой ОАО «РЖД» предусмотрено проведение мероприятий по дальнейшему уменьшению барьеров на участках дороги, в том числе строительство вторых путей, организация движения поездов в режиме виртуальной сцепки, позволяющей их пропуск с интервалом не более 6 мин, и др.

Выводы

Анализ оборота вагона на СКЖД позволил определить причины его невыполнения и в целях сокращения разработать меры, направленные на улучшение работы железнодорожного транспорта, способствующие своевременной доставке грузов и повышению эффективности эксплуатационной работы дороги [9, 10, 11]. Среди последних большое влияние оказали мероприятия по технической реконструкции основных направлений дороги, дальнейшему развитию и совершенствованию технологии работы станций, повышению взаимодействия в работе всех участников перевозочного процесса, в том числе собственников подвижного состава, грузовладельцев, работников железных дорог Юго-Западного полигона. Однако давать оценку перевозочной деятельности по одному показателю сегодня не следует. Требуется в условиях рыночной экономики искать новые способы сближения интересов различных участников перевозочной деятельности, способствующие повышению эффективности перевозочного процесса, удовлетворяющие потребности перевозчика и пользователей железнодорожного транспорта, подтверждающие высокий уровень его конкурентоспособности, развитие экономики России, разделить ответственность между ними. При этом величина оборота вагона, приходящаяся на ответственность ОАО «РЖД», определяется по формуле:

$$\Theta^{\text{РЖД}} = \frac{1}{24} \left[\frac{l_{\text{п}}}{V_{\text{уч}}} + \frac{l_{\text{п}}}{L_{\text{В}}} \cdot t_{\text{тех}} + k_{\text{м}} \cdot \frac{1}{2} \left(\underbrace{t^{\text{оп пр}} + t_{\text{погр}}}_{\text{порожнее состояние}} + \underbrace{t^{\text{оп от}}}_{\text{груженое состояние}} + \underbrace{t^{\text{оп пр}} + t_{\text{выгр}}}_{\text{груженое состояние}} + \underbrace{t^{\text{оп от}}}_{\text{порожное состояние}} \right) \right], \quad (4)$$

а величина оборота вагона вне зоны ответственности перевозчика – по формуле:

$$\Theta^{\text{вне РЖД}} = \frac{1}{24} \left[k_{\text{м}} \cdot \frac{1}{2} (t_{\text{оз}} + t_{\text{погр}} + t_{\text{выгр}}) \right], \quad (5)$$

где $t^{\text{оп пр}}$ – среднее время простоя порожнего или груженого вагона по прибытии;
 $t^{\text{оп от}}$ – среднее время простоя порожнего или груженого вагона по отправлении;
 $t_{\text{погр}}$ – среднее время на погрузку вагона;
 $t_{\text{выгр}}$ – среднее время на выгрузку вагона;
 $t_{\text{оз}}$ – среднее время в ожидании задресовки вагона.

Общий оборот вагона складывается из величин, находящихся в зоне ответственности железной дороги и вне ее. Этот вариант расчета позволяет упростить определение платы за простой вагонов на станционных путях общего пользования согласно статье 44 Устава железнодорожного транспорта РФ за предоставление путей вне перевозочного процесса. Определение ответственности каждого участника перевозоч-

ного процесса позволяет оценить работу причастных подразделений и повысить качество организации перевозок на железнодорожном транспорте. Кроме того, появление ответственности перед перевозчиком других участников перевозочного процесса способствует оптимизации их действий, стремлению к сокращению издержек при перевозках грузов. Издержки самого перевозчика снизятся значительно уже потому, что сократятся непроизводительный простой и порожний пробег вагонов, оптимизируется работа станций, снизится количество перевозок с нарушением сроков доставки грузов.

Список литературы

- 1 **Шенфельд, К. П.** Значение параметра «оборот вагонов» для операторов собственников подвижного состава / К. П. Шенфельд // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 2. – С. 65–67.
- 2 **Шенфельд, К. П.** Задача распределения порожних вагонов под погрузку в современных условиях / К. П. Шенфельд // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 3. – С. 3–7. – ISSN 2223-9731.
- 3 **Хусаинов, Ф. И.** Оборот вагона : вчера и сегодня / Ф. И. Хусаинов // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 4. – С. 42–44. – ISSN 1607-3290.
- 4 **Хусаинов, Ф. И.** Инфраструктура железных дорог России и регулирование вагонных парков / Ф. И. Хусаинов, П. В. Куренков // Экономика железных дорог. – 2013. – № 9. – С. 35–48. – ISSN 1727-6500.
- 5 **Мачерет, А. А.** Экономическое значение ускорения оборота грузового вагона / А. А. Мачерет // Экономика железных дорог. – 2014. – № 11. – С. 25–29. – ISSN 1727-6500.
- 6 **Елисеев, С. Ю.** Сокращение простоев грузовых вагонов в ожидании погрузки / С. Ю. Елисеев, А. А. Шатохин // Транспорт : наука, техника, управление. – 2016. – № 5. – С. 19–22. – ISSN 1992-3252.
- 7 Перспективы технологии на железнодорожном транспорте : монография / А. Г. Черняев, В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко, Е. В. Рязанова ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2019. – 143 с. – ISBN 978-5-88814-978-2.
- 8 Логистическое моделирование процесса мультимодальных грузоперевозок через порты Азово-Черноморского бассейна / Е. А. Чеботарева, П. В. Куренков, А. С. Кравец [и др.] // Логистика. – 2022. – № 10. – С. 14–20.
- 9 **Govorukha, S. A.** Main Directions for Improving the Operational Work of the North Caucasian Traffic Control Directorate / S. A. Govorukha, V. N. Zubkov, N. N. Musienko // In : Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 509) / A. Guda (ed.). – Springer, Cham., 2022. – Vol. 509. – P. 115–126. – DOI 10.1007/978-3-031-11058-0_12.

References

- 1 **Schenfeld, K. P.** The value of the parameter “turnover of wagons” for operators of rolling stock owners / K. P. Schoenfeld // Zheleznodorozhny Transport (Railway Transport). – 2009. – No. 2. – P. 65–67.
- 2 **Schenfeld, K. P.** The task of distributing empty wagons for loading in modern conditions / K. P. Schoenfeld // Vestnik VNIIZHT. – 2012. – No. 3. – P. 3–7. – ISSN 2223-9731.
- 3 **Khusainov, F. I.** Wagon turnover : yesterday and today / F. I. Khusainov // Zheleznodorozhny Transport (Railway Transport). – 2009. – No. 4. – P. 42–44. – ISSN 1607-3290.
- 4 **Khusainov, F. I.** Infrastructure of the Russian railways and regulation of car fleets / F. I. Khusainov, P. V. Kurenkov // Ekonomika zheleznih dorog (Railway Economics magazine). – 2013. – No. 9. – P. 35–48. – ISSN 1727-6500.
- 5 **Macheret, A. A.** The economic significance of accelerating the turnover of a freight car / A. A. Macheret // Ekonomika zheleznih dorog (Railway Economics magazine). – 2014. – No. 11. – P. 25–29. – ISSN 1727-6500.
- 6 **Eliseev, S. Yu.** Reduction of downtime of freight cars waiting for loading / S. Yu. Eliseev, A. A. Shatokhin // Transport : science, technology, management. – 2016. – No. 5. – P. 19–22. – ISSN 1992-3252.
- 7 Prospects of technology in railway transport : monograph / A. G. Chernyaev, V. N. Zubkov, N. N. Musienko, E. V. Ryazanova; RSTU. – Rostov-on-Don, 2019. – 143 p. – ISBN 978-5-88814-978-2.
- 8 Logistic modeling of the process of multimodal cargo transportation through the ports of the Azov-Black Sea basin / E. A. Chebotareva, P. V. Kurenkov, A. S. Kravets [et al.] // Logistics. – 2022. – No. 10. – P. 14–20.
- 9 **Govorukha, S. A.** Main Directions for Improving the Operational Work of the North Caucasian Traffic Control Directorate / S. A. Govorukha, V. N. Zubkov, N. N. Musienko // In : Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 509) / A. Guda (ed.). – Springer, Cham., 2022. – Vol. 509. – P. 115–126. – DOI 10.1007/978-3-031-11058-0_12.

10 **Zubkov, V. N.** The Prospective Model of Organization of Freight Transportation on the North Caucasian Railway Range / V. N. Zubkov, N. N. Musienko, K. V. Anoshkin // In : Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 510) / A. Guda (ed.). – Springer, Cham., 2022. – Vol 509. – P. 543–554. – DOI 10.1007/978-3-031-11051-1_54.

11 **Zubkov, V. N.** Increasing the capacity of the stressed sections of the north Caucasus railway in the south of Russia / V. N. Zubkov, E. A. Chebotareva, E. V. Ryazanova // Transportation Research Procedia : 10th International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2022, Novosibirsk, 02–05 March 2022. – 2022. – Vol. 63. – P. 1717–1726. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.186.

10 **Zubkov, V. N.** The Prospective Model of Organization of Freight Transportation on the North Caucasian Railway Range / V. N. Zubkov, N. N. Musienko, K. V. Anoshkin // In : Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, vol. 510) / A. Guda (ed.). – Springer, Cham., 2022. – Vol 509. – P. 543–554. – DOI 10.1007/978-3-031-11051-1_54.

11 **Zubkov, V. N.** Increasing the capacity of the stressed sections of the north Caucasus railway in the south of Russia / V. N. Zubkov, E. A. Chebotareva, E. V. Ryazanova // Transportation Research Procedia : 10th International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2022, Novosibirsk, 02–05 March 2022. – 2022. – Vol. 63. – P. 1717–1726. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.186.

V. N. Zubkov, N. N. Musienko, O. A. Voron, I. D. Dolgiy

ANALYSIS AND MEASURES TO REDUCE THE TURNOVER OF WAGONS ON THE NORTH CAUCASUS RAILWAY

Abstract. The analysis of the turnover of the car in the conditions of the car fleet state management and the market economy is carried out. It is established that in the conditions of the Soviet economy, the turnover of the car actually characterized the effectiveness of its use to a greater extent, and its implementation was constantly monitored. In market conditions, when the entire car fleet is owned by many rolling stock operators, optimizing the turnover of the car does not affect the profitability of operators from cargo transportation, and, accordingly, in fact, the attention should not be paid to its acceleration. This leads to the conclusion that in the conditions of a large number of owners of rolling stock, the turnover of a wagon has ceased to be the main indicator of the quality of the operational work of railways. As a result, there is an increase in the oncoming empty run, an increase in the turnover of a car and a locomotive, which leads to additional costs for the Russian Railways, causes the need to increase train locomotives and crews, strengthen infrastructure due to the delay of a large number of trains, etc. Measures are proposed to accelerate the turnover wagon and increase the efficiency of the operational work of transport.

Keywords: the owners of the car fleet, the turnover of the common car, the types of turnover of the car, the efficiency of the use of the car fleet, measures to reduce the turnover of the car, the economic assessment of the acceleration of turnover.

For citation: Zubkov, V. N. Analysis and measures to reduce the turnover of wagons on the North Caucasus Railway / V. N. Zubkov, N. N. Musienko, O. A. Voron, I. D. Dolgiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 197–205. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_197.

Сведения об авторе

Зубков Виктор Николаевич

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

Information about the author

Zubkov Viktor Nikolayevich

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

Мусиенко Нина Николаевна

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

Ворон Олег Андреевич

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: rgups_voron@mail.ru

Долгий Игорь Давидович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматика и телемеханика на
железнодорожном транспорте»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
e-mail: mtn73@yandex.ru

Musienko Nina Nikolayevna

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

Voron Oleg Andreyevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and car facilities»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Head of the Chair,
e-mail: rgups_voron@mail.ru

Dolgiy Igor Davidovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Automatics and Remote Control on Railway
Transport»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Chair,
e-mail: mtn73@yandex.ru

А. С. Корнев, Р. З. Хайруллин

К РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММ СРЕДНЕСРОЧНОГО И ДОЛГОСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПАРКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ОАО «РЖД»

Аннотация. Приводится обоснование необходимости разработки ряда моделей, используемых при формировании программ среднесрочного и долгосрочного развития парка средств измерений ОАО «РЖД». Представлены модели управления этапами жизненного цикла средств измерений ОАО «РЖД», включая модели создания научно-технического задела, разработки и производства средств измерений на основе использования дискретной полумарковской модели и логистической модели. Представлены результаты математического моделирования. Рассмотрены достоинства и недостатки предлагаемых математических моделей. Сделан вывод о дальнейших перспективах использования рассматриваемых полумарковских моделей при создании сложных технических систем и другой высокотехнологичной продукции.

Ключевые слова: средство измерений, жизненный цикл, вероятность, моделирование, программно-целевое планирование.

Для цитирования: Корнев, А. С. К разработке программ среднесрочного и долгосрочного планирования развития парка средств измерений ОАО «РЖД» / А. С. Корнев, Р. З. Хайруллин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 206–216. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_206.

Введение

В декабре 2021 года дирекцией ОАО «РЖД» была утверждена Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года. В рамках стратегии сформированы основные целевые индикаторы и направления развития на длительную перспективу, а также акцентировано внимание на повышении эффективности функционирования «РЖД», в том числе на базе новых инновационных, технических и технологических решений.

Основное внимание требуется уделить развитию ОАО «РЖД» по трем ключевым направлениям: в сфере управления перевозочным процессом, в области содержания и модернизации инфраструктуры, в части развития локомотивного комплекса.

Миссия ОАО «РЖД» реализуется на основе программно-целевого планирования развития до 2030 года по ряду направлений, в том числе:

- создание и внедрение технических решений и форм организации грузового тяжеловесного и высокоскоростного движения;
- применение новейших материалов, форм, систем;
- использование новейших телекоммуникационных технологий;
- применение динамических систем управления с использованием искусственного интеллекта.

Реализация указанных направлений немыслима без широкого применения новейших измерительных комплексов, измерительных систем и средств измерений (СИ).

Развитие современных СИ связано с их непрерывным усложнением, расширением диапазонов измерений, уменьшением погрешности измерений и, как правило, увеличением стоимости разработки, производства и эксплуатации [1].

Реализация программ среднесрочного и долгосрочного развития парка СИ осуществляется с использованием методов программно-целевого планирования [2]. Методы и методические подходы, используемые при формировании предложений в долгосрочные программные документы для различных видов специальной техники, описаны в [3–6], в том числе в части СИ с метрологическим обеспечением – в [1, 7].

В данной статье представлен ряд моделей, используемых при формировании программ среднесрочного и долгосрочного развития парка СИ, а также применяемых в рамках научно-исследовательских работ по оптимизации парка СИ.

Представленные в статье модели позволяют моделировать процессы разработки, производства и эксплуатации СИ. Разработанные модели входят в состав научно-методического аппарата для сквозного моделирования основных этапов жизненного цикла (ЖЦ) СИ с тем или иным уровнем детализации. Отметим, полумарковская модель эксплуатации с учетом старения парка СИ, периодических проверок СИ и обновления парка СИ за счет закупок новых образцов и модернизации существующих образцов представлена в [7].

Описание структуры ЖЦ СИ

Жизненный цикл СИ, как, впрочем, и другой высокотехнологичной продукции, представим в виде последовательности следующих этапов ЖЦ: создание научно-технического задела (НТЗ), проведение научно-исследовательских работ (НИР), проведение опытно-конструкторских работ (ОКР), производство (ПРО), эксплуатация (ЭКС). Отметим, что указанные этапы могут реализоваться с некоторым наложением, то есть последующий этап может начинаться незадолго до окончания предыдущего этапа.

Анализ ретроспективных данных по разработке измерительной техники (СИ в частности) показал, что общая длительность первых двух этапов составляет примерно 10–15 % всего ЖЦ. Третий и четвертый этапы составляют в среднем 20–30 % ЖЦ. Процесс эксплуатации, как самый длительный этап ЖЦ, составляет 60–70 %.

Опишем методические подходы, методы, модели и критерии, используемые при подготовке предложений в программы долгосрочного развития парка СИ.

Методический подход к описанию динамики этапов ЖЦ СИ на основе дискретной полумарковской модели

Дискретный полумарковский процесс будем описывать графом $G(A, V, P)$ с узлами $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, характеризующими его состояние, и дугами $V = \{V_{ij}\}_{m \times m}$, являющимися переходами из одного состояния в другое. Определим $V_{ij} = 1$, если переход $A_i \rightarrow A_j$ возможен, и $V_{ij} = 0$, если данный переход невозможен. Зададим вероятности переходов из одного состояния в другое в виде матрицы $\Pi(t) = \{\pi_{ij}(t)\}_{m \times m}$, где $\pi_{ij}(t) = P(V_{ij} = 1 | \tau_i < t)$ – вероятность перехода $A_i \rightarrow A_j$ за время t , τ_i – стохастическое время пребывания процесса в состоянии A_i с заранее выявленным законом распределения [7–9].

Нормировку вероятностей переходов опишем в виде:

$$\sum_{j=1}^m \pi_{ij}(t) = 1, \quad (i = 1, 2, \dots, m).$$

Переход из одного состояния в другое происходит с вероятностью $p_{ij}(t)$, которая зависит от времени пребывания в данном состоянии от управляющих воздействий $u_i \in U$:

$$\pi_{ij}(t) = P(V_{ij} = 1; u_i | \tau_i < t),$$

зависящих от времени t , здесь $U = \{u_i\}$ – конечное множество управлений.

Длительность ЖЦ образца СИ равна сумме длительностей его этапов:

$$T_{\text{жц}} = \tau_{\text{НТЗ}} + \tau_{\text{НИР}} + \tau_{\text{ОКР}} + \tau_{\text{ПРО}} + \tau_{\text{ЭКС}}.$$

Продолжительность этапов ЖЦ, как правило, является случайной величиной, поскольку процессы разработки СИ связаны с воздействием целого ряда случайных факторов.

Полумарковская модель процессов ЖЦ типовых образцов СИ

Представим процесс в виде последовательности вершин графа, характеризующих стадии ЖЦ (рис. 1).

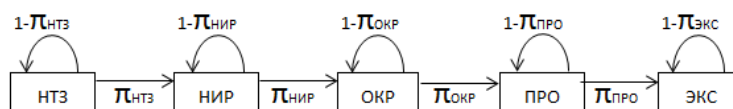


Рис. 1. Граф проектного процесса создания типовых образцов СИ

Началу проекта соответствует первая вершина графа – НТЗ. Завершению проекта соответствует последняя вершина графа – ЭКС. Будем предполагать, что с вероятностями $\pi_{ij}(t)$ в моменты времени $t = 1, 2, \dots, T$ осуществляются переходы между состояниями. Система уравнений для вероятностей нахождения в указанных состояниях имеет вид:

$$\begin{aligned} P_{\text{НТЗ}}(t+1) &= (1 - \pi_{\text{НТЗ}}) P_{\text{НТЗ}}(t); \\ P_{\text{НИР}}(t+1) &= \pi_{\text{НТЗ}} P_{\text{НТЗ}}(t) + (1 - \pi_{\text{НИР}}) P_{\text{НИР}}(t); \\ P_{\text{ОКР}}(t+1) &= \pi_{\text{НИР}} P_{\text{НИР}}(t) + (1 - \pi_{\text{ОКР}}) P_{\text{ОКР}}(t); \\ P_{\text{ПРО}}(t+1) &= \pi_{\text{ОКР}} P_{\text{ОКР}}(t) + (1 - \pi_{\text{ПРО}}) P_{\text{ПРО}}(t); \\ P_{\text{ЭКС}}(t+1) &= \pi_{\text{ПРО}} P_{\text{ПРО}}(t) + (1 - \pi_{\text{ЭКС}}) P_{\text{ЭКС}}(t). \end{aligned} \quad (1)$$

При этом в каждый момент времени $t = 1, 2, \dots, T$ выполняется условие нормировки:

$$P_{\text{НТЗ}}(t) + P_{\text{НИР}}(t) + P_{\text{ОКР}}(t) + P_{\text{ПРО}}(t) + P_{\text{ЭКС}}(t), \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (2)$$

Начальные значения вероятностей состояний и условные вероятности переходов $\pi_{ij}(t)$ являются исходными данными модели.

Временная зависимость вероятностей реализации этапов представлена на рис. 2. Исходные данные, используемые в расчетах:

$\pi_{\text{НТЗ}}(t) = 0,8$; $\pi_{\text{НИР}}(t) = 0,7$; $\pi_{\text{ОКР}}(t) = 0,65$; $\pi_{\text{ПРО}}(t) = 0,5$; $\pi_{\text{ЭКС}}(t) = 0$ – вероятности переходов;
 $P_{\text{НТЗ}}(0) = 0,5$; $P_{\text{НИР}}(0) = 0,15$; $P_{\text{ОКР}}(0) = 0,15$; $P_{\text{ПРО}}(0) = 0,15$; $P_{\text{ЭКС}}(0) = 0,05$ – начальные значения вероятностей состояний.

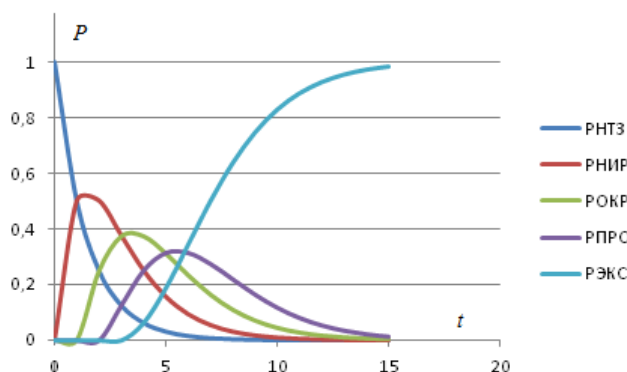


Рис. 2. Динамика вероятностей реализации этапов проекта

Уровень научно-технического задела и производственно-технологических возможностей характеризуется этими параметрами. Вероятность реализации проекта к моменту времени t описана итоговой функцией $P_{\text{ЭКС}}(t)$.

Проект реализуется практически достоверно при $P_{\text{ЭКС}}(15) = 0,98$ за $T = 15$ лет, – такой вывод можно сделать из приведенного рисунка (см. рис. 2).

Модель описывает динамику этапов ЖЦ при потоковой разработке типовых образцов СИ. Модель показывает в каждый момент времени объемы выполняемых работ по этапам ЖЦ.

По своей форме функция $P_{\text{ЭКС}}(t)$ напоминает функцию, которая уже используется в качестве модели рабочих процессов в производстве, технике и экономике [3]. Модели, основанные на использовании логистической функции, будут описаны ниже.

Полумарковская модель процессов ЖЦ уникального единичного образца СИ

Граф полумарковской модели приведен на рис. 3.

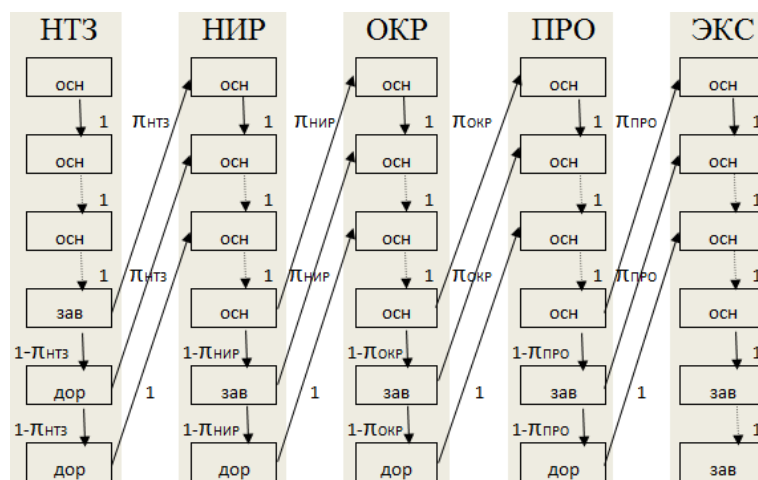


Рис. 3. Граф полумарковской модели

Опишем основные положения, положенные в основу этой модели:

1 Задается шаг продолжительности, равный 1 году, и задаются средние продолжительности этапов ЖЦ, кратные 1 году.

2 На каждом этапе ЖЦ выделяют основную («осн» на рис. 3) и завершающую («зав» на рис. 3) части работ, выполняемых на этапе.

3 На каждом этапе в процессе выполнения основных работ осуществляется переход к следующему шагу выполнения этапа с вероятностью 1. Переход от основной части к завершающей также осуществляется с вероятностью, равной 1.

4 Переходы от завершающей части этапов НТЗ, НИР, ОКР, ПРО к основной части этапов НИР, ОКР, ПРО, ЭКС осуществляется с вероятностями $\pi_{\text{НТЗ}}$, $\pi_{\text{НИР}}$, $\pi_{\text{ОКР}}$, $\pi_{\text{ПРО}}$, а переход от завершающей части этапа на доработку (без изменения этапа) – с вероятностями $(1 - \pi_{\text{НТЗ}})$, $(1 - \pi_{\text{НИР}})$, $(1 - \pi_{\text{ОКР}})$, $(1 - \pi_{\text{ПРО}})$ соответственно.

5 С каждого шага при доработке, за исключением последнего, осуществляется переход на очередной шаг следующего этапа ЖЦ с вероятностями $\pi_{\text{НТЗ}}$, $\pi_{\text{НИР}}$, $\pi_{\text{ОКР}}$, $\pi_{\text{ПРО}}$, а переход от следующего шага доработки (без изменения этапа ЖЦ) – с вероятностями $(1 - \pi_{\text{НТЗ}})$, $(1 - \pi_{\text{НИР}})$, $(1 - \pi_{\text{ОКР}})$, $(1 - \pi_{\text{ПРО}})$.

6 Переход с последнего шага доработки на последний шаг следующего этапа ЖЦ осуществляется с вероятностью 1.

7 Продолжительность этапа эксплуатации выбирается так, чтобы при его завершении вероятность отличалась от 1 на величину, не превосходящую γ .

На рис. 4 представлена динамика вероятностей реализации этапов проекта по разработке уникального единичного образца СИ.

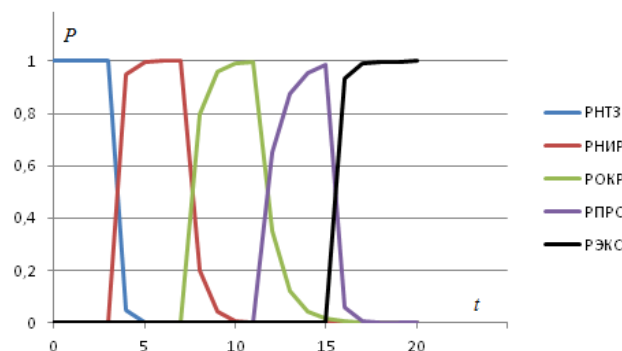


Рис. 4. Динамика вероятностей реализации этапов проекта по разработке уникального единичного образца СИ

Отметим последовательную реализацию этапов ЖЦ с некоторым наложением конца предыдущего этапа и начала следующего этапа. Вероятность реализации проекта к моменту времени t характеризуется функцией $P_{\text{ЭКС}}(t)$. За время $T = 17$ лет проект реализуется почти наверняка.

Отметим, что по своему виду функция $P_{\text{ЭКС}}(t)$ на отрезке времени эксплуатации, так же как и для полумарковской модели процессов ЖЦ типовых образцов СИ, напоминает логистическую функцию [3–5].

Описание динамики ЖЦ с использованием методического подхода на основе использования логистических функций

Стандартная логистическая модель описывается следующим нелинейным дифференциальным уравнением для неизвестной функции – вероятности готовности СИ [3]:

$$\frac{dp}{dt} = \vartheta p(1 - p), \quad p(0) = p_0, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

где $\vartheta(t)$ – интенсивность (темп) создания СИ; p_0 – начальный уровень готовности СИ, определяемый уровнем научно-технического и технологического задела.

Уравнение (3) является уравнением с разделяющимися переменными, его решение имеет вид:

$$p(t) = \frac{p_0}{p_0 + (1 - p_0) \cdot \exp\left(-\int_0^t \vartheta(\tau) d\tau\right)}. \quad (4)$$

Уравнение (3) принимает вид решения (4) при постоянном темпе создания СИ ($\vartheta = \text{const}$):

$$p(t) = \frac{p_0}{p_0 + (1 - p_0) \cdot \exp(-\vartheta \cdot t)}. \quad (5)$$

Логистические функции готовности СИ с разными начальными значениями уровней готовности представлены на рис. 5.

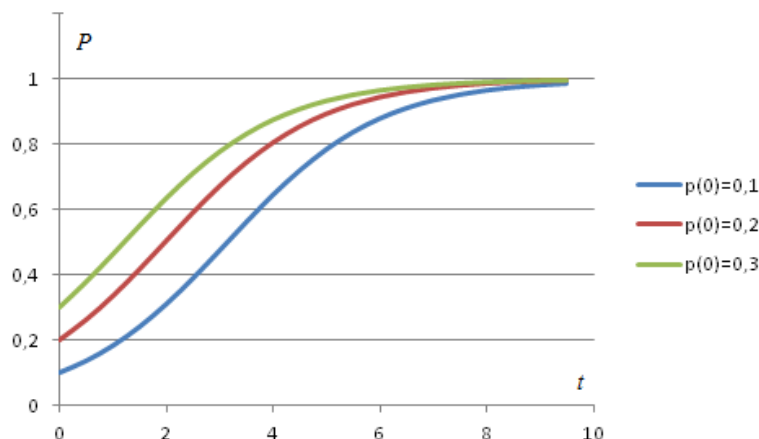


Рис. 5. Логистические функции готовности СИ с разными начальными значениями уровней готовности

Видно, что при увеличении начального уровня готовности СИ логистическая функция быстрее стремится к своему предельному значению.

Опишем динамику выполнения проектных работ в зависимости от обеспеченности ресурсами. Основные варианты ресурсного обеспечения и связанная с ними динамика готовности высокотехнологичной продукции исследованы в [6]. Предположим, что ресурсное обеспечение $S(t)$ пропорционально темпу $\mathcal{Y}(t)$ создания образца СИ. Ресурсное обеспечение может быть постоянным по времени или, например, линейно нарастать по времени в процессе выполнения отдельного этапа проекта:

$$S(T) = S_0 + S_1 t, \quad (6)$$

здесь $S_0 > 0$ и $S_1 > 0$. Графики логистических функций готовности СИ (разработка) для различных вариантов ресурсного обеспечения (6) показаны на рис. 6.

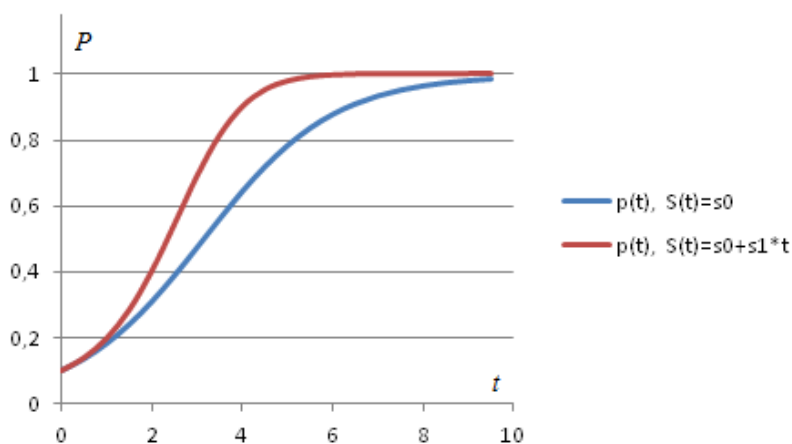


Рис. 6. Логистические функции готовности СИ при разных вариантах ресурсного обеспечения

Видно, что если ресурсное обеспечение возрастает с течением времени, то уровень готовности растет быстрее, чем в случае постоянства ресурсного обеспечения.

Способы достижения гарантированного уровня готовности разработки образца СИ

Задавая гарантированный уровень γ готовности СИ $P(t) = \gamma$ и используя (5), время готовности СИ с заданным уровнем достоверности [6] выразим в виде:

$$t_{\gamma} = -\frac{\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0}{\gamma(1-p_0)}\right)}{\vartheta}. \quad (7)$$

Требуемое значение времени готовности СИ $t_{\text{ТРЕБ}}$ можно задать, тогда из (5) необходимый темп выполнения проектных работ [6] примет вид:

$$\vartheta_{\gamma} = -\frac{\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0}{\gamma(1-p_0)}\right)}{t_{\text{ТРЕБ}}}. \quad (8)$$

Формулы (7), (8) позволяют вычислять время готовности и темп выполнения проектных работ, обеспечивающие гарантированное значение уровня готовности γ при разработке СИ.

Трансформация вариантов планирования этапов ЖЦ с применением логистической модели

Предположим, что процесс разработки нового СИ изначально запланирован на отрезке времени $0 \leq t \leq T$ с постоянным темпом производства $\vartheta_{\text{ПЛ}}$. Тогда с вероятностью $1-\gamma$ в соответствии с (7):

$$T = -\left(\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0}{\gamma(1-p_0)}\right)\right) / (\vartheta_{\text{ПЛ}}). \text{ Рассмотрим варианты трансформации первоначального плана, которые}$$

возникают при необходимости ускорения создания СИ или недостаточности ресурсного обеспечения.

Первые три варианта трансформации реализуемы в случае достаточности ресурсного обеспечения. Первый вариант трансформации реализуем для производств, которые могут быть мгновенно перестроены от темпа $\vartheta_{\text{ПЛ}}$ до некоторого значения ϑ^* , причем $a_0 > \vartheta_{\text{ПЛ}}$. Примером такого вида производства может служить гибкая производственная система. Пусть в некоторый момент времени t^* , такой, что $0 < t^* < T$ возникает необходимость ускорения производства с целью завершения процесса создания нового СИ к моменту времени T^* , причем $t^* < T^* < T$. Тогда трансформированный вариант плана создания СИ необходимо реализовывать на отрезке времени $t^* < t \leq T^*$ с более высоким темпом $\vartheta = a_0 > \vartheta_{\text{ПЛ}}$, равным: $a_0 = -\left(\ln\left(\frac{(1-\gamma)p_0^*}{\gamma(1-p_0^*)}\right)\right) / (T^* - t^*)$, где $p_0^* = p_0 / (p_0 + (1-p_0) \cdot \exp(-\vartheta \cdot t^*))$ – значение

вероятности, достигнутой на момент времени $t = t^*$ при реализации первоначального плана создания СИ. При этом производственная функция будет иметь излом в момент времени $t = t^*$ (рис. 7, а).

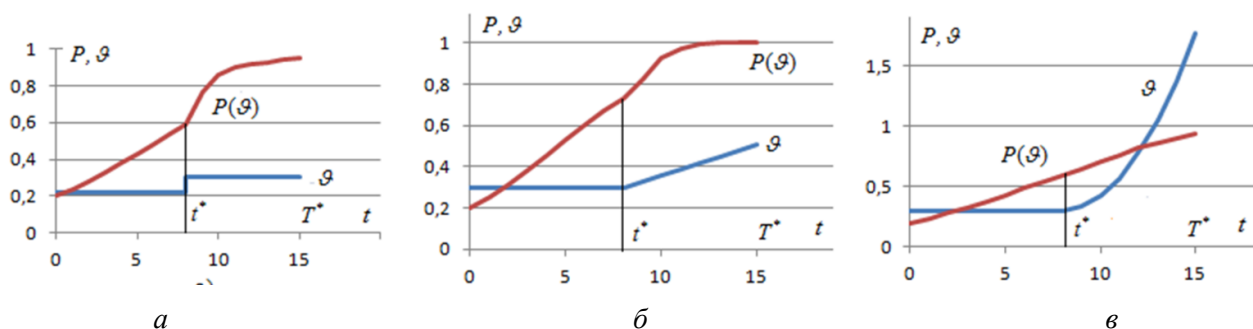


Рис. 7. Трансформация вариантов

Второй вариант трансформации может быть реализован в случае невозможности мгновенного изменения темпа производства. Предположим, что изменение темпа возможно по линейному закону:

$\vartheta = \vartheta_{\text{ПЛ}} + a_1(t - t^*)$ при $t^* < t \leq T^*$. Значение параметра a_1 , обеспечивающее выполнение плана с вероятностью $1 - \gamma$ равно: $a_1 = -2 \cdot \left(\ln \left(\frac{(1-\gamma)p_0^*}{\gamma(1-p_0^*)} \right) + \vartheta_{\text{ПЛ}} T^* \right) / (T^* - t^*)^2$. При этом производственная функция уже не будет иметь излома в момент времени $t = t^*$, а темп производства еще будет иметь излом в точке $t = t^*$ (рис. 7, б).

Третий вариант трансформации может быть применен для инерционных непрерывных производств в случае невозможности обеспечения излома для функции темпа производства. Зададим изменение темпа производства с помощью гладкой функции – квадратической параболы: $\vartheta = \vartheta_{\text{ПЛ}} + a_2(t - t^*)^2$ при $t^* < t \leq T^*$. Значение параметра a_2 , обеспечивающее выполнение плана с вероятностью $1 - \gamma$, равно: $a_2 = -3 \cdot \left(\ln \left(\frac{(1-\gamma)p_0^*}{\gamma(1-p_0^*)} \right) + \vartheta_{\text{ПЛ}} T^* \right) / (T^* - t^*)^3$. При этом и темп производства, и производственная функция будут в окрестности точки $t = t^*$ гладкими функциями (без изломов) (рис. 7, в).

Четвертый вариант трансформации первоначального плана возникает в случае недостаточности ресурсного обеспечения для его реализации в случае производств, которые могут быть мгновенно перестроены от темпа ϑ до ϑ^* . Предположим, что ресурса достаточно только для обеспечения интенсивности, равной ϑ^* , причем $0 < \vartheta^* < \vartheta_{\text{ПЛ}}$. Тогда оценка новой продолжительности T^* создания СИ с вероятностью $1 - \gamma$ имеет вид: $T^* = \left(\ln \left(\frac{(1-\gamma)p_0^*}{\gamma(1-p_0^*)} \right) \right) / \vartheta^*$, причем $T^* > T$, $p_0^* = p_0 / (p_0 + (1-p_0) \cdot \exp(-\vartheta_{\text{ПЛ}} \cdot t^*))$ – значение вероятности, достигнутой на момент времени $t = t^*$ при реализации первоначального плана создания СИ.

Последовательное моделирование этапов ЖЦ с применением логистической модели

Результаты последовательного моделирования этапов ЖЦ с применением логистической модели для каждого этапа ЖЦ представлены на рис. 8. Предполагалось, что очередной этап ЖЦ начинается за 3 месяца до окончания предыдущего этапа ЖЦ.

Видно, что продолжительности этапов ЖЦ составляют: $t_{\text{НТЗ}} = 3$ года, $t_{\text{НИР}} = 3$ года, $t_{\text{ОКР}} = 2$ года и $t_{\text{ПРО}} = 3,5$ года. Процесс производства начинается через 8 лет, а процесс эксплуатации – через 13,5 года.

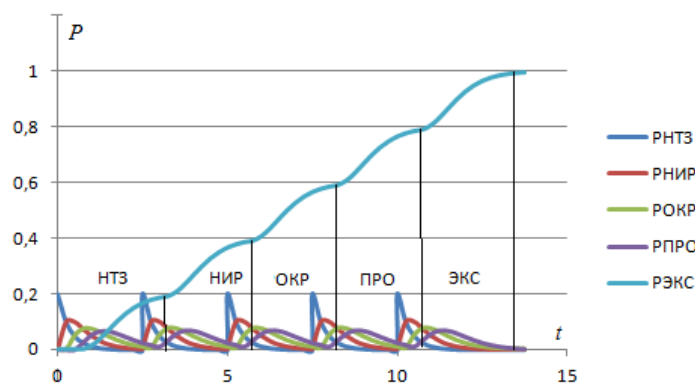


Рис. 8. Моделирование этапов ЖЦ с помощью логистической функции

Отметим, что достоинствами логистической модели являются сочетание ее простоты и достаточной адекватности реальным процессам, а также минимальные требования к наличию исходных данных, необходимых для практической реализации.

Уровень готовности СИ в процессе эксплуатации снижается по причине воздействия различных факторов (повреждений, естественного износа). Предельный срок эксплуатации достигается по мере возрастания частоты таких воздействий, как следствие, СИ подлежит только утилизации. Средний срок эксплуатации СИ – 10 лет – установлен в процессе разработки СИ.

Моделирование процесса эксплуатации СИ с учетом проведения текущего и восстановительного ремонта.

Поток отказов с интенсивностью $\lambda(t)$ с определенной вероятностью $p(t)$ переводит некоторые СИ в неисправное состояние – они подлежат текущему ремонту. Текущий ремонт (ТР) выполняется специалистами-ремонтниками поверочной организации или специалистами предприятия-изготовителя. ТР направлен на возвращение работоспособности СИ, т. е. при ТР происходит замещение воздействия потока отказов [1, 3].

Интенсивность отказов с течением времени постоянно увеличивается, это связано со деградацией и старением узлов и механизмов СИ. Зачастую используется упрощенная линейная зависимость интенсивности потока постепенных отказов от времени [3]:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t, \quad (9)$$

где λ_0 – интенсивность внезапных отказов изделия; α – скорость нарастания интенсивности постепенных отказов.

Параметры интенсивности постепенных отказов λ_0 и α (9) зависят от условий и режимов эксплуатации СИ и, как правило, могут быть рассчитаны с использованием паспортных СИ, в том числе с использованием средней наработки на отказ.

Средний и капитальный ремонт (СР и КР) проводится с целью недопущения и снижения действия постепенных отказов. Он включает в себя диагностику технического состояния, профилактические замены составных частей, регулировочные и наладочные работы. СР и КР осуществляются силами предприятий-изготовителей, при этом СИ восстанавливается до максимального уровня его готовности.

На рис. 9 представлена динамика коэффициента готовности K_A и средней готовности $K_A^{(сред)}$ образца СИ в процессе эксплуатации с проведением периодических проверок и восстановительных ремонтов.

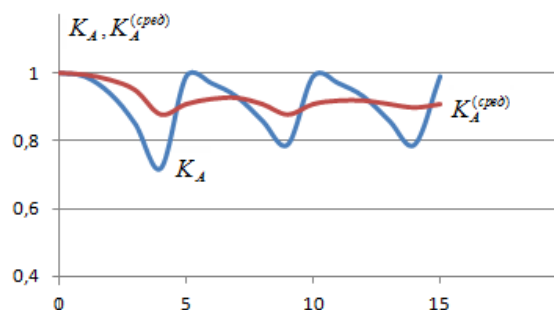


Рис. 9. Динамика коэффициента готовности образца СИ к применению

Отметим, что существуют оптимальные значения периодичности проверок и межремонтных интервалов [1, 7], которые обеспечивают в среднем максимальное значение коэффициента готовности.

Методика определения целесообразности продолжения эксплуатации.

Восстановление СИ требует соответствующих затрат материальных и временных ресурсов. В качестве критерия целесообразности проведения ремонта и продолжения эксплуатации [3] может служить превышение затрат на ремонт и последующую эксплуатацию в течение последующих двух-трех лет над затратами на приобретение нового образца СИ.

Выводы

Представленный в статье научно-методический аппарат используется при обосновании вариантов программ долгосрочного и среднесрочного развития средств метрологического обеспечения специальной техники. Он позволит решать широкий спектр задач, возникающих при подготовке предложений в среднесрочные и долгосрочные программы развития холдинга «РЖД». Низкая требовательность к исходным данным, необходимым для их реализации, и простота, а также достаточно высокое соответствие реальным процессам являются достоинствами предлагаемых математических моделей.

Представленные в статье полумарковские модели могут быть использованы для моделирования и анализа динамики выполнения проектных работ по созданию сложных технических систем и другой высокотехнологичной продукции.

Список литературы

1 **Сычев, Е. И.** Основы военной метрологии : монография / Е. И. Сычев, В. Н. Храменков, А. Д. Шкитин. – Москва : Воениздат, 1993. – 390 с.

2 **Брезгин, В. С.** Методология программно-целевого планирования развития системы вооружения на современном этапе / В. С. Брезгин. – Москва : Издательская группа «Граница», 2013. – 520 с. – ISBN 978-5-217-03458-1.

3 **Буравлев, А. И.** Вероятностные модели управления жизненным циклом вооружения и военной техники / А. И. Буравлев, Г. А. Еланцев // Вооружение и экономика. – 2021. – № 3(57). – URL: [http://www.viek.ru/57/vie_21_3\(57\)-045-065.pdf](http://www.viek.ru/57/vie_21_3(57)-045-065.pdf) (дата обращения 15.11.2022)

4 **Буренок, В. М.** Проблемы создания системы управления полным жизненным циклом вооружения, военной и специальной техники / В. М. Буренок // Вооружение и экономика. – 2014. – № 2(27). – URL: http://www.viek.ru/vie_14_2.pdf (дата обращения: 15.11.2022).

5 **Клочков, В. В.** Модель управления прикладными исследованиями и разработками в наукоемкой промышленности / В. В. Клочков, А. В. Дутов // Экономический анализ: теория и практика. – 2020. – № 35(290). – С. 9–17. – ISSN 2311-8725.

6 **Буравлев, А. И.** Модели управления ресурсным обеспечением проектов создания высокотехнологичной продукции / А. И. Буравлев // Вооружение и экономика. – 2019. – № 4(50). – URL: <http://www.viek.ru/50/62-71.pdf> (дата обращения: 15.11.2022).

7 **Хайруллин, Р. З.** Оптимизация процессов эксплуатации и обновления парка измерительной техники / Р. З. Хайруллин // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 28–34. – ISSN 0368-1025.

References

1 **Sychev, E. I.** Fundamentals of metrology of military equipment : monograph / E. I. Sychev, V. N. Khramenkov, A. D. Shkitin. – Moscow : Voenizdat. 1993. – 390 p.

2 **Brezgin, V. S.** Methodology of program-target planning of the development of the weapons system at the present stage / V. S. Brezgin. – Moscow : Granica Publishing Group, 2013. – 520 p. – ISBN 978-5-217-03458-1.

3 **Buravlev, A. I.** Probabilistic life cycle management models of weapon and military equipment / A. I. Buravlev, G. A. Elantsev // Armament and Economics. – 2021. – No. 3. – URL: [http://www.viek.ru/57/vie_21_3\(57\)-045-065.pdf](http://www.viek.ru/57/vie_21_3(57)-045-065.pdf) (date of access: 11/15/2022).

4 **Burenok, V. M.** Problems of creating a control system for the full life cycle of weapons, military and special equipment / V. M. Burenok // Armament and Economics. – 2014. – No. 2(27). – URL: http://www.viek.ru/vie_14_2.pdf (date of access: 11/15/2022).

5 **Klochkov, V. V.** Management model of applied research and development in the high-tech industry / V. V. Klochkov, A. V. Dutov // Economic Analysis : Theory and Practice. – 2020. – No. 35(290). – С. 9–17. – ISSN 2311-8725.

6 **Buravlev, A. I.** Models of resource management of projects for the creation of high-tech products / A. I. Buravlev // Armament and Economics. – 2019. – No. 4 (50). – URL: <http://www.viek.ru/50/62-71.pdf> (date of access: 11/15/2022).

7 **Khayrullin, R. Z.** On optimizing operation and updating processes of measuring equipment fleet / R. Z. Khayrullin // Measurement Techniques. – 2022. – No. 8. – P. 28–34. – ISSN 0368-1025.

A. S. Kornev, R. Z. Khayrullin

TO FORMATION OF MEDIUM-TERM AND LONG-TERM PLANNING PROGRAMS DEVELOPMENT OF THE FLEET OF JSC “RUSSIAN RAILWAYS” MEASURING INSTRUMENTS

Abstract. This paper provides a justification for the need to develop a number of models used in the formation of programs for medium- and long-term development of the park of measuring instruments of JSC “Russian Railways”. Models for managing the stages of the life cycle of measuring instruments of the Russian Railways are presented, including models for

creating a scientific and technical reserve, development and production of measuring instruments based on the use of a discrete semi-Markov model and a logistic model. The results of mathematical modelling are presented. The advantages and disadvantages of the proposed mathematical models are considered. The conclusion is made about the future prospects of using the considered semi-Markov models in the creation of complex technical systems and other high-tech products.

Keywords: measuring instrument, life cycle, probability, modeling, program-target planning.

For citation: Kornev, A. S. To formation of medium-term and long-term planning programs development of the fleet of JSC “Russian Railways” measuring instruments / A. S. Kornev, R. Z. Khayrullin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 206–216. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_206.

Сведения об авторах

Корнев Алексей Сергеевич

ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации,

Донской государственной технической университет (ДГТУ),

кандидат технических наук,

начальник лаборатории,

e-mail: lexkorban@yandex.ru

Хайруллин Рустам Зиннатуллович

ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации,

доктор физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: zrkzrk@list.ru

Information about the authors

Kornev Alexey Sergeevich

FSBE «Main Scientific Metrological Centre» of the Ministry of Defense of Russian Federation,

Don State Technical University (DSTU),

Candidate of Engineering Sciences,

Head of the Laboratory,

e-mail: lexkorban@yandex.ru

Khayrullin Rustam Zinnatulloevich

FSBE «Main Scientific Metrological Centre» of the Ministry of Defense of Russian Federation,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,

Leading Researcher,

e-mail: zrkzrk@list.ru

Т. Е. Ли, Р. Г. Король

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭТАПНОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА ПУСАН

Аннотация. Проект объединения корейских железных дорог необходим для конкурентоспособности международной логистики. Транспортный узел Пусан будет ключевым объектом на Транскорейской железнодорожной магистрали, которому в перспективе потребуется развитие для освоения увеличивающегося объема грузовых перевозок. Поэтому цель данной работы заключается в оценке эффективности мероприятий этапного развития транспортного узла Пусан. Задачи включают математическое описание этапного перехода между организационно-технологическими, техническими и инфраструктурными мероприятиями. Предмет исследования – железнодорожная, портовая и автотранспортная подсистемы транспортного узла Пусан. Работа выполнена с помощью математических методов исследования. В работе предложено создание Центра управления транспортного узла, который осуществляет оперативный обмен информацией с администрацией порта Пусан, компанией KORAIL, терминалами и контролирующими органами. Организация Центра управления транспортного узла повысит эффективность мультимодальных перевозок за счет исключения дублирования задач при управлении и передаче информации между субъектами транспортно-логистического процесса. В завершении статьи рассмотрен четвертый этап развития транспортного узла в виде создания нового транспортного узла или «сухого порта», а также описан экономический эффект для участников логистического процесса и транспортной системы Республики Корея.

Ключевые слова: транспортный узел, сухой порт, транспортно-логистический центр, Транскорейская железная дорога, морской порт Пусан.

Для цитирования: Ли, Т. Е. Оценка эффективности этапного развития транспортного узла Пусан / Т. Е. Ли, Р. Г. Король // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 217–230. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_217.

Введение

Транспортно-логистическое сопровождение международного товарообмена в условиях развития инфокоммуникационных технологий и инфраструктурного сопряжения видов транспорта позволяет минимизировать время транспортировки грузов и повысить конкурентоспособность маршрутов доставки, что является стратегическим вопросом внешней торговли Республики Корея (РК). При стабилизации политической обстановки на Корейском полуострове возможно объединение корейских железных дорог и последующая интеграция с континентальной железнодорожной сетью, поэтому подготовка инфраструктуры и технологического взаимодействия являются обязательным условием создания Транскорейской железной дороги [1]. Ключевым элементом новой железнодорожной магистрали будет транспортный узел Пусан, который включает несколько портовых комплексов, где основным является Новый порт Пусан. Соединение корейских железных дорог с выходом на континентальную транспортную сеть приведет к росту грузопотоков и соответственно повышению загруженности терминально-логистической инфраструктуры транспортного узла Пусан. Поэтому в работе рассматривается этапный подход к развитию транспортного узла Пусан при увеличении количества поступающего транспорта и контейнеров с учетом оптимальности финансовых вложений и результативности предлагаемых мероприятий за определенный временной период [2].

Основная часть

Для освоения перспективных объемов грузопотока развитие транспортного узла Пусан включает следующие этапы:

1) *Организационно-технологический*. Организационно-технологические мероприятия, направленные на развитие транспортного узла Пусан, представлены с двух позиций – на уровне Правительства Республики и на уровне транспортного узла. На правительственном уровне необходимо разграничить сферы влияния и управления объектами транспортного узла Пусан между Министерством земли, инфраструктуры и транспорта и Министерством морских дел и рыболовства. Министерство земли, инфраструктуры и транспорта Республики Корея является государственным органом управления железнодорожным транспортом, при этом железнодорожные грузовые терминалы, расположенные на территории порта, находятся в управлении Министерства морских дел и рыболовства РК, что приводит к несогласованной работе и недостаточному информационному взаимодействию, а также отсутствию единого подхода к развитию инфраструктуры и привлечению инвестиций. Вопросы интеграции государственных ведомств относятся к полномочиям Правительства РК, поэтому необходимо передать Министерству земли, инфраструктуры и транспорта функционал, который связан с управлением грузо-разгрузочной железнодорожной площадкой в морском порту [3].

Другим вариантом повышения эффективности государственной политики в области транспорта является организация «Министерства транспорта» путем объединения транспортного сектора Министерства земли, инфраструктуры и транспорта и сектора морской транспортной работы Министерства морских дел и рыболовства (рис. 1).



Рис. 1. Предлагаемая организационная структура «Министерства транспорта» Республики Корея

Предлагаемое «Министерство транспорта» регулирует работу автомобильного, железнодорожного, воздушного, морского транспорта и вопросы комплексной логистики, чтобы повысить эффективность реализации национальной политики и бюджетных инвестиций в транспортную отрасль.

На уровне функционирования транспортного узла к организационно-технологическим мероприятиям относится создание Центра управления транспортного узла, который координирует взаимодействие видов транспорта и осуществляет общее управление работой транспортного узла (рис. 2).



Рис. 2. Предлагаемая схема информационного взаимодействия в транспортном узле Пусан при наличии Центра управления транспортного узла

Центр управления транспортного узла осуществляет прямой информационный обмен оперативными данными с администрацией порта Пусан, компанией KORAIL (Korea Railroad Corporation), терминалами ICD (Inland Container Depot) и таможенными органами, что позволит исключить дублирование задач при управлении и работе с информационными потоками нескольких субъектов и повысить эффективность организации мультимодальных перевозок с участием морского, железнодорожного и автомобильного транспорта. Кроме того, необходимо создание единого оператора железнодорожного транспорта, который будет отвечать за решение комплекса вопросов по организации железнодорожных перевозок, подвода подвижного состава и работы железнодорожных грузовых терминалов [4].

Железнодорожный транспорт в Южной Корее функционирует как национальное предприятие KORAIL, являясь оператором грузовых и высокоскоростных пассажирских перевозок [5], имеет дочернюю логистическую компанию KORAIL Logistics, которая осуществляет управление северной погрузо-разгрузочной контейнерной железнодорожной площадкой транспортного узла Пусан. KORAIL Logistics работает на участке «клиент – железнодорожная контейнерная площадка» и далее передает контейнеры для перевозки транспортом KORAIL. Компания KORAIL Logistics находится в единой информационной системе компании KORAIL. Необходимо реализовать интегрированную работу компании KORAIL, исключив отдельных операторов контейнерных терминалов ICD, для непосредственного управления международными и внутренними железнодорожными грузовыми перевозками, а также создания новой информационной системы (рис. 3).



Рис. 3. Предлагаемая схема информационного взаимодействия в транспортном узле Пусан при наличии Центра управления транспортного узла с единым оператором железнодорожного транспорта

Этапность развития транспортного узла Пусан рассматривается, как совокупность мероприятий, направленных на усиление пропускной и перерабатывающей способности инфраструктурных объектов железнодорожного и автомобильного транспорта, морского порта и железнодорожных грузовых терминалов [6]. Организационно-технологические мероприятия характеризуются низкими инвестиционными затратами и включают совершенствование производственных процессов на рассматриваемых объектах транспортного узла.

В перспективе, при организации Транскорейской железнодорожной магистрали, транспортировка контейнеров будет осуществляться в мультимодальном сообщении через пункт перевалки Новый порт Пусан. По прогнозам специалистов, на перевозку железнодорожным транспортом будет перенаправлена основная часть существующего контейнеропотока без притока дополнительных объемов, поэтому отношение разницы максимальной перерабатывающей способности транспортного узла $F_{\text{пере_эт } n}^{\text{узел_max}}$ на этапе « n » ($n = 0, 1, 2, 3$) и среднего объема контейнеропотока, поступающего железнодорожным транспортом в порт $\frac{\sum_{y=1}^n V_{0,y}}{n}$ за n лет к среднему максимальному объему перегрузки контейнеров $\frac{\sum_{y=1}^n V_{\text{пере_эт } n}^{\text{max}}}{n}$ за n лет, позволит получить коэффициент k_0 (1), который означает, что при существующем инфраструктурном оснащении железнодорожных терминалов транспортного узла Пусан (T_0) при реализации организационно-технологических мероприятий прирост суточного объема обработки контейнеров на железнодорожных терминалах составит от 4,4 до 8,8 %. Объем прироста контейнеропотока от текущих условий функционирования (T_0) до реализации мероприятий первого этапа (T_1):

$$T_{0 \rightarrow 1} = \begin{cases} V_0^{max} \leq V_0 + (k_0 \times V_{пере}^{max}) \\ k_0 = \frac{F_{пере_это}^{узел_max} - \left(\frac{\sum_{y=1}^n V_{0,y}}{n}\right)}{\left(\frac{\sum_{y=1}^n V_{пере,y}^{max}}{n}\right)} = \frac{3175 - \left(\frac{2097+1987+2345+2165+1970}{5}\right)}{\left(\frac{20642+23645+24531+25608+26434}{5}\right)} = 0,044. \\ 0,044 \leq k_1 < 0,088 \end{cases} \quad (1)$$

Экономическое обоснование затрат на этапное развитие транспортного узла и увеличение объема переработки контейнеропотока (2):

$$T_{0 \rightarrow 1} = \begin{cases} |V_0^{max} - V_1^{max}| = \Delta V > \sum_{n=1}^x F_n^{эл\ TУ} \\ T_v^{обп} \rightarrow max \\ C_0^{pre} + C_1^{lost} \geq \sum_{f=1}^m C_n^f \end{cases}, \quad (2)$$

где V_n – суточные объемы обработки поступающих контейнеров на n -м этапе ($n = 0, 1, 2, 3, \dots, x$), конт./сут.; V_n^{max} – максимальные суточные объемы обработки поступающих контейнеров на n -м этапе ($n = 0, 1, 2, 3, \dots, x$), конт./сут.; k_n – коэффициент на этапе « n » ($n = 0, 1, 2, 3$); $V_{пере}^{max}$ – максимальные объемы переработки контейнеров; $\sum_{n=1}^x F_n^{эл\ TУ}$ – перерабатывающая способность элементов транспортного узла, конт./сут.; $T_v^{обп}$ – время обработки контейнеров, поступающих на терминалы, ч.; $\sum_{f=1}^m C_n^f$ – стоимость развития факторов f , влияющих на перерабатывающую способность элементов транспортного узла на n -м этапе, у.е.; C_n^{pre} – стоимость выполнения технологических операций с контейнерами и транспортом на n -м этапе, у.е.; C_n^{lost} – стоимость потерь на n -м этапе (например, издержки из-за необработанных объемов контейнеров), у.е. Развитие перерабатывающей способности транспортного узла на первом этапе возможно при выполнении условий, обозначенных в формулах (1)–(2).

Мероприятия первого этапа развития транспортного узла Пусан направлены на минимизацию времени нахождения транспортных средств на объектах транспортного узла путем ускорения грузовых операций. Продолжительность нахождения железнодорожного и автомобильного транспорта в транспортном узле $B_{общ}^{тр}$ состоит из следующих элементов:

$$B_{общ}^{тр} = B_{раб}^{тр} + B_{ожж}^{тр} + B_{дви}^{тр},$$

где $B_{раб}^{тр}$ – продолжительность грузовых операций с транспортом, ч; $B_{ожж}^{тр}$ – время простоя транспорта в ожидании операций, ч; $B_{дви}^{тр}$ – затраты времени на перемещение транспорта между объектами транспортного узла, ч. Продолжительность выполнения грузовых операций на терминалах зависит от производительности используемого подъемно-транспортного оборудования $P_{кр}^n$:

$$P_{кр}^n = \frac{V_{пл.} + V_{нов.}}{B_{раб.}^{кр} + B_{ожж.}^{кр}},$$

где $B_{раб.}^{кр}$ – время работы подъемно-транспортного оборудования, ч; $B_{ожж.}^{кр}$ – время непроизводительного простоя подъемно-транспортного оборудования, ч; $V_{пл.}$ – количество контейнеров, хранящихся на контейнерной площадке, конт., $V_{нов.}$ – количество поступающих контейнеров, конт.

С помощью теоретико-множественной модели в работе расписаны факторы, влияющие на перерабатывающую способность железнодорожного транспорта $\{WT_{тр}^3, S_{тр}^3\}$, автомобильного транспорта $\{WT_{тр}^2, S_{тр}^2, PT_{ворот}^2\}$, железнодорожного грузового терминала $\{S_{кр}^3, P_{кр}^3, P_{кон}^2, PT_{кон}^2, N_{эт}^2\}$, морского порта $\{WT_{тр}^1, S_{тр}^1, S_{кр}^{1,2}, P_{кр}^{1,2}, P_{кон}^1, PT_{кон}^1, N_{эт}^1\}$ [7]. Повышение эффективности работы объектов транспортного узла возможно за счет ускорения грузовых и технологических операций с транспортными средствами и, соответственно, увеличения объемов переработки контейнеров:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min}(WT_{тр}^{1,2,3}, PT_{ворот}^2) \rightarrow \text{Min}(B_{ожж.}^{тр}) \\ \text{Min}(S_{тр}^{1,2,3}) \rightarrow \text{Min}(B_{дви}^{тр}) \end{array} \right\} \rightarrow \text{Min}(B_{общ.}^{тр})$$

$$\therefore \frac{24}{\text{Min}(B_{общ.}^{тр})} \times N_{тр} \rightarrow \text{Max}(N_{тр}^{дос.})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max}(S_{\text{кр}}^{1,2,3}) \rightarrow \text{Min}(B_{\text{раб.}}^{\text{кр}}) \\ \text{Max}(P_{\text{кон}}^{1,2}, PT_{\text{кон}}^{1,2}, N_{\text{эт}}^{1,2}) \rightarrow \text{Max}(V_{\text{пл.}}) \end{array} \right\} \rightarrow \text{Max}(P_{\text{кр}}^n)$$

$$\therefore \text{Max}(P_{\text{кр}}^n) \times N_{\text{кр}} \rightarrow \text{Max}(N_{\text{кр}}^{\text{доп.}}),$$

где $WT_{\text{тр}}^n$ – время простоя транспортных средств в ожидании технологических и грузовых операций, $S_{\text{тр}}^n$ – скорость движения транспортных средств (маршруты движения: причал порта – железнодорожный терминал, $n = 1$; причал порта – терминал порта, $n = 2$; пути железнодорожной станции, $n = 3$); $S_{\text{кр}}^n$ – технико-эксплуатационное состояние подъемно-транспортного оборудования; $P_{\text{кр}}^n$ – производительность подъемно-транспортного оборудования (зоны работы: судно-причал, $n = 1$; причал-автотранспорт, $n = 2$; автотранспорт – железнодорожный терминал, $n = 3$; железнодорожный терминал – подвижной состав, $n = 4$); $P_{\text{кон}}^n$ – технология складирования контейнеров; $PT_{\text{кон}}^n$ – срок хранения контейнера; $N_{\text{эт}}^n$ – количество этапов переработки контейнеров (контейнерные терминалы морского порта, $n = 1$; контейнерные терминалы железнодорожного транспорта, $n = 2$); $PT_{\text{ворот}}^2$ – затраты времени автотранспорта для проезда контрольно-пропускного пункта (КПП) порта; $N_{\text{тр}}^{\text{доп.}}$ – доступное количество транспортных средств; $N_{\text{тр}}$ – количество транспортных средств.

В табл. 1 представлены мероприятия и эффект их реализации на первом этапе развития транспортного узла.

Таблица 1

Эффективность организационно-технологических мероприятий, направленных на развитие перерабатывающей способности транспортного узла Пусан

Объекты	Наименование мероприятия	Предполагаемый эффект
Автотранспорт	Планирование процесса распределения автомобилей по объектам и участкам	Сокращение времени простоя транспортных средств в ожидании операций
	Ускорение процесса прохождения КПП	
Железнодорожный транспорт	Минимизация времени подачи и уборки вагонов	
	Изменение режима работы	
	Увеличение штата сотрудников	
Терминалы	Увеличение количества работников для управления подъемно-транспортным оборудованием	Увеличение производительности подъемно-транспортного оборудования
	Увеличение количества инженерного персонала для технического обслуживания подъемно-транспортного оборудования	
	Изменения технологии складирования контейнеров, увеличение ярусов хранения	Увеличение емкости и повышение эффективности использования площади
	Распределение контейнеров по этапам переработки	
Общее	Увеличение порога ограничения скорости движения транспортных средств	Ускорение перемещения транспорта

2) *Технические мероприятия.* Технические мероприятия второго этапа, направленные на развитие транспортного узла Пусан, рассматриваются с двух позиций. Первое направление – это увеличение количества автомобильных транспортных средств, осуществляющих внутритерминальные перевозки контейнеров, при этом необходимо обеспечить рациональное количество автотранспорта, чтобы не снизить маневренность транспорта на пространственно-ограниченной территории порта и возникновения аварийных ситуаций. Поэтому эффективность данного мероприятия будет связана с установлением максимального количества используемого автотранспорта и увеличением порога ограничения скорости движения транспортного средства, а также переформирование маршрутов движения транспорта между объектами транспортного узла.

Второй блок технических мероприятий направлен на увеличение количества погрузочно-разгрузочного оборудования, ограничением является высокая стоимость механизмов. Новый порт Пусан

осуществляет обновление парка причального оборудования и повышает уровень автоматизации погрузочно-разгрузочных работ на терминалах. Важным вопросом является выбор оптимального места размещения оборудования с учетом его эксплуатационных характеристик [8].

Объем прироста контейнеропотока от мероприятий первого этапа развития транспортного узла (T_1) до реализации мероприятий второго этапа (T_2):

$$T_{1 \rightarrow 2} = \begin{cases} V_1^{max} \leq V_1 + (k_1 \times V_{пере}^{max}) \\ k_1 = \frac{F_{пере_эт1}^{узел_max} - \left(\frac{\sum_{y=1}^n V_{0,y}}{n}\right)}{\left(\frac{\sum_{y=1}^n V_{пере,y}^{max}}{n}\right)} \\ 0,088 \leq k_1 < 0,132 \end{cases} . \quad (3)$$

Экономическая эффективность второго этапа развитие транспортного узла (10):

$$T_{1 \rightarrow 2} = \begin{cases} |V_1^{max} - V_2^{max}| = \Delta V > \sum_{n=1}^x F_n^{эл\ ТУ} \\ T_v^{обp} \rightarrow \max \\ C_1^{pre} + C_2^{lost} \geq \sum_{f=1}^m c_n^f \end{cases} . \quad (4)$$

Развитие перерабатывающей способности транспортного узла на втором этапе возможно при выполнении условий, обозначенных в формулах (3)–(4). Значение коэффициента k_0 (9) означает, что при реализации технических мероприятий второго этапа суточный прирост объема обработки контейнеров на железнодорожных терминалах составит от 8,8 до 13,2 %. Мероприятия второго этапа развития транспортного узла Пусан направлены на определение оптимального количества подъемно-транспортного оборудования $N_{кр}^{кон}$ и транспортных средств для освоения прогнозных значений контейнеропотока $N_{тр}^{кон}$:

$$N_{тр}^{кон} = N_{тр} \times N_{тр_1}^{кон} \times \frac{2440}{B_{общ}^{тр}}$$

$$N_{кр}^{кон} = N_{кр} \times \frac{2440}{B_{общ}^{кр}}$$

где $N_{тр_1}^{кон}$ – количество контейнеров на одном транспортном средстве, конт.

Реализация мероприятий по увеличению перерабатывающей способности объектов транспортного узла за счет увеличения количества транспортных средств и подъемно-транспортного оборудования, а также грузоподъемности подъемно-транспортного оборудования, зависит от окружающей среды, имеющейся площади, инфраструктуры, интенсивности и количества обрабатываемых поездов, автомобилей, вместимости грузовых фронтов и т.д. [9]. Факторы, относящиеся к блоку технических мероприятий второго этапа и влияющие на перерабатывающую способность железнодорожного транспорта $\{N_{тр}^3, C_{кр}^4, N_{кр}^4\}$, автомобильного транспорта $\{N_{тр}^2\}$, железнодорожного грузового терминала $\{N_{кр}^3, C_{кр}^3\}$, морского порта $\{N_{тр}^1, N_{кр}^{1,2}, C_{кр}^{1,2}\}$. Определение максимально возможного количества используемых транспортных средств и подъемно-транспортного оборудования должно основываться на предельном значении:

$$\begin{aligned} \text{Max}(N_{тр}^{1,2,3}) &\rightarrow \text{Max}(N_{тр}^{кон}) \\ \text{Max}(N_{кр}^{1,2,3,4}) &\rightarrow \text{Max}(N_{кр}^{кон}) \\ \text{Max}(C_{кр}^{1,2,3,4}) &\rightarrow \text{Min}(B_{общ}^{кр}) \rightarrow \text{Max}(N_{кр}^{кон}), \end{aligned}$$

где $N_{тр}^n$ – количество транспортных средств (маршруты движения: причал порта – железнодорожный терминал, $n = 1$; причал порта – терминал порта, $n = 2$; пути железнодорожной станции, $n = 3$); $N_{кр}^n$ – количество подъемно-транспортного оборудования; $C_{кр}^n$ – грузоподъемность подъемно-транспортного оборудования, (зоны работы: судно-причал, $n = 1$; причал-автотранспорт, $n = 2$; автотранспорт – железнодорожный терминал, $n = 3$; железнодорожный терминал – подвижной состав, $n = 4$).

В табл. 2 представлены мероприятия и эффект их реализации на втором этапе развития транспортного узла.

Таблица 2

Эффективность технических мероприятий, направленных на развитие перерабатывающей способности транспортного узла Пусан

Объект	Наименование мероприятия	Предполагаемый эффект
Автомобильный транспорт	Приобретение дополнительных транспортных средств	Увеличение объёмов переработки контейнеров
Железнодорожный транспорт	Увеличение количества вагонов в составе поезда	
	Прием и обработка дополнительных поездов	
Терминалы	Установка дополнительного оборудования	
	Повышение эксплуатационных показателей с помощью высокопроизводительного оборудования	

3) *третий этап*. Третий этап представлен инфраструктурными мероприятиями, которые в перспективе необходимы для организации континентальной железнодорожной магистрали, соединяющей транскорейскую железную дорогу и азиатскую транспортную сеть. В июне 2022 года к западу от Нового порта Пусан был построен шестой причал, в 2023–2024 годах планируется завершить строительство дополнительных причалов [10]. Строительство железнодорожной инфраструктуры для обслуживания западного контейнерного терминала будет завершено в 2026 году, как продолжение железнодорожных путей от Северного железнодорожного терминала [11]. Осуществляется строительство нового порта Чинхэ (2-й Новый порт Пусан), включающий 22 причала для обработки контейнеровозов (рис. 4).

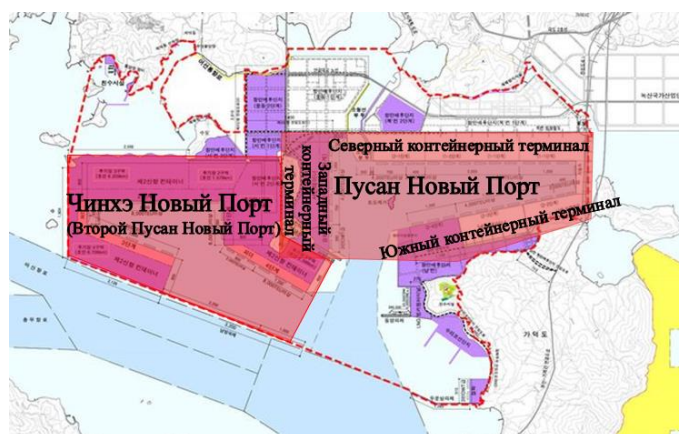


Рис. 4. Схема расположения второго Нового порта Пусан и западного контейнерного терминала

Увеличение доли контейнеропотока между вторым (T_2) и третьим этапами развития транспортного узла (T_3) при реализации инфраструктурных решений соответствует значениям коэффициента k_0 от 13,2 до 17,6 %:

$$T_{2 \rightarrow 3} = \begin{cases} F_{\text{пере_эт3}}^{\text{узел_max}} < 2F_{\text{пере_эт0}}^{\text{узел_max}} \\ V_2^{\text{max}} \leq V_2 + (k_2 \times V_{\text{пере}}^{\text{max}}) \\ k_2 = \frac{F_{\text{пере}}^{\text{узел_max}} - \left(\frac{\sum_{y=1}^n V_{0,y}}{n} \right)}{\left(\frac{\sum_{y=1}^n V_{\text{пере},y}^{\text{max}}}{n} \right)} \\ 0,132 \leq k_2 < 0,176 \end{cases} \quad (5)$$

Экономическая эффективность третьего этапа развитие транспортного узла (17):

$$T_{2 \rightarrow 3} = \begin{cases} |V_2^{max} - V_3^{max}| = \Delta V > \sum_{n=1}^x F_n^{эл\ TV} \\ T_v^{обп} \rightarrow max \\ C_2^{pre} + C_3^{lost} \geq \sum_{f=1}^m c_n^f \end{cases} . \quad (6)$$

Развитие перерабатывающей способности транспортного узла на третьем этапе возможно при выполнении условий, обозначенных в формулах (5)–(6). Факторы, влияющие на перерабатывающую способность объектов транспортного узла Пусан в рамках третьего этапа развития: железнодорожный транспорт $\{N_{грф}^4, L_{грф}^4, C_{грф}^4\}$, автомобильный транспорт $\{N_{ворот}^2\}$, железнодорожный терминал $\{N_{грф}^3, L_{грф}^3, C_{грф}^3, A_{пл}^2, UA_{пл}^2\}$, морской порт $\{N_{грф}^1, L_{грф}^1, C_{грф}^1, DE_{грф}^1, A_{пл}^1, UA_{пл}^1\}$. Перерабатывающая способность инфраструктурных объектов транспортного узла Пусан зависит от индивидуальных параметров функционирования и имеющегося подъемно-транспортного оборудования:

$$\begin{aligned} F_{пог-раз}^{ЖД} &= C_{грф} \times N_{тр-1}^{кон} \\ F_{хр} &= \left(\frac{A_{пл}}{A_{кон-1}} \right) \times \left(\frac{UA_{пл}}{A_{пл}} \right) \times N_{эт} \\ F_{про}^{ворот} &= \frac{2440}{B_{ожи}^{тр}} \times N_{ворот} \\ F_{пог-раз}^{причал} &= N_{рд} \times B_{общ}^{кр} \times PPP \times N_{кр} \times C_{кр} \times \frac{B_{раб}^{тр}}{B_{общ}^{тр}} \times KR \times KDS \times KBP \times KK \times KPP, \end{aligned}$$

где $F_{пог-раз}^n$ – перерабатывающая способность подъемно-транспортного оборудования (n – место размещения); $C_{грф}^n$ – вместимость грузового фронта, ед. транспорта; $F_{хр}$ – емкость терминала, конт.-мест; $A_{пл}^n$ – площадь рассматриваемого терминала, м²; $A_{кон-1}$ – площадь, занимаемая одним контейнером, м²; $UA_{пл}^n$ – фактическая вместимость терминала (контейнерные площадки морского порта, $n = 1$; контейнерные площадки железнодорожного транспорта $n = 2$), конт.-мест; $F_{про}^{ворот}$ – пропускная способность КПП порта, ед. транспорта; $N_{ворот}$ – количество КПП на территории порта, шт.; PPP – процент причала для обслуживания; KR – коэффициент работы оборудования; KDS – коэффициент движения судов; KBP – коэффициент внутрисудовой передачи; KK – коэффициент конверсии; KPP – коэффициент потери работы.

Развитие инфраструктуры напрямую влияет на перерабатывающую способность объектов транспортного узла и требует значительных финансовых средств [12]. Третий этап является завершающим этапом развития транспортного узла путем изменения всех влияющих факторов.

$$\begin{aligned} \text{Max}(N_{грф}^{3,4}, L_{грф}^{3,4}) &\rightarrow \text{Max}(C_{грф}) \rightarrow \text{Max}(F_{пог-раз}^{ЖД}) \\ \text{Max}(A_{пл}^{1,2}, UA_{пл}^{1,2}) &\rightarrow \text{Max}(F_{хр}) \\ \text{Max}(N_{ворот}^2) &\rightarrow \text{Max}(F_{про}^{ворот}) \\ \text{Max}(N_{грф}^1, L_{грф}^1, C_{грф}^1, DE_{грф}^1) &\rightarrow \text{Max}(PPP) \rightarrow \text{Max}(F_{пог-раз}^{причал}), \end{aligned}$$

где $N_{грф}^n$ – количество грузовых фронтов; $L_{грф}^n$ – длина грузового фронтов; $DE_{грф}^n$ – емкость площадок причала; $N_{ворот}^2$ – количество пунктов пропуска автотранспорта на территории порта, ($n = 1$, судно – причал; $n = 2$, причал – автотранспорт; $n = 3$, автотранспорт – железнодорожная площадка; $n = 4$, железнодорожная площадка – железнодорожный транспорт).

В табл. 3 представлены мероприятия и эффект их реализации на третьем этапе развития транспортного узла.

Таблица 3

Эффективность инфраструктурных решений, направленных на развитие перерабатывающей способности транспортного узла Пусан

Объект	Наименование мероприятия	Предполагаемый эффект
Автомобильный транспорт	Увеличение количества пунктов пропуска порта	Увеличение пропускной способности КПП
Железнодорожный транспорт и терминал	Увеличение количества погрузочно-разгрузочных путей	Увеличение перерабатывающей способности железнодорожной подсистемы транспортного узла
	Удлинение железнодорожных путей	
	Расширение контейнерной площадки	
	Совершенствование внутритерминальных перемещений	
Порт	Увеличение количества причалов	Увеличение перерабатывающей способности причальной стенки
	Расширение линии причала	
	Расширение контейнерной площадки	Увеличение перерабатывающей способности терминалов порта
	Совершенствование внутритерминальных перемещений	

Организация морских контейнерных перевозок остается основным инструментом международной внешней торговли для Республики Корея. Процесс возобновления железнодорожного сообщения корейского полуострова с континентальной транспортной сетью является ключевым вопросом развития транспортного комплекса Южной Кореи. Для усиления роли транспортного узла Пусан в данном проекте, необходимо строительство за припортовой станцией Новый порт Пусан терминала «сухой порт» (ICD) с функцией таможенного оформления международных грузов и формирования контейнерных поездов, в перспективе возможно образование грузовой «деревни» [13]. Принятие решения о строительстве терминала «сухой порт» зависит от различных факторов: обоснование места размещения, технологические и инфраструктурные, экономические и правовые вопросы [14]. Поэтому четвертый этап развития транспортного узла Пусан предполагает строительство новых транспортных узлов и «сухих портов». Переход от третьего этапа развития (T_3) к четвертому этапу (T_4):

$$T_{3 \rightarrow 4} = \begin{cases} F_{\text{пере_эт4}}^{\text{узел_max}} \geq 2F_{\text{пере_это}}^{\text{узел_max}} \\ V_3^{\text{max}} \leq V_3 + (k_3 \times V_{\text{пере}}^{\text{max}}) \\ k_3 = \frac{F_{\text{пере}}^{\text{узел_max}} - \left(\frac{\sum_{y=1}^n V_{0,y}}{n}\right)}{\left(\frac{\sum_{y=1}^n v_{\text{пере},y}^{\text{max}}}{n}\right)} \\ 0,176 < k_3 \\ F_{\text{пере_эт3}}^{\text{max}} \leq V_3^{\text{max}} \\ T_v^{\text{обп}} \rightarrow \text{max} \\ C_3^{\text{pre}} + C_4^{\text{lost}} \geq \sum_{f=1}^m c_n^f \end{cases}.$$

Эффектом четвертого этапа развития является увеличение перерабатывающей способности всего транспортного узла, когда после реализации инфраструктурных мероприятий третьего этапа, количество поступающих контейнеров больше максимального значения перерабатывающей способности третьего этапа развития транспортного узла. В табл. 4 представлены мероприятия и эффект их реализации на четвертом этапе развития транспортного узла.

Таблица 4

Эффективность стратегических решений четвертого этапа, направленных на развитие перерабатывающей способности транспортного узла Пусан

Объект	Наименование мероприятия	Предполагаемый эффект
Транспортный узел	Строительство «сухого порта»	Увеличение перерабатывающей способности на рассматриваемой территории
	Строительство нового транспортного узла	

Перерабатывающая способность транспортного узла возрастает по мере реализации каждого этапа развития. Для достижения эффекта необходимо осуществлять комплексную реализацию мероприятий, так как этапы взаимосвязаны (рис. 5).



Рис. 5. Взаимосвязь этапов развития транспортного узла

Помимо вышеперечисленных эффектов, предлагаемые меры позволят сократить время транспортировки через транспортный узел и повысить качество взаимодействия морского и железнодорожного транспорта при организации континентальной железной дороги путем соединения с Транскорейской железной дорогой [15].

Выводы

Развитие транспортного узла Пусан обеспечит экономический эффект для участников логистического процесса и позволит повысить национальный имидж транспортной системы Республики Корея за счет:

а) создания новых международных транспортных коридоров путем предоставления комплекса транспортно-логистических услуг;

б) увеличения объема грузопотока международного сухопутного коридора, перевозимых грузов по транспортному участку Республики Корея;

в) обеспечения импортно-экспортных и международных железнодорожных перевозок в смешанном железнодорожно-водном сообщении.

В результате обеспечивается:

- расширение корейского рынка логистики;
- повышение конкурентоспособности корейской транспортной системы.

Для региона создаются следующие благоприятные условия:

- организация логистической деятельности с учетом местных условий и разработка перспективных направлений развития транспортной инфраструктуры в портах и в регионе;
- развитие экономического потенциала территорий, по которым проходят международные транспортные коридоры.

Реорганизация органов управления видами транспорта на уровне Правительства Республики Корея и создание Центра управления транспортного узла Пусан позволит:

- привлечь большой объем инвестиций в развитие инфраструктуры транспортного узла и повышение технологической эффективности мультимодальных перевозок;

- улучшить информационное обеспечение перевозочного процесса за счет своевременного предоставления необходимой информации каждому транспортному субъекту;
- сократить технологические задержки путем ускорения процесса коммуникации между транспортными средствами;
- рационально использовать существующие и проектируемые мощности инфраструктуры видов транспорта, входящих в международную зону.

Организация Транскорейской железнодорожной магистрали и сопутствующее развитие транспортного узла Пусан положительный эффект для участников транспортного процесса будет заключаться в следующем:

1 Для операторов железнодорожных перевозок:

- повышение операционной эффективности за счет систематического процесса координации и взаимосвязи с участниками товародвижения;
- увеличение прибыли за счет использования подвижного состава и железнодорожной инфраструктуры по мере роста объема перевозок;
- ускорение оборачиваемости подвижного состава.

2 Для международных логистических компаний, в том числе корейских:

- увеличение прибыли за счет повышения качества предоставляемых транспортно-логистических услуг до международного уровня [16];
- расширение выбора альтернативных маршрутов транспортировки.

3 Для морских портов:

- повышение уровня загруженности мощностей терминально-логистической инфраструктуры вследствие увеличения объемов перевалки;
- сокращение времени и стоимости перевозки за счет минимизации времени ожидания транспорта и груза, а также повышение пропускной способности пунктов пропуска порта.

Строительство нового «сухого порта» для обслуживания транспортного узла Пусан обеспечит [17]:

- сокращение стоимости и продолжительности процесса транспортировки, так как часть обрабатываемых грузов порта будет перенаправлена на оснащенные современным оборудованием терминалы вблизи транспортного узла Пусан [18];
- исключение обязательного присутствия представителей грузоотправителя в пункте перевалки грузов для совершения таможенных и иных операций, проводимых органами государственного контроля при прохождении товаров через территорию страны.

Присоединение Транскорейской железной дороги к континентальной транспортной сети и перспективные объемы международных железнодорожных перевозок требуют детального анализа информационных и технологических процессов транспортной логистики Республики Корея. Развитие транспортного узла Пусан необходимо для освоения увеличивающихся объемов поступающих грузов, что требует значительных финансовых затрат. Предлагаемые мероприятия этапов развития транспортного узла позволят сократить время перевозки через транспортный узел и повысить эффективность взаимодействия морского и железнодорожного транспорта с учетом перспективы соединения корейских и континентальных железных дорог, как следствие, снижая долю транспортных компонентов в себестоимости товара. Поэтому выбор эффективной стратегии развития транспортного узла и результативность принятых решений напрямую связаны с конкурентоспособностью транспортной системы региона.

Список литературы

1 **Ли, Т. Е.** Исследование существующих грузопотоков транспортного узла Пусан / Т. Е. Ли, А. С. Балаалаев // Научно-техническое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2020. – Т. 1. – С. 37–42.

2 **Козлов, П. А.** К теории транспортных узлов / П. А. Козлов, В. Ю. Пермикин, Н. В. Кашеева // Транспорт Урала. – 2013. – № 4(39). – С. 8–10. – ISSN 1815-9400.

References

1 **Lee, T. Y.** Study of the existing freight traffic of the Busan transport hub / T. Y. Lee, A. C. Balalaliev // Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century. – 2020. – Vol. 1. – P. 37–42.

2 **Kozlov, P. A.** Toward transport hub theory / P. A. Kozlov, V. Y. Permikin, N. V. Kashcheyeva // Transport of the Urals. – 2013. – No. 4(39). – P. 8–10. – ISSN 1815-9400.

- 3 **Ли, Т. Е.** Проблемы формирования и перспективы развития транспортных логистических цепей в Республике Корея / Т. Е. Ли, Р. Г. Король // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 6(90). – С. 48–57. – ISSN 1997-0722.
- 4 **Мамаев, Э. А.** Развитие транспортно-логистических услуг на припортовых железных дорогах в условиях цифровой трансформации отрасли / Э. А. Мамаев, В. Н. Зубков, Е. А. Чеботарева // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 4. – С. 43–49. – DOI 10.53883/20749325_2021_04_43.
- 5 **Кузьмин, Д. В.** Перспективы развития высокоскоростных железнодорожных перевозок Китая / Д. В. Кузьмин, В. В. Багинова, Шисюань Фен // Экономика железных дорог. – 2020. – № 3. – С. 78–83. – ISSN 1727-6500.
- 6 **Козлова, В. П.** Транспортные узлы: основные этапы развития и их роль в транспортной системе России / В. П. Козлова // Вестник транспорта. – 2004. – № 11. – С. 32–36.
- 7 **Нестерова, Н. С.** Теоретико-множественная модель мультимодальной транспортной сети / Н. С. Нестерова, В. А. Анисимов // Транспорт Урала. – 2016. – № 2(49). – С. 26–29. – DOI 10.20291/1815-9400-2016-2-26-29.
- 8 A study to establish a complex logistics network connecting port-continental railways (TKR, etc.) / E. K. Lee, J. W. Seo [et al.] // National Research Council for Economics, Humanities and Social sciences. – 2018. – P. 153–160.
- 9 Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенов [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19. – № 4. – С. 800–811. DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811.
- 10 The final report on research for establishment of master plan on rearrangement of railroad facilities in Busan and plan of development. – 2014. – P. 56–57.
- 11 2022's Preliminary feasibility study report – Busan port, Jinhae New port (phase 1) construction project / S. Y. Kim, etc. // Korea development institute. – 2022. – P. 2–14.
- 12 **Четчуев, М. В.** Метод оценки экономической эффективности проектов развития железнодорожных станций / М. В. Четчуев, О. Н. Числов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4(59). – С. 81–88. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_59_81.
- 3 **Lee, T. Y.** Problems of formation and prospects of development of transport logistics chains in the Republic of Korea / T. Y. Lee, R. G. Korol // Vestnik transporta Povolzhya. – 2021. – No. 6(90). – P. 48–57. – ISSN 1997-0722.
- 4 **Mamaev, E. A.** Development of transport and logistics services on port railways in digital transformation conditions / E. A. Mamaev, V. N. Zubkov, E. A. Chebotareva // Science and Technology in Transport. – 2021. – No. 4. – P. 43–49. – DOI 10.53883/20749325_2021_04_43.
- 5 **Kuzmin, D. V.** Prospects for the development of high-speed railways in China / D. V. Kuzmin, V. V. Baginova, Shixuan Fen // Railway Economics. – 2020. – No. 3. – P. 78–83. – ISSN 1727-6500.
- 6 **Kozlova, V. P.** Transport hubs: the main stages of development and their role in the transport system of Russia / V. P. Kozlova // Transport Massanger. – 2004. – No. 11. – P. 32–36.
- 7 **Nesterova, N. S.** Set-theoretical model of multimodal transport network / N. S. Nesterova, V. A. Anisimov // Transport of the Urals. – 2016. – No. 2(49). – P. 26–29. – DOI 10.20291/1815-9400-2016-2-26-29.
- 8 A study to establish a complex logistics network connecting port-continental railways (TKR, etc.) / E. K. Lee, J. W. Seo [et al.] // National Research Council for Economics, Humanities and Social sciences. – 2018. – P. 153–160.
- 9 Configuring terminal-warehouse infrastructure of transport hub basing on the development of method of economic-geographical differentiation of cargo flows / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. V. Trapenov [et al.] // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2022. – Vol. 19. – No. 4. – P. 800–811. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811.
- 10 The final report on research for establishment of master plan on rearrangement of railroad facilities in Busan and plan of development. – 2014. – P. 56–57.
- 11 2022's Preliminary feasibility study report – Busan port, Jinhae New port (phase 1) construction project / S. Y. Kim, etc. // Korea development institute. – 2022. – P. 2–14.
- 12 **Chetchuev, M. V.** Method for assessing economic efficiency of the projects for the development of railway stations / M. V. Chetchuev, O. N. Chislov // Siberian Transport University Bulletin. – 2021. – No. 4(59). – P. 81–88. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_59_81.

13 Грузовая деревня как новый этап развития ТЛЦ / С. П. Вакуленко, П. В. Куренков, Д. Ю. Роменский [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 10. – С. 4–9. – ISSN 0044-4448.

14 **Москвичев, О. В.** Системный анализ математических моделей размещения транспортно-логистических объектов различного уровня / О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2022. – Т. 81. – № 3. – С. 267–276. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276.

15 **Ли, Т. Е.** Обоснование этапности развития транспортного узла Пусан (Республика Корея) в условиях роста объема перевозок / Т. Е. Ли, Р. Г. Король // Транспорт Урала. – № 4(71). – 2021. – С. 52–58. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-52-57.

16 **Каширцева, Т. И.** Дополнительные услуги по терминально-складской переработке грузов / Т. И. Каширцева, М. М. Алаев // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 10. – С. 37–41. – ISSN 0044-4448.

17 **Рахмангулов, А. Н.** Оценка направлений развития систем «морской порт – «сухой» порт» методом имитационного моделирования / А. Н. Рахмангулов, Д. С. Муравьев // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3(31). – С. 54–72. – DOI 10.20291/2079-0392-2016-3-54-72.

18 **Покровская, О. Д.** Логистика терминалов : перспективное направление логистики / О. Д. Покровская, Е. К. Коровяковский // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 3(44). – С. 155–164. – ISSN 1815-588X.

13 Cargo village as a new stage of TLC development / S. P. Vakulenko, P. V. Kurenkov, D. Yu. Romensky [et al.] // Railway transport. – 2022. – No. 10. – P. 4–9. – ISSN 0044-4448.

14 **Moskvichev, O. V.** System analysis of mathematical models of placement of transport and logistics facilities of different levels / O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva // Russian Railway Science Journal. – 2022. – Vol. 81. – No. 3. – P. 267–276. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-3-267-276.

15 **Lee, T. Y.** Justification of the stages of development of the Busan transport hub (Republic of Korea) in the context of an increase in the volume of traffic / T. Y. Lee, R. G. Korol // Transport of the Urals. – No. 4(71). – 2021. – P. 52–58. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-4-52-57.

16 **Kashirtseva, T. I.** Additional services for terminal and warehouse cargo processing / T. I. Kashirtseva, M. M. Alaev // Railway transport. – 2017. – No. 10. – P. 37–41. – ISSN 0044-4448.

17 **Rakhmangulov, A. N.** Assessment of development options for «sea port – «dry» port» system using simulation method / A. N. Rakhmangulov, D. S. Muravev // Journal of USURT. – 2016. – No. 3(31). – P. 54–72. – DOI 10.20291/2079-0392-2016-3-54-72.

18 **Pokrovskaya, O. D.** Terminal logistics: promising direction for logistics / O. D. Pokrovskaya, E. K. Korovyakovsky // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2015. – No. 3(44). – P. 155–164. – ISSN 1815-588X.

T. Y. Lee, R. G. Korol

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE PHASED DEVELOPMENT OF THE BUSAN TRANSPORT HUB

Abstract. The project to unify the Korean Railways is essential to the competitiveness of international logistics. The Busan hub will be a key facility on the Trans-Korean Railway, which will need to be developed in the future to absorb the increasing volume of freight traffic. Therefore, the purpose of this work is to evaluate the effectiveness of measures for the staged development of the Busan transport hub. The tasks include a mathematical description of a staged transition between organizational, technological, technical and infrastructural measures. The subject of the study is the railway, port and motor transport subsystems of the Busan transport hub. The work was done using mathematical research methods. The paper proposes the creation of a transport hub control center, which carries out an operational exchange of information with the Busan Port Authority, KORAIL, terminals and regulatory authorities. The organization of the Transport Hub Control Center will increase the efficiency of multimodal transportation by eliminating duplication of tasks in the management and transfer of information between the subjects of the transport and logistics process. At the end of the article, the fourth stage of the development of the transport hub is considered in the form of

the creation of a new transport hub or "dry port", and the economic effect for the participants in the logistics process and the transport system of the Republic of Korea is also described.

Keywords: transport hub, dry port, transport and logistics center, Trans-Korean railway, Busan seaport.

For citation: Lee, T. Y. Assessment of the effectiveness of the phased development of the Busan transport hub / T. Y. Lee, R. G. Korol // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 217–230. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_2_217.

Сведения об авторах

Ли Тэк Енг

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Технология транспортных процессов и логистика»,
аспирант,
e-mail: emyahoo21@nate.com

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Технология транспортных процессов и логистика»,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой,
e-mail: kingkhv27@mail.ru

Information about the authors

Lee Taek Young

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair «Technology of Transport Processes and Logistics»,
Postgraduate Student,
e-mail: emyahoo21@nate.com

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair «Technology of Transport Processes and Logistics»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: kingkhv27@mail.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 656.2 : 004.4 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_231

*В. Д. Верескун, Д. Е. Притыкин, Б. Д. Дагдьян, А. В. Решетов, А. В. Мищенко***РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ ИМИТАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В РЕЖИМЕ
ИСПОЛНЕНИЯ НОРМАТИВНОГО ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ В РАМКАХ
УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА «ВИРТУАЛЬНАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА»**

Аннотация. В рамках реализации лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога» решается задача имитации движения поездов по реальному участку железной дороги с учетом исполнения нормативного графика движения поездов. Рассматриваются архитектура подсистемы и алгоритмы, которые реализуют имитационную модель автоматического движения поездов с возможностью исполнения нормативного графика, учитывая скоростные ограничения и сигналы автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН). Представлена структура взаимодействия данной подсистемы с учебно-лабораторным комплексом «Виртуальная железная дорога» (ВЖД). Описаны алгоритмы работы программной имитационной модели движения поезда. Рассмотрены варианты работы алгоритмов при различных значениях кодов АЛСН. Уделено внимание описанию программных технологий, использованных при разработке конечного программного обеспечения. Приведено описание работы программного обеспечения и результаты его внедрения в рамках комплекса ВЖД.

Ключевые слова: учебно-лабораторный комплекс, виртуальная железная дорога, имитационная модель поезда, C++, Qt.

Для цитирования: Разработка подсистемы имитации движения поездов в режиме исполнения нормативного графика движения в рамках учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога» / В. Д. Верескун, Д. Е. Притыкин, Б. Д. Дагдьян [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 231–239. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_231.

Введение

Имитационная модель движения поездов в рамках учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога» (ВЖД) [1] может быть представлена тремя реализациями: натурным учебно-лабораторным тренажерным комплексом подвижного состава, универсальным программным тренажером машиниста или же подсистемой имитационной модели автоматического движения поездов. Последняя из перечисленных подсистем обеспечивает задание необходимой загрузки участка в соответствии с реальным нормативным графиком движения.

Цель разработки

Целью разработки является создание подсистемы имитационной модели движения поездов без непосредственного участия человека, реализующей возможность исполнения соответствующего нормативного графика движения (НГД) с учетом скоростных ограничений и сигналов автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН).

Постановка задачи

Создание подсистемы имитации движения поездов направлено на решение следующих задач:

- имитация движения подвижного состава;
- реализация нештатных ситуаций;
- повышение уровня оперативной эффективности работников аппарата управления движением.

Подсистема имитации движения поездов в режиме исполнения НГД состоит из следующих программных компонентов:

- модель имитации движения поезда, исполняющего НГД с учетом скоростных ограничений и сигналов АЛСН;

- серверное программное обеспечение, реализующее запуск и завершение процессов имитационной модели поезда с параметрами, полученными от пользовательского приложения;
- пользовательское приложение, позволяющее определить параметры имитационных моделей поездов и запустить имитацию.

При разработке программного обеспечения на данном этапе проекта принимаются следующие допущения:

- не рассматриваются физические процессы, связанные с тяговыми и тормозными свойствами модели подвижного состава, модель движения поезда является кинематической;
- не учитывается электрификация участка.

Архитектура программного обеспечения имитационной модели поезда

В процессе разработки программного обеспечения, реализующего имитационную модель автоматического движения поезда, решены следующие задачи:

- разработан формат и механизм считывания конфигурационных файлов с информацией о станциях и НГД;
- разработаны алгоритмы, позволяющие осуществлять исполнение НГД с учетом ограничений скорости на участке;
- разработан клиентский программный модуль, который выполняет подключение и обмен данными с сервером ВЖД;
- разработано кроссплатформенное программное обеспечение, реализующее имитационную модель автоматического движения поезда, исполняющего НГД с учетом скоростных ограничений и сигналов АЛСН.

Программное обеспечение реализовано с применением клиент-серверной архитектуры. Клиентом является имитационная модель поезда. Клиент, посредством стека протоколов TCP/IP, выполняет подключение к серверу ВЖД, затем выполняется обмен данными. Взаимодействие с сервером осуществляется на протяжении всего времени работы клиентского приложения. Клиент отправляет серверу ВЖД данные о текущем положении и скорости имитационной модели поезда. Сервер ВЖД, получая данные о дуговой координате поезда, определяет его текущее положение на участке и отправляет полученные данные на пульт поездного диспетчера [2]. Кроме того, сервер ВЖД отправляет клиенту – имитационной модели – данные о текущем времени, текущий код АЛСН и дистанцию до сигнала.

На рис. 1 представлена структура взаимодействия комплексов в рамках учебно-лабораторного комплекса «Виртуальная железная дорога».

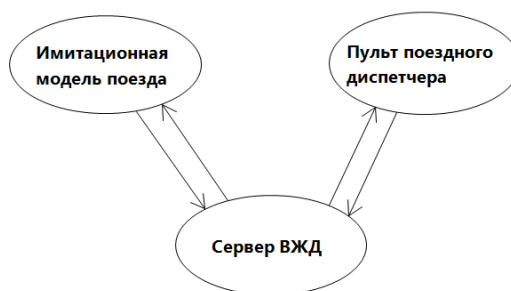


Рис. 1. Структура взаимодействия комплексов ВЖД

Клиентская часть реализована в виде кроссплатформенного консольного приложения на языке C++ с применением фреймворка Qt [3]. Для запуска приложения требуются следующие аргументы командной строки:

- `accel` – максимальное ускорение движения поезда;
- `maxspeed` – максимальная скорость движения поезда;
- `startpos` – начальное положение поезда (ордината);
- `startspeed` – начальная скорость движения поезда;
- `num` – номер поезда;
- `id` – идентификатор поезда.

Ограничения скорости движения определяются в соответствии с типом подвижного состава. Имитационная модель поезда может реализовать любой род службы подвижного состава. Аргумент

начального положения [4] позволяет установить относительное расположение поезда на участке. Аргумент, устанавливающий начальную скорость, позволяет запустить имитационную модель как в режиме стоянки, так и в движении по перегону. Идентификатор поезда используется клиентом для авторизации на сервере ВЖД.

После запуска приложения загружается список станций по маршруту и НГД поезда.

На рис. 2 представлена UML-диаграмма классов [5], реализующих функциональные возможности имитационной модели поезда.

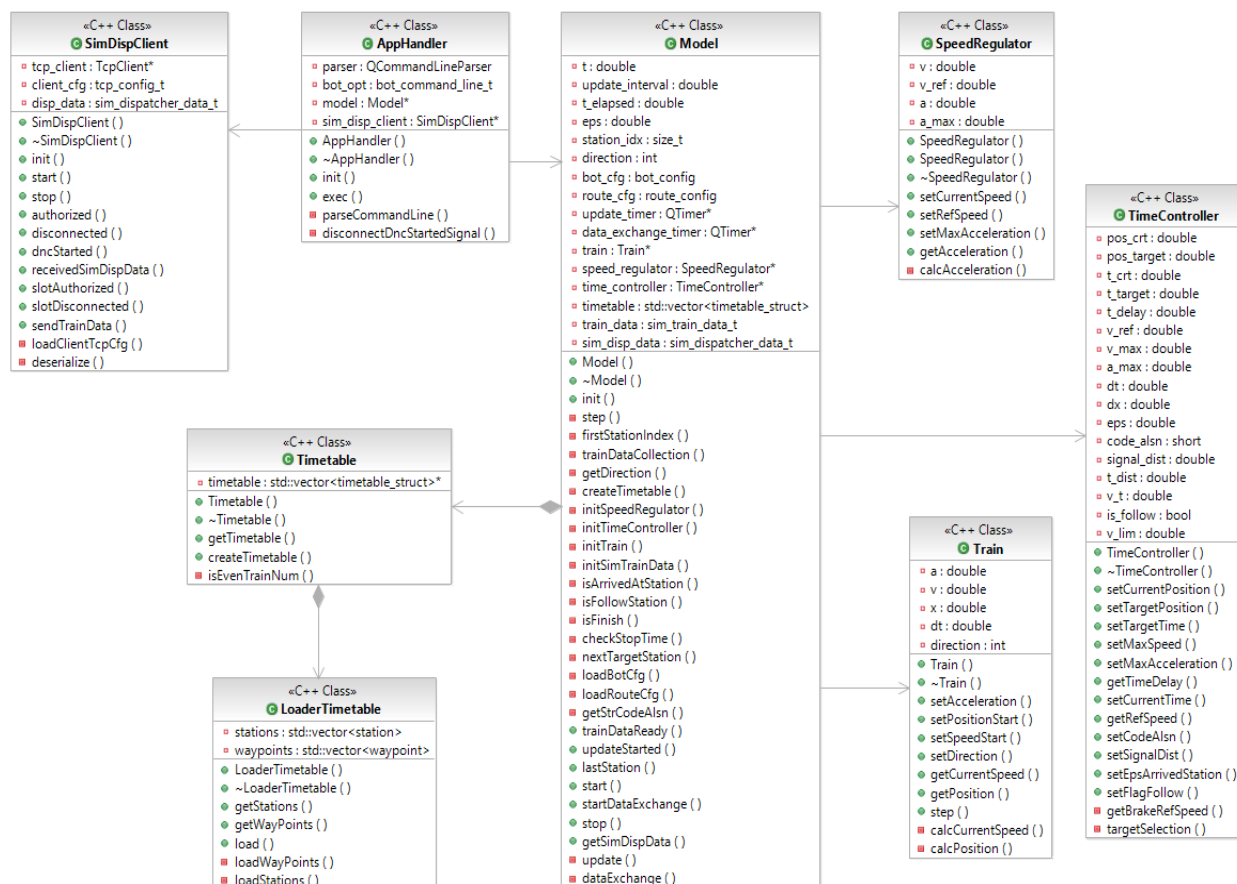


Рис. 2. Структура классов клиентской части имитационной модели поезда

Функциональную модель программы можно представить в виде следующих составляющих:

- НГД;
- регулятор времени хода;
- блок формирования программной скорости;
- блок расчета ограничений скорости;
- блок формирования кривой снижения скорости;
- регулятор скорости;
- поезд;
- сервер ВЖД.

Графически функциональная модель программы представлена на рис. 3.

Регулятор времени хода, принимая данные о времени прибытия и расстояния до станции, выполняет вычисление скорости движения, необходимой для исполнения НГД. Блок формирования кривой снижения скорости, принимая от сервера ВЖД код АЛСН и расстояние до сигнала, производит вычисление кривой снижения скорости [6].

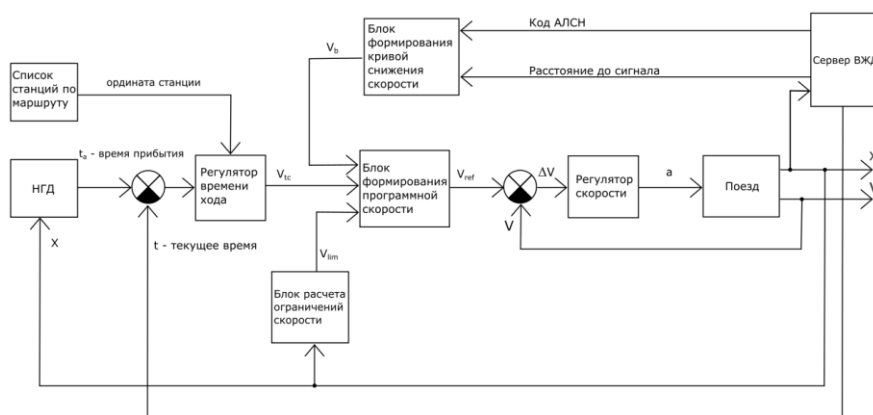


Рис. 3. Функциональная модель программы имитации движения поезда

Алгоритм расчета программной скорости движения поезда основан на следующем уравнении [7]:

$$\begin{cases} V_b = \sqrt{V_t^2 + 2a_{\max} \cdot k_t \cdot \text{dist}} \\ V_{\text{lim}} = F(x) \\ V_{tc} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \end{cases} \Rightarrow V_{\text{ref}} = \min(V_b, V_{\text{lim}}, V_{tc}),$$

где V_b – скорость по кривой снижения скорости;
 V_t – скорость у цели (станция либо светофор);
 a_{\max} – максимальное ускорение поезда;
 k_t – коэффициент плавности торможения;
 dist – дистанция до цели (станция либо светофор);
 V_{lim} – допустимая скорость с учетом ограничения на участке;
 $F(x)$ – функция ограничения скорости на участке;
 V_{tc} – скорость, рассчитанная регулятором времени хода;
 Δx – текущее расстояние до станции;
 Δt – текущее время хода, необходимое для выполнения НГД;
 V_{ref} – программная скорость движения.

Блок формирования программной скорости выбирает минимальное значение из следующих скоростей:

- скорость, рассчитанная регулятором времени хода;
- скорость по кривой снижения;
- допустимая скорость с учетом ограничения на участке.

Данный подход позволяет:

- 1) реализовать автоматическое движение имитационной модели поезда в соответствии с НГД и учетом ограничений скорости на участке;
- 2) осуществлять нагон в случае отставания от НГД.

Графически алгоритм формирования программной скорости движения поезда при различных сигналах светофора представлен на рис. 4–5.

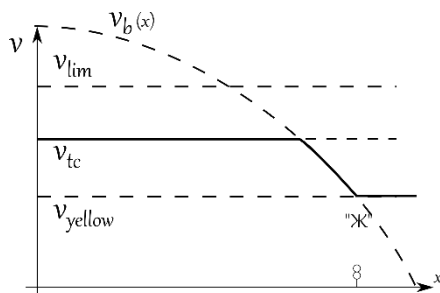


Рис. 4. Графическое изображение формирования требуемой скорости при желтом сигнале светофора

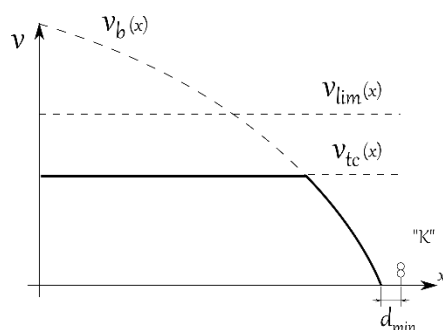


Рис. 5. Графическое изображение формирования требуемой скорости при красном сигнале светофора

Регулятор скорости принимает сформированную программную скорость и производит вычисление ускорения, необходимого для достижения требуемой скорости.

Алгоритм работы регулятора скорости поезда представлен в виде структурной схемы, изображенной на рис. 6.

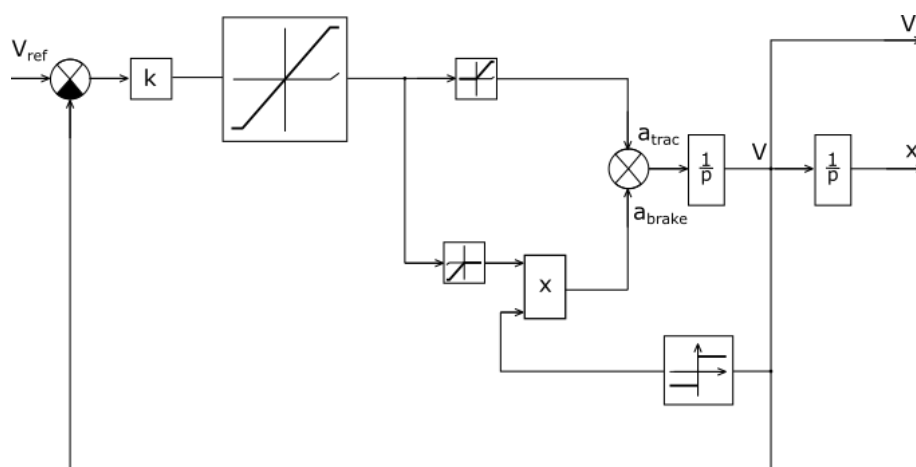


Рис. 6. Структурная схема регулятора скорости поезда

Движение поезда осуществляется исходя из следующих уравнений [8]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V, \\ \frac{dV}{dt} = a(x, V). \end{cases}$$

Программная модель поезда принимает ускорение, рассчитанное регулятором скорости, и с помощью интегрирования ускорения по времени производит вычисление скорости движения имитационной модели. Затем с помощью интегрирования скорости по времени выполняется вычисление относительного позиционирования имитационной модели.

Серверное программное обеспечение подсистемы

Серверное программное обеспечение при получении запроса от пользовательского приложения выполняет запуск и завершение процессов имитационных моделей поездов.

Программное обеспечение реализовано в виде кроссплатформенного консольного приложения на языке C++ с применением фреймворка Qt.

В процессе разработки серверной части подсистемы решены следующие задачи:

- разработан формат и механизм считывания конфигурационных файлов;
- разработан алгоритм управления процессами;
- разработан серверный программный модуль, который реализует протокол обмена данными с пользовательским приложением.

Пользовательское приложение является клиентом серверной части подсистемы. Сервер отправляет клиенту список имитационных моделей поездов, доступных для запуска. При получении от клиента запроса на запуск процессов сервер обрабатывает массив структур, который содержит параметры для запуска соответствующих процессов. Для информирования пользователя подсистемы сервер отправляет клиенту ответы о выполнении поступивших запросов.

Сервер хранит список станций по маршруту и НГД поездов. Список станций заранее определяется в конфигурационном файле `stations.xml`, который содержит ЕСП-код, наименование и ординату станции. НГД определяется в конфигурационном файле, название которого соответствует номеру поезда. Конфигурационный файл НГД содержит ЕСП-код станции, время прибытия и время отправления поезда.

Пользовательское приложение подсистемы

Пользовательское приложение предоставляет интерфейс для формирования списка имитационных моделей поездов, а также параметров, необходимых для запуска соответствующих процессов.

Программное обеспечение реализовано как кроссплатформенное оконное приложение на языке C++ с применением фреймворка Qt.

Клиентская часть приложения принимает от сервера список имитационных моделей поездов, доступных для запуска. Далее пользователь подсистемы при помощи интерфейса табличного элемента формирует список поездов, которые требуется запустить, а также вводит параметры, необходимые для запуска. Функционал приложения позволяет сохранять и загружать сформированный набор данных. Пункт меню «Настройки» позволяет пользователю установить настройки для связи с сервером. По нажатию кнопки Play серверу отправляется запрос на запуск процессов и массив структур, содержащий необходимые параметры. Завершение имитации выполняется нажатием кнопки Stop. Клиент обрабатывает полученные от сервера ответы, затем выводит информативные сообщения в текстовый элемент интерфейса.

На рис. 7 представлен пользовательский интерфейс приложения.

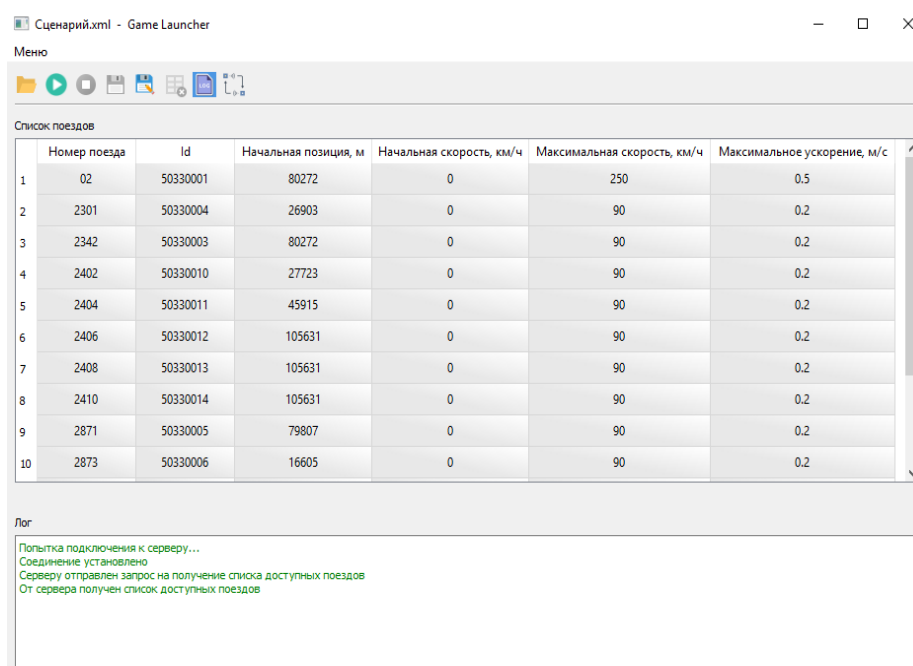


Рис. 7. Пользовательский интерфейс приложения

Заключение

В результате реализации подсистемы имитации движения поездов в режиме исполнения НГД выполнены следующие прикладные разработки:

- кроссплатформенное программное обеспечение, реализующее имитационную модель автоматического движения поезда, исполняющего НГД с учетом скоростных ограничений и сигналов АЛСН;
- кроссплатформенное пользовательское приложение, позволяющее определить параметры имитационных моделей поездов и запустить имитацию;

– кроссплатформенное серверное программное обеспечение, реализующее запуск и завершение процессов имитационной модели поезда с параметрами, полученными от пользовательского приложения.

Список литературы

- 1 Современные тренды образования в железнодорожной отрасли / Д. Е. Притыкин, А. В. Чернов, М. А. Бутакова [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 5. – С. 43–45. – DOI 10.34649/AT.2019.5.5.005.
- 2 **Ковалев, С. М.** Обеспечение взаимодействия тренажеров подвижного состава с системами управления движением железнодорожного транспорта / С. М. Ковалев, Б. Д. Дагддян // 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. – ISBN 978-5-907295-28-5.
- 3 Применение фреймворка Qt к разработке программного обеспечения тренажеров подвижного состава / А. Н. Гуда, Д. Е. Притыкин, С. В. Ковшиков, Б. Д. Дагддян // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : сборник научных трудов. Т. 1 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2018. – С. 40–43. – ISBN 978-5-88814-749-8.
- 4 Qt-средства для обработки параметров командной строки // Документация Qt : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qcommandlineparser.html> (дата обращения: 15.02.2023).
- 5 **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.
- 6 **Никифоров, Б. Д.** Автоматизация управления торможением поездов / Б. Д. Никифоров, В. И. Головкин, Ю. Г. Кутыев. – Москва : Транспорт, 1985. – 263 с.
- 7 **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Изд. 4-е., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Профессия, 2003. – 752 с. – ISBN 5-93913-035-6.
- 8 **Тарг, С. М.** Краткий курс теоретической механики : учебник для студентов технических вузов / С. М. Тарг. – Изд. 21-е, стер. – Москва : URSS, 2018. – 415 с. – ISBN 978-5-9710-5161-9.

References

- 1 Modern education trends in the railway industry / D. E. Pritykin, A. V. Chernov, M. A. Butakova [et al.] // Automation, Communication, Informatics. – 2019. – No. 5. – P. 43–45. – DOI 10.34649/AT.2019.5.5.005.
- 2 **Kovalev, S. M.** Ensuring interaction of train simulators with railway traffic control systems/ C. M. Kovalev, B. D. Dagldian // Modern development of science and technology: collection of scientific papers of the All-Russian National Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, 01–03 December 2020. – Rostov-on-Don : RSTU, 2020. – P. 142–146. – ISBN 978-5-907295-28-5.
- 3 Application of the Qt framework to the development of software for rolling stock simulators / A. N. Guda, D. E. Pritykin, S. V. Kovshikov, B. D. Dagldiyan // Actual problems and prospects for the development of transport, industry and the economy of Russia : collection of scientific papers. Vol. 1 : Technical Sciences. – Rostov-on-Don : RSTU, 2018. – P. 40–43. – ISBN 978-5-88814-749-8.
- 4 Qt-Tools for Handling Command Line Parameters // Qt Documentation : official site. – 2023. – URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qcommandlineparser.html> (date of access: 02/15/2023).
- 5 **Zabrodin, A. V.** Basics of designing information systems using the UML language : a textbook / A. V. Zabrodin, V. P. Bubnov. – Saint Petersburg : PGSTU, 2018. – 46 p. – ISBN 978-5-7641-1133-9.
- 6 **Nikiforov, B. D.** Automation of train braking control / B. D. Nikiforov, V. I. Golovkin, Yu. G. Kutiev. – Moscow : Transport, 1985. – 263 p.
- 7 **Besekersky, V. A.** Theory of automatic control systems / V. A. Besekersky, E. P. Popov. – 4th ed., revised and expanded. – Saint Petersburg : Profession, 2003. – 752 p. – ISBN 5-93913-035-6.
- 8 **Targ, S. M.** A short course in theoretical mechanics: a textbook for students of technical universities / S. M. Targ. – 21st ed., stereotypical. – Moscow : URSS, 2018. – 415 p. – ISBN 978-5-9710-5161-9.

V. D. Vereskun, D. E. Pritykin, B. D. Dagldian, A. V. Reshetov, A. V. Mishchenko

**DEVELOPMENT OF A SUBSYSTEM FOR SIMULATION OF TRAIN TRAFFIC
IN THE MODE OF PERFORMANCE OF THE NORMATIVE TRAFFIC SCHEDULE
AT THE EDUCATIONAL AND LABORATORY COMPLEX
“VIRTUAL RAILWAY”**

Abstract. The aim is to simulate the movement of trains along a real section of the railway, as part of the implementation of the laboratory complex “Virtual Railway” due to the implementation of the normative train schedule. The architecture of the subsystem and algorithms that implement a simulation model of automatic train movement with the possibility of fulfilling the standard schedule using speed limits and automatic locomotive signaling signals (ALSN) are considered. The structure of interaction of this subsystem with the educational and laboratory complex “Virtual Railway” (VR) is presented. The algorithms of the software simulation model of train movement are described. Variants of algorithm operation for different values of ALSN codes are considered. Attention is paid to the description of software technologies used in the development of the final software. The description of the software operation and the results of its implementation at the VR complex are given.

Keywords: educational and laboratory complex, virtual railway, train simulation model, C++, Qt.

For citation: Development of a subsystem for simulation of train traffic in the mode of performance of the normative traffic schedule at the educational and laboratory complex “Virtual Railway” / V. D. Vereskun, D. E. Pritykin, B. D. Dagldian [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 231–239. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_231.

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

Даглдян 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

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

Pritykin 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

Dagldian 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

Решетов Александр Вячеславович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),

Центр развития инновационных компетенций
(ЦРИК),

инженер,

e-mail: rav.personal@mail.ru

Мищенко Александр Владимирович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),

Центр развития инновационных компетенций
(ЦРИК),

электромеханический факультет,

студент, лаборант,

e-mail: alexandr.mishenko01@mail.ru

Reshetov Alexander Vyacheslavovich

Rostov State Transport University (RSTU),

Development of Innovation Competencies Center,

Engineer,

e-mail: rav.personal@mail.ru

Mishchenko Alexander Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),

Development of Innovation Competencies Center,

Electromechanical Faculty,

Student, Assistant,

e-mail: alexandr.mishenko01@mail.ru

А. И. Долгий, С. М. Ковалев, А. Н. Гуда

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ПЕРЕВОЗОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Аннотация. Рассматривается новая технология интеллектуального мониторинга процессов железнодорожных перевозок с использованием динамического метода главных компонент. Она включает рекурсивный алгоритм вычисления главных признаков и три статистических критерия, используемых в механизме принятия решений. Применение предложенной схемы демонстрирует реализуемость и эффективность рекурсивных алгоритмов адаптивного мониторинга сложных слабоформализованных процессов в онлайн-режиме.

Поскольку в большинстве технологических процессов происходят медленные, эволюционирующие изменения, такие как старение напольного оборудования, дрейфы датчиков, периодическое обслуживание и модернизация технических средств, ожидается, что предложенная в статье схема адаптивного мониторинга найдет широкое применение на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: интеллектуальный мониторинг, рекурсивный алгоритм вычисления, потоковые данные, слабоформализованные процессы, сортировочные станции, интеллектуальный анализ, машинное обучение, объем перевозок, пропускная способность.

Для цитирования: Долгий, А. И. Интеллектуальный мониторинг перевозочных процессов на основе динамического метода главных компонент / А. И. Долгий, С. М. Ковалев, А. Н. Гуда // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 240–251. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_240.

Введение

Технологии мониторинга возникли в результате эволюции ряда научных направлений в области контроля и диагностики, и в настоящее время широко используются для получения достоверных данных о поведении контролируемого объекта с целью повышения эффективности управления им. Интеллектуальный мониторинг (ИМ) отличается наличием дополнительной функции – извлечением знаний об объекте с целью использования их для прогнозирования его поведения при изменяющихся условиях функционирования. Основу ИМ составляют технологии интеллектуального анализа данных, машинного обучения и мягких вычислений [1–4].

Наиболее эффективным приложением ИМ являются слабоформализованные технологические процессы, для которых невозможно построение точных аналитических моделей в силу высокой степени динамичности и неопределенности исходной информации, изменчивости условий функционирования, нелинейности параметров процесса и необходимости обработки потоковых данных в онлайн-режиме. Характерными примерами слабоформализованных процессов являются процессы управления железнодорожными перевозками (ПП) и, в частности, технологические процессы, протекающие на железнодорожных сортировочных станциях.

Основной задачей управления сортировочной станцией является поддержание оптимального режима работы станции путем регулирования интенсивности подвода поездов, процессов расформирования составов на сортировочной горке, а также путем планирования и корректировки процессов составообразования. При этом выделяют две стадии управления ПП – планирование и оперативное управление [5]. На стадии планирования важно сбалансировать объем перевозок с пропускной способностью «ниток», а на стадии оперативного управления основной задачей является поддержание оптимальных режимов работы станции при различных изменяющихся условиях и состояниях ПП.

Решение поставленных задач возлагается на автоматизированные системы управления сортировочными станциями, которые обеспечивают контроль выполнения нормативных планов формирования и решают задачи по реализации этих планов. Однако основной проблемой здесь является то, что реальная эксплуатационная обстановка существенно отличается от нормативных условий: колеблются размеры вагонопотоков на прилегающих участках, изменяются объемы переработки на станции, возникают незапланированные перерывы в движении поездов, не обеспечивается готовность локомоти-

вов, колеблются продолжительности технологических операций и т. д. Все это предопределяет «неоптимальность» управления на основе сформированных ранее планов формирования и необходимость разработки новых моделей управления для подсистем АСУ ТП, обладающих способностью адаптации к реальным оперативным условиям. Поэтому принятый ОАО «РЖД» курс на повышение эффективности ПП диктует необходимость не ограничиваться разработкой нормативно-технологических документов и типовых методик организации ПП, необходимо добиваться их адаптации к реальной поездной обстановке и непрерывно изменяющимся условиям функционирования контролируемого объекта. Следует разрабатывать методики и алгоритмы управления, способные оперативно реагировать на изменения расчетных нормативов ПП в соответствии с изменяющимися технологическими ситуациями и состояниями ПП.

В настоящей статье рассматриваются концептуальные основы новой адаптивной технологии интеллектуального мониторинга слабоформализованных технологических процессов в изменяющихся условиях функционирования объекта автоматизации.

1 Объекты интеллектуального мониторинга

Условия работы сортировочной станции характеризуются рядом режимов или состояний, определяющих способность станции перерабатывать поступающий на ее вход вагонопоток [5]. Текущее состояние ПП на станции зависит от множества количественных и качественных факторов: содержания рабочего парка вагонов, интенсивности вагонопотоков на прилегающих участках, своевременности обеспечения сформированных составов локомотивами, наличия межоперационных простоев вагонов, состояния технических устройств и оборудования, квалификации работников и др. Достаточно объективной характеристикой режима работы станции является зависимость между рабочим парком вагонов на станции и временем их переработки. Качественный характер этой зависимости приведен на рис. 1. На основе данной зависимости выделяют четыре основных режима работы станции и, соответственно, четыре состояния ПП на станции.

Нормальный режим (см. рис. 1) характеризует своевременное выполнение технологических операций при отсутствии задержек поездов и межоперационных простоев вагонов. *Оптимальный режим* характеризуется теми же условиями, но при этом дополнительно обеспечивается минимальное время нахождения вагонов на станции. *Тяжелый режим* характеризуется содержанием избытка вагонного парка и наличием межоперационных простоев вагонов. *Критический (нештатный) режим* кроме содержания избытка вагонного парка и наличия межоперационных простоев вагонов отличают задержки поездов по неприему.

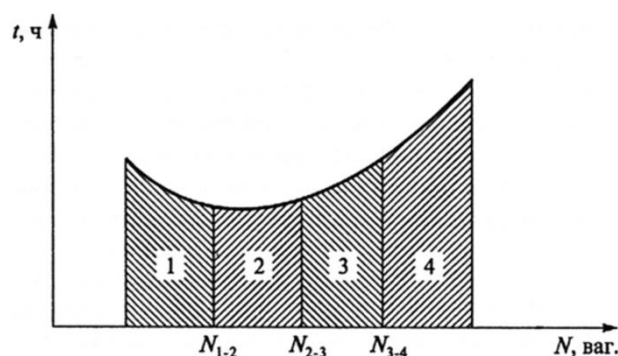


Рис. 1. Режимы работы сортировочной станции:
1 – оптимальный, 2 – нормальный, 3 – тяжелый, 4 – критический

Одной из важных задач оперативного управления ПП является управление вагонопотоками путем регулирования насыщения участков поездами. Состояния ПП на участках характеризуются рядом параметров, среди которых важнейшими являются степень насыщенности участков поездами, интенсивности входных-выходных потоков и размеры движения. Поэтому для объективной категоризации состояний ПП на участках движения целесообразно использовать зависимости интенсивностей входных и выходных вагонопотоков и зависимость размеров движения от насыщенности участка поездами (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость размеров движения от насыщенности участка поездами

На основе приведенных зависимостей можно выделить основные режимы поездной работы и, соответственно, основные состояния ПП на участке. Нормальный режим (область 1) характеризуется выполнением нормативного графика движения поездов. В оптимальном режиме (область 2) к тому же реализуются максимальные размеры движения. Тяжелый режим (область 3) характеризуется перенасыщением участка поездами. В критическом режиме (область 4) перенасыщение участка поездами приводит к дефициту локомотивных бригад и необходимости «бросания» поездов на промежуточных станциях.

В зависимости от состояний ПП решаются различные задачи управления поездной работой. В нормальном и оптимальном режимах требуется обеспечение установленных нормативов графиков движения, предотвращение перенасыщения участков поездами и станций вагонным парком. Тяжелые и критические режимы соответствуют особым классам нештатных состояний ПП, требующих быстрой ликвидации перенасыщения участков поездами путем предотвращения распространения сбоев движения поездов и восстановление нормального режима.

Очевидно, что в нештатных состояниях наиболее сложно принимать оптимальные решения, поэтому важнейшей задачей ИМ является предсказание появления особых классов критических или нештатных состояний ПП, негативно влияющих на эффективность управления.

Интеллектуальный мониторинг, осуществляемый на основе извлечения знаний о состояниях ПП и динамики их развития в изменяющихся условиях, реализует новое интегративное качество, позволяющее прогнозировать и предупреждать негативные варианты развития ПП. Отсюда вытекает основная функция интеллектуального мониторинга – прогнозирование, а основными объектами прогнозирования являются состояния ПП.

В настоящее время часть задач по прогнозированию ПП решается в интегрированной системе организации вагонопотоков СЕТЬ-2, являющейся одной из подсистем автоматизированной системы организации движения поездов (АСОВ). Однако на сегодня эффективность прогностических моделей, реализованных в АСОВ, оказывается недостаточной, в первую очередь, в силу названных выше причин, связанных с изменчивостью внешних условий и существенными колебаниями параметров ПП. Для решения этих задач представляется целесообразным дополнить АСОВ новым классом прогностических моделей, реализованных в подсистеме интеллектуального мониторинга ПП.

2 Постановка задачи

Как было отмечено, реальный ПП характеризуется множеством нештатных состояний, поэтому одной из важнейших задач ИМ является обнаружение в онлайн-режиме аномальных (нештатных) состояний, нарушений и иных сбоев в мониторируемом объекте.

Для диагностирования нарушений важно располагать математической моделью ПП, однако, в силу чрезвычайной сложности технологических процессов перевозок построение для них каких-либо аналитических мониторинговых моделей практически невозможно. Ситуацию облегчает то, что для подобного рода процессов имеется возможность собрать большое количество данных и привлечь для их обработки методы искусственного интеллекта с целью построения подходящих прогностических или мониторинговых моделей. Анализ главных компонент (РСА) является наиболее популярным методом многофакторного анализа, используемым для этих целей и успешно применяемым во многих приложениях [6].

Основная идея РСА состоит в том, чтобы уменьшить размерность набора данных, состоящего из большого количества взаимосвязанных переменных, сохраняя при этом как можно больше вариаций, присутствующих в исходном наборе данных, и сокращая малозначимые переменные. Чтобы использовать РСА для ИМ, вначале создается модель РСА на основе собранных данных в нормальных

условиях протекания контролируемого процесса. После этого рассчитывается контрольный мониторинговый интервал на основе одного из критериев (например, T^2 или SPE). На основе анализа полученных критериев обеспечивается возможность отслеживать поведение технологического процесса в онлайн-режиме с использованием статистических методов.

Однако, несмотря на очевидные успехи данной технологии, стандартный метод мониторинга на основе PCA имеет существенный недостаток – его нельзя использовать для мониторинга процессов с изменяющимися во времени параметрами. Когда происходит естественный дрейф или изменение рабочей области, возникает большое число ложноположительных «диагнозов», что требует организации динамической модели PCA, обладающей способностью эволюционировать во времени и подстраиваться под изменяющиеся условия.

3 Состояние проблемы

В последнее время все чаще появляются исследования по динамизации методов многофакторного анализа, включая PCA. Например, перспективный подход, сочетающий скользящее окно с рекурсивным обновлением модели PCA, предложен в [7]. В результате было показано, что рекурсия со скользящим по данным окном больше подходит для изменяющихся во времени процессов. Такой подход к адаптации получил название скользящее окно PCA (MWPCA). Быстрый MWPCA подходит для онлайн-приложений, однако до настоящего времени эффективный алгоритм обновления модели PCA не рассматривался. Один из перспективных вариантов PCA с движущимся окном был предложен в [8] для адаптивного мониторинга нелинейных процессов, но он требует больших вычислений, поэтому практически не применим в онлайн-режиме. Относительно недавняя разработка динамического мониторинга процессов на основе PCA (DPCA) предложена в Ригопулос [9], где представлена схема движущегося окна для идентификации адаптивной модели профиля бумагоделочной машины. Цинь [10] предложил несколько рекурсивных алгоритмов частичных наименьших квадратов (RPLS) для онлайн-моделирования динамических процессов и процессов управления автономными работами с большим количеством выборок данных. В [11] также рассматривается рекурсивный PCA для адаптивного мониторинга промышленных процессов с использованием модификации первого ранга и диагонализации Ланцоша. В [12] представлено два алгоритма RPCA, направленных на снижение стоимости вычислений без вычисления корреляционной матрицы. Но это также требует больших вычислительных затрат, поскольку рекурсивное вычисление и вычисление индексов DPCA достаточно сложны. Хорошие результаты в области динамизации PCA-технологии на основе новых двух статистических критериев представлены в [13].

Настоящее исследование, учитывающее проблемы, возникающие при использовании динамических PCA для мониторинга ПП, сосредоточено на разработке новой схемы адаптивного мониторинга изменяющихся во времени процессов с использованием преимуществ Dynamic PCA (DPCA). Для этого вводится модификация PCA на основе трех новых статистик и рекурсивного алгоритма.

4 Линейный PCA-анализ

Стандартный метод анализа главных компонент (PCA-анализ) основан на ортогональном разложении ковариационной матрицы переменных контролируемого процесса по направлениям, имеющим максимальные вариации данных. Целью при этом является поиск минимального числа факторов, способных правильно описать основные тенденции в исходном наборе данных.

Пусть p – количество измеряемых переменных; X – $(n \times p)$ -матрица, представляющая нормированные с использованием уравнения (4.1) измерения; Σ – ковариационная $(p \times p)$ -матрица для X .

$$x_j = \frac{x_j - c_j}{\sigma_j}, \quad (4.1)$$

где c_j и σ_j – соответственно среднее значение и дисперсия переменной x_j .

Строками X являются p -мерные векторы, соответствующие наблюдениям, а столбцами – n -мерные векторы, соответствующие переменным. Известно, что матрица Σ может быть преобразована в диагональную матрицу \mathbf{L} с помощью ортонормированной $(p \times p)$ -матрицы \mathbf{U} , а именно, $\Sigma = \mathbf{U}\mathbf{L}\mathbf{U}^T$. Столбцы $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_p$ матрицы \mathbf{U} известны как векторы загрузки главных компонент. Диагональные элементы $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ матрицы \mathbf{L} являются упорядоченными собственными значениями матрицы Σ . Они представляют дисперсии переменных x_j в новом ортонормированном базисе, определяемом собственными векторами матрицы Σ . PCA-преобразование определяется выражением

$$\mathbf{T} = \mathbf{X}\mathbf{U} \text{ или } \theta_i = \mathbf{X}\mathbf{u}_i,$$

которое может быть представлено в виде

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\mathbf{U}' = \sum_{i=1}^p \theta_i \mathbf{u}_i', \quad (4.2)$$

где $(n \times p)$ -матрица $\mathbf{T} = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ содержит так называемые оценки главных компонент, которые определяются как наблюдаемые значения главных компонент для всех n наблюдений. Пары θ_i, \mathbf{u}_i в (4.2) расположены в порядке убывания соответствующих λ_i .

На практике обычно не требуется вычислять все p собственных векторов, поскольку большая часть вариаций данных может быть зафиксирована в нескольких первых PCA-компонентах. Было установлено, что обычно достаточно первых двух-трех компонент для описания основных закономерностей в данных, что принципиально упрощает мониторинг.

Для $a < p$ получаем разложение:

$$\mathbf{X} = \theta_1 \mathbf{u}_1^T + \theta_2 \mathbf{u}_2^T + \theta_a \mathbf{u}_a^T + \mathbf{X}_{rez} = \mathbf{X}_{pc} + \mathbf{X}_{rez},$$

где \mathbf{X}_{rez} – остаточный член.

Использование PCA-анализа в ИМ реализуется в несколько этапов. Вначале на основе множества данных \mathbf{X} , соответствующих нормальному состоянию ТП, с использованием PCA-анализа формируется минимальный набор новых оценочных переменных $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$, описывающих основные тенденции в \mathbf{X} . Затем формируется статистика вариаций переменных в пространстве \mathbf{X}_{pc} или \mathbf{X}_{rez} для целей диагностики. Диагностика осуществляется путем сравнения статистических PCA-критериев с пороговыми значениями, как будет рассмотрено далее.

5 Динамический PCA-анализ

Основным инструментом ИМ является динамический PCA-анализ (DPCA) [13], ориентированный на анализ потоковых данных, представленных в виде многомерных временных рядов $X = \{\mathbf{x}_i\}$. Элементами временного ряда X являются векторы числовых значений $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$, описывающих параметры контролируемого объекта (ТП) в i -й момент времени.

В основу разработки DPCA положен принцип «скользящего окна» – трансформация исходного потока данных $\{\mathbf{x}_i\}$ в последовательность коротких наблюдений – временных рядов $\{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{i+1}, \dots, \mathbf{x}_{i+s+1}\}$. Последняя является окном анализа размерностью s , зависящей от специфики задачи. Поступающий на вход DPCA поток данных преобразуется в матрицу наблюдений:

$$\mathbf{X}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1^T & \mathbf{x}_2^T & \dots & \mathbf{x}_s^T \\ \mathbf{x}_2^T & \mathbf{x}_3^T & \dots & \mathbf{x}_{s+1}^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{x}_N^T & \mathbf{x}_{N+1}^T & \dots & \mathbf{x}_{N+s-1}^T \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{N \times sm}$$

Матрица наблюдений за потоком данных $x(t)$ с окном анализа s , где $x_i \in \mathbf{R}^m$ ($i = 1, \dots, N + s + 1$) обозначает нормализованный вектор наблюдений из m параметров ТСТП. Уравнение нормализации выглядит следующим образом:

$$x_j = \frac{x_j^0 - b_j^0}{\eta_j^0}, \quad (5.1)$$

где b_j^0 и η_j^0 – соответственно среднее значение и дисперсия j -й переменной x_j^0 ; x_j^0 – исходные данные; $j = 1, \dots, m$.

На основе (5.1) формируется корреляционная $(s \times s)$ -матрица:

$$R_X = \frac{1}{n-1} X^T \times X. \quad (5.2)$$

Для корреляционной матрицы R_X вычислим матрицу собственных векторов-столбцов P с соответствующим множеством собственных значений λ_i ($i = 1, \dots, s$). Упорядочим столбцы матрицы P по мере убывания собственных значений и выберем k первых векторов с наибольшими значениями

$\lambda_i (k \ll s)$. В этом случае упорядоченную матрицу собственных векторов P_{ord} можно представить в виде объединения двух матриц:

$$P_{ord} = \begin{bmatrix} P_{pc} & P_{res} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{s \times s}, \quad (5.3)$$

где $P_{pc} \in \mathbb{R}^{s \times k}$ – матрица главных компонент; $P_{res} \in \mathbb{R}^{s \times (s-k)}$ – матрица «остатков».

Матрица P_{pc} определяет для исходного пространства $X \subset \mathbb{R}^s$ новое редуцированное пространство переменных $Z_{pc} \subset \mathbb{R}^k$ путем преобразования $Z_{pc} = \mathbf{X} \times P_{pc}$, а матрица P_{res} представляет собой «остаточное пространство» $Z_{res} = \mathbf{X} \times P_{res}$, характеризующее ошибку аппроксимации исходных данных X . Диагональная матрица Λ , содержащая упорядоченные по убыванию дисперсии σ_i^2 переменных наблюдений \mathbf{x}_i , определяется следующим образом:

$$\Lambda = P_{ord}^T \times R_X \times P_{ord}. \quad (5.4)$$

По аналогии с (2.3) дисперсии новых переменных можно представить в виде объединения диагональных матриц Λ_{pc} и Λ_{res} :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{pc} & \Lambda_{res} \end{bmatrix},$$

$$\Lambda_{pc} = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_k^2) \in \mathbb{R}^{k \times k},$$

$$\Lambda_{res} = \text{diag}(\sigma_{k+1}^2, \dots, \sigma_s^2) \in \mathbb{R}^{(s-k) \times (s-k)}, \quad (5.5)$$

где $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_s^2$ упорядочены следующим образом: $\sigma_1^2 > \sigma_2^2 > \dots > \sigma_s^2$.

Таким образом, в основу DPCA-анализа положены выражения (5.2)–(5.5), на основании которых осуществляется преобразование входного потока данных X в новое редуцированное пространство переменных Z_{pc} . Вновь образованные на основе DPCA пространства переменных Z_{pc} и Z_{res} дают возможность на их основе формирование нескольких важных статистик для переменных $z \in Z_{pc}$ и $z \in Z_{res}$ в целях ИМ.

6 Три статистики DPCA-анализа в интеллектуальном мониторинге

Для обнаружения и идентификации нарушений на основе технологий DPCA-анализа используются диагностические статистики – вероятностные распределения целевых параметров контролируемого объекта. На практике наиболее часто используются две статистики: T^2 – статистика, контролирующая отклонения параметров x_t в пространстве главных компонент Z_{pc} , и SPE – статистика, контролирующая отклонения параметров x_t в пространстве невязок Z_{res} . Статистики T^2 и SPE формируются на данных, полученных в нормальных состояниях контролируемого ТП. При превышении значениями x_t пороговых оценок хотя бы для одной из статистик принимается гипотеза о возникновении нештатной ситуации или нештатного состояния ТП.

В нормальных условиях функционирования ТП матрица главных компонент P_{pc} в силу свойств PCA-разложения несет основную информацию о процессе, а следовательно, при стабильных параметрах ТП, находящегося в нормальном состоянии, значения новых параметров \mathbf{z}_{pc} , извлеченных путем PCA-редукции из исходных параметров \mathbf{x} , подчиняются нормальному закону распределения:

$$\mathbf{z}_{pc} = \mathbf{P}_{pc}^T \mathbf{x} \in \mathbb{R}^k, \quad \mathbf{z}_{pc} \sim N(0, \mathbf{P}_{pc}^T \mathbf{R} \mathbf{P}_{pc}) = N(0, \Lambda_{pc}). \quad (6.1)$$

По аналогии, для переменных \mathbf{z}_{res} в остаточном пространстве невязок Z_{res} также имеет место нормальный закон распределения:

$$\mathbf{z}_{res} = \mathbf{P}'_{res} \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{(s-k)}, \quad \mathbf{z}_{res} \sim N(0, \mathbf{P}'_{res} \times \mathbf{R} \times \mathbf{P}_{res}) = N(0, \Lambda_{res}). \quad (6.2)$$

Для оперативно поступающих на вход мониторинговой системы данных $x \in \mathbb{R}^m$ критерии T^2 и SPE рассчитываются в режиме онлайн следующим образом:

$$T^2 = x^T \mathbf{P}_{pc} \Lambda_{pc} \mathbf{P}_{pc}^T x,$$

$$SPE = \|(I - \mathbf{P}_{pc} \mathbf{P}_{pc}^T) x\|^2 = x^T (I - \mathbf{P}_{pc} \mathbf{P}_{pc}^T)^2 x.$$

Помимо указанных двух статистик для целей мониторинга авторы вводят новую E -статистику, характеризующую ошибку предсказания системной предиктивной модели.

Предиктивная модель, являющаяся неотъемлемым элементом любой мониторинговой системы, предназначена для прогнозирования целевой переменной. В рассматриваемой предметной области в качестве целевых переменных выступают темпоральные переменные, характеризующие времена выполнения технологических операций, и/или силовые переменные, характеризующие интенсивность вагонопотоков, плотность или численность подвижных единиц, находящихся в вагонных парках или на отдельных участках движения.

Предиктивная модель относится к классу адаптивных эволюционирующих систем, основанных на гибридизации нечетких TS-моделей с методами машинного обучения и специальным механизмом инкрементного обновления базы знаний [14]. Механизм онлайн-обучения гибридных предиктивных моделей (eTS) обеспечивает способность eTS в пошаговом (инкрементном) режиме подстраиваться под изменяющийся поток входных данных. Эффективность функционирования предиктивной eTS оценивается достоверностью вырабатываемых на ее основе прогностических решений.

Прогнозирование целевой переменной осуществляется в режиме онлайн на основе потоковых данных, представленных в виде пар числовых значений $\mathbf{z}_t = (\mathbf{x}_t, \tau_t)$. Первая компонента \mathbf{x}_t в кортеже \mathbf{z}_t , характеризует вектор текущих параметров ТП, а вторая – фактическое значение τ_t целевого темпорального параметра, которое модель пытается предсказать. Цель инкрементного обучения состоит в том, чтобы по мере поступления образцов данных \mathbf{x}_t ($t = 1, 2, \dots$) как можно точнее предсказывать значения целевой переменной τ_t . Предсказание $\hat{\tau}_t = F(\mathbf{x}_t, eTS_{t-1})$ выполняется исключительно на основе текущего вектора \mathbf{x}_t и ранее сформированной модели eTS_{t-1} , после чего фактическая оценка τ_t целевой переменной сравнивается с предсказанным теоретическим значением $\hat{\tau}_t$ и вычисляются потери $\mathcal{L}(\tau_t, \hat{\tau}_t)$. Обычно потери определяются через квадрат разности между фактическими и теоретическими оценками целевой переменной.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\tau_t - \hat{\tau}_t)^2}. \quad (6.3)$$

На практике для оценки потерь часто используется безразмерный индекс ошибок (NDEI) [10], определяемый как отношение среднеквадратичной ошибки к стандартному отклонению целевой переменной:

$$NDEI = \frac{RMSE}{\sigma_\tau}. \quad (6.4)$$

В нормальных условиях протекания ТП индекс ошибки NDEI, являющийся случайной величиной, так же как и два выше рассмотренных статистических индекса T^2 и SPE , подчиняется нормальному закону распределения:

$$\varepsilon \in R, \quad \varepsilon \sim N\left(C, \frac{RMSE}{\sigma_\tau}\right). \quad (6.5)$$

ε – ошибка предсказания, вычисляемая на основании (), C – усредненное значение индекса ошибки за N измерений.

При возникновении нештатных технологических ситуаций или в преддверии аномального состояния контролируемого технологического процесса (ТП) следует ожидать появления дрейфа во входном потоке данных, сопровождающие течение ТП. Дрейф приводит к изменению статистических законов T^2 , SPE , $NDEI$, что формально определяется следующим образом:

$$\exists t \in T \mid N_t(z_{pc}) \neq N_{t+1}(z_{pc}) \vee N_t(z_{rez}) \neq N_{t+1}(z_{rez}) \vee N_t(\varepsilon) \neq N_{t+1}(\varepsilon). \quad (6.6)$$

Обнаружение дрейфа является одной из основных задач ИМ, поэтому выражение (6.6) положено в основу одного из основных диагностических правил мониторинговой системы.

7 Рекурсивный DPCA-анализ

Для реализации ИМ в онлайн-режиме необходим механизм «быстрого» DPCA-анализа, подобно механизмам быстрого Фурье-преобразований, используемых при цифровой обработке сигналов. Для решения этой задачи ниже предлагается рекурсивная схема DPCA-анализа.

Для реализации рекурсивных вычислений в первую очередь необходимо иметь возможность вычислять корреляционную матрицу R_t для любого момента времени t . Однако затраты на вычисление и обновление структуры корреляционной матрицы достаточно велики, что неприемлемо для онлайн-приложений. Поэтому для обновления модели рассмотрим рекурсивную процедуру [13].

Пусть $x_t^0 \in \mathfrak{R}^{sm}$ – входные данные в момент времени t , среднее значение в момент времени $t-1$ равно:

$$c_{t-1} = \sum_{i=1}^{t-1} x_i^0 / (t-1). \quad (7.1)$$

Аналогично, c_t представляет собой среднее значение в момент времени t :

$$c_t = \sum_{i=1}^t x_i^0 / t. \quad (7.2)$$

Стоит отметить, что,

$$tc_t = (t-1)c_{t-1} + x_t^{0T}. \quad (7.3)$$

Далее уравнение (7.1) можно переписать как

$$c_{t-1} = \frac{t}{t-1} c_t - \frac{1}{t-1} x_t^{0T}. \quad (7.4)$$

Заметим, что,

$$\Delta c_t = c_t - c_{t-1}.$$

Опуская дальнейшие очевидные преобразования, получим итоговое выражение:

$$\Delta c_t = \frac{1}{t-1} (x_{t+1}^0 - c_{t+1}^T). \quad (7.5)$$

Из (7.4) вытекает следующее выражение:

$$R_t = \mu \Lambda_t^{-1} (\Lambda_{t-1} R_{t-1} \Lambda_{t-1} + \Delta c_t \Delta c_t^T) \Lambda_t^{-1} + (1-\mu) x_t^T x_t. \quad (7.6)$$

Если дисперсия существенно не меняется, мы можем использовать начальную дисперсию для масштабирования данных и не обновлять дисперсию. Тогда равнение (7.6) можно преобразовать в формулу:

$$R_t = \mu R_{t-1} + \mu \Lambda_t^{-1} \Delta c_t \Delta c_t^T \Lambda_t^{-1} + (1-\mu) x_t^T x_t, \quad (7.7)$$

где $\mu = \frac{t-1}{t}$, $x_t \in \mathfrak{R}^{sm}$ обозначает вектор в момент времени t .

Для дальнейшего обсуждения уравнение (7.7) можно переписать следующим образом:

$$R_t = \frac{t-1}{t} R_{t-1} + \frac{1}{t-1} x_t^T x_t, \quad (7.8)$$

Согласно алгоритму, предложенному в [13], корреляционная матрица может быть рекурсивно обновлена:

$$R_t = \varepsilon R_{t-1} + (1-\varepsilon) x_t^T x_t, \quad (7.9)$$

где множитель забывания ε – небольшое положительное число ($\varepsilon \rightarrow 0$).

Далее, сингулярные значения и собственные векторы обновленной матрицы можно описать следующим образом:

$$\sigma_{t,i}^2 = \varepsilon \sigma_{t-1,i}^2 + (1-\varepsilon) P_{t-1,i}^T x_t x_t^T P_{t-1,i}, \quad (7.10)$$

$$P_{t,i} = P_{t-1,i} + \sum_{j=1}^m \lambda_{ji} P_{t-1,i}, \quad (7.11)$$

где $i, j = 1, \dots, m$; $c_{ii} = 0$.

Собственные значения обновляются следующим образом:

$$\lambda_{ji} = \frac{P_{t-1}^T x_{t-1} x_{t-1}^T P_{t-1,i}}{\sigma_{t-1,i}^2 - \sigma_{t-1,j}^2}. \quad (7.12)$$

Уравнения (7.1–7.12) составляют основу рекурсивного механизма DPCA-анализа.

8 Технология интеллектуального мониторинга

Технология ИМ в значительной мере сводится к детектированию нарушений. Обнаружение нарушений или нештатных состояний в поведении ТП обычно приводит к изменениям статистик: либо SPE, либо в T2, либо E-статистик. В этом случае данные статистики превышают пороговые оценки (контрольные пределы). Идентификация и реконструкция нарушений является более сложной задачей, которая в статье не рассматривается.

Пусть \mathbf{X} – матрица исходных данных (наблюдений) размера $n \times m$, в которой строками являются отдельные выборки данных, а столбцами – переменные. Предполагается, что значения в \mathbf{X} центрированы к нулевому среднему значению. PCA разлагает \mathbf{X} на две компоненты:

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\mathbf{P}^T + \mathbf{E} = \mathbf{T}\mathbf{P}^T + \tilde{\mathbf{T}}\tilde{\mathbf{P}}^T \quad (8.1)$$

где $\mathbf{T} \in R^{n \times I}$ и $\mathbf{P} \in R^{m \times I}$ – матрицы оценок и нагрузок соответственно, а I – количество главных компонент, сохраненных в модели.

Матрица остатков \mathbf{E} , в свою очередь, может быть представлена в виде произведения остаточных матриц оценок $\tilde{\mathbf{T}}$ и нагрузок $\tilde{\mathbf{P}}$. Область значений \mathbf{P} является подпространством главных компонент \mathbf{P}_{pc} размерностью I , а область значений $\tilde{\mathbf{P}}$ образует остаточное подпространство \mathbf{P}_{res} размерностью $m-I$. \mathbf{P} и $\tilde{\mathbf{P}}$ также можно интерпретировать как собственные вектора ковариационной матрицы $S = \mathbf{X} \times \mathbf{X}^T / (n - 1)$, связанные с главными собственными значениями $\Lambda = \mathbf{T}' \times \mathbf{T}$ и остаточными собственными значениями $\tilde{\Lambda} = \tilde{\mathbf{T}}' \times \tilde{\mathbf{T}} / (n - 1)$ соответственно.

Вновь поступивший вектор данных \mathbf{x} допускает разбиение на две части:

$$\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{x}}, \quad (8.2)$$

где

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{P}\mathbf{P}^T \mathbf{x} \in \mathbf{P}_{pc} \quad (8.3)$$

и

$$\tilde{\mathbf{x}} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}\mathbf{P}^T) \mathbf{x} \in \mathbf{P}_{res} \quad (8.4)$$

– проекции вектора \mathbf{x} на пространства главных компонент PC и невязок RS соответственно.

Когда возникает нарушение, соответствующий вектор данных \mathbf{x} может быть представлен как

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^* + \Xi_i \mathbf{f}, \quad (8.5)$$

где $\Xi_i \in R^{m \times I}$ – матрица, представляющая подпространство нарушений размерностью I , а $\|\mathbf{f}\|$ представляет величину нарушения.

При появлении нарушения вызвавший его образец данных \mathbf{x} , очевидно, отклоняется от области нормальных значений параметров ТП, что сопровождается увеличением проекции \mathbf{x} на пространства PC и/или RS. Диагностирование дрейфа осуществляется с использованием ранее рассмотренных статистик SPE, T² и E-статистики.

Одна из них, SPE, отражает вариации в пространстве невязок RS и характеризуется индексом:

$$\text{SPE} \equiv \|\tilde{\mathbf{x}}\|^2 = \|(\mathbf{I} - \mathbf{P}\mathbf{P}^T) \mathbf{x}\|^2 \equiv \|\tilde{\mathbf{C}}\mathbf{x}\|^2 \quad (8.6)$$

Другая T²-статистика представлена индексом Хеттелинга:

$$T^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \Delta \mathbf{P}^T \mathbf{x}. \quad (8.7)$$

Третья статистика, E-статистика, отражает вариации ошибки предсказания eTS-модели.

Логика обнаружения дрейфа на основе DPCA-анализа представляется следующим продукционным правилом:

$$SPE > \delta^2 \vee T^2 > \chi_I^2 \vee \varepsilon > \sigma_\varepsilon \Rightarrow Dr, \quad (8.8)$$

где δ^2 , χ_I^2 и σ_ε обозначают доверительные пороги для диагностических статистик T^2 , SPE и E-критерия, соответственно рассчитанные для нормальных состояний ТП.

Заключение

В статье предложена новая технология интеллектуального мониторинга на основе рекурсивного динамического PCA-анализа. Она базируется на динамическом PCA-анализе, рекурсивной схеме вычислений главных компонент и адаптивной модели эволюционирующей нечеткой системы eTS, разработка которой подробно изложена в [14] поэтому в настоящей статье не приводится.

Применение предложенной схемы ИМ демонстрирует реализуемость и эффективность рекурсивных алгоритмов адаптивного мониторинга ТП. Алгоритм значительно снижает стоимость онлайн-вычислений.

Поскольку в большинстве технологических процессов происходят медленные, эволюционирующие изменения, такие как старение напольного оборудования, дрейфы датчиков, периодическое обслуживание и модернизация технических средств, ожидается, что предложенная в статье схема адаптивного мониторинга найдет широкое применение на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1 Аналитический обзор трудов конференции ИТИ'19 / С. М. Ковалев, В. Снашел, А. Н. Гуда [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 86–105. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_86.

2 **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”(ИТИ'22). – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 358–368. – ISBN 978-3-031-19619-5.

3 **Khatlamadzhian, A. E.** Cognitive Measurements and Predictive Analytics for Railway Infrastructure Components / A. E. Khatlamadzhian, S. M. Kovalev, V. B. Tarassov // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. – Springer, Cham, 2021. – P. 513–526. – ISSN 2367-3370.

4 **Laiton-Bonadiez, C.** Industry 4.0 technologies applied to the rail transportation industry : A systematic review / C. Laiton-Bonadiez // Sensors. – 2022. – Т. 22. – No. 7. – P. 2491. – DOI 10.3390/s22072491.

5 **Levin, D. Yu.** Dispatch control of car flows / D. Yu. Levin // Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT–2019). – 2019. – P. 51–58. – ISSN 1992-3252.

References

1 Analytical review of the proceedings of the ИТИ'19 conference / S. M. Kovalev, V. Snashel, A. N. Guda [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 3. – P. 86–105. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_86.

2 **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”(ИТИ'22). – Cham: Springer International Publishing, 2022. – P. 358–368. – ISBN 978-3-031-19619-5.

3 **Khatlamadzhian, A. E.** Cognitive Measurements and Predictive Analytics for Railway Infrastructure Components / A. E. Khatlamadzhian, S. M. Kovalev, V. B. Tarassov // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. – Springer, Cham, 2021. – P. 513–526. – ISSN 2367-3370.

4 **Laiton-Bonadiez, C.** Industry 4.0 technologies applied to the rail transportation industry: A systematic review / C. Laiton-Bonadiez // Sensors. – 2022. – T. 22. – No. 7. – P. 2491. – DOI 10.3390/s22072491.

5 **Levin, D. Yu.** Dispatch control of car flows / D. Yu. Levin // Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT–2019). – 2019. – P. 51–58. – ISSN 1992-3252.

6 PCA-SVM-based automated fault detection and diagnosis (AFDD) for vapor-compression refrigeration systems / H. Han, Z. Cao, B. Gu, N. Ren // HVAC&R Res. 16 (2010). – P. 295–313. – DOI 10.1080/10789669.2010.10390906.

7 **Wang, J.** A new subspace identification approach based on principle component analysis / J. Wang and S. J. Qin // Journal of Process Control. – 2002. – Vol. 12, No. 8. – P. 841–855. – DOI 10.1016/S0959-1524(02)00016-1.

8 Moving window kernel PCA for adaptive monitoring of nonlinear processes / X. Liu, U. Kruger, T. Littler [et al.] // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2009. – Vol. 96, No. 2. – P. 132–143. – DOI 10.1016/j.chemolab.2009.01.002.

9 **Rannar, S.** Adaptive batch monitoring using hierarchical PCA / S. Rannar, J. MacGregor and S. Wold // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 1998. – Vol. 41, No. 1. – P. 73–81. – DOI 10.1002/cem.678.

10 **Qin, S. J.** Recursive PLS algorithms for adaptive data modeling / S. J. Qin // Computers & Chemical Engineering. – 1998. – Vol. 22, No. 4–5. – P. 503–514. – DOI 10.1016/S0098-1354(97)00262-7.

11 Recursive PCA for adaptive process monitoring / W. Li, H. Yue, S. Valle-Cervantes and S. Qin. Journal of Process Control. – 2000. – Vol. 10, No. 5. – P. 471–486. – DOI 10.1016/S0959-1524(00)00022-6.

12 Efficient recursive PCA algorithms for process monitoring / L. Elshenawy, S. Yin, A. Naik and S. Ding // Industrial Engineering Research. – 2010. – Vol. 49, No. 1. – P. 252–259. – DOI 10.1021/ie900720w.

13 A simplified recursive dynamic PCA based monitoring scheme for imperial smelting process / Z. Hu [et al.] // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2012. – V. 8, No. 4. – P. 2551–2561 – ISSN 1349-4198.

14 **Kovalev, S.** Incremental Structure-Evolving Intelligent Systems with Advanced Interpretational Properties / S. Kovalev, A. Kolodenkova, A. Sukhanov // Artificial Intelligence. RCAI 2020. Lecture Notes in Computer Science, Vol 12412. – 2020. – Springer, Cham. – ISSN 0302-9743.

6 PCA-SVM-based automated fault detection and diagnosis (AFDD) for vapor-compression refrigeration systems / H. Han, Z. Cao, B. Gu, N. Ren // HVAC&R Res. 16 (2010). – P. 295–313. – DOI 10.1080/10789669.2010.10390906.

7 **Wang, J.** A new subspace identification approach based on principle component analysis / J. Wang and S. J. Qin // Journal of Process Control. – 2002. – Vol. 12, No. 8. – P. 841–855. – DOI 10.1016/S0959-1524(02)00016-1.

8 Moving window kernel PCA for adaptive monitoring of nonlinear processes / X. Liu, U. Kruger, T. Littler [et al.] // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2009. – Vol. 96, No. 2. – P. 132–143. – DOI 10.1016/j.chemolab.2009.01.002.

9 **Rannar, S.** Adaptive batch monitoring using hierarchical PCA / S. Rannar, J. MacGregor and S. Wold // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 1998. – Vol. 41, No. 1. – P. 73–81. – DOI 10.1002/cem.678.

10 **Qin, S. J.** Recursive PLS algorithms for adaptive data modeling / S. J. Qin // Computers & Chemical Engineering. – 1998. – Vol. 22, No. 4–5. – P. 503–514. – DOI 10.1016/S0098-1354(97)00262-7.

11 Recursive PCA for adaptive process monitoring / W. Li, H. Yue, S. Valle-Cervantes and S. Qin. Journal of Process Control. – 2000. – Vol. 10, No. 5. – P. 471–486. – DOI 10.1016/S0959-1524(00)00022-6.

12 Efficient recursive PCA algorithms for process monitoring / L. Elshenawy, S. Yin, A. Naik and S. Ding // Industrial Engineering Research. – 2010. – Vol. 49, No. 1. – P. 252–259. – DOI 10.1021/ie900720w.

13 A simplified recursive dynamic PCA based monitoring scheme for imperial smelting process / Z. Hu [et al.] // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2012. – V. 8, No. 4. – P. 2551–2561 – ISSN 1349-4198.

14 **Kovalev, S.** Incremental Structure-Evolving Intelligent Systems with Advanced Interpretational Properties / S. Kovalev, A. Kolodenkova, A. Sukhanov // Artificial Intelligence. RCAI 2020. Lecture Notes in Computer Science, Vol 12412. – 2020. – Springer, Cham. – ISSN 0302-9743.

A. I. Dolgiy, S. M. Kovalev, A. N. Guda

INTELLIGENT MONITORING OF THE TRANSPORTATION PROCESSES BASED ON THE DYNAMIC METHOD OF PRINCIPAL COMPONENTS

Abstract. The paper considers a new technology for intelligent monitoring of the railway transportation processes using the dynamic method of principal components. It includes a recursive principal feature calculation algorithm and three statistical criteria used in the decision engine. The application of the proposed scheme demonstrates the feasibility and efficiency of

recursive algorithms for adaptive monitoring of complex poorly formalized processes in on-line mode.

Whereas the most technological processes undergo slow, evolving changes, such as aging of floor equipment, sensor drifts, periodic maintenance and modernization of technical equipment, it is expected that the adaptive monitoring scheme proposed in the article will be widely used in railway transport.

Keywords: intelligent monitoring, recursive calculation algorithm, streaming data, poorly formalized processes, marshalling yards, intelligent analysis, machine learning, traffic volume, throughput.

For citation: Dolgiy, A. I. Intelligent monitoring of the transportation processes based on the dynamic method of principal components / A. I. Dolgiy, S. M. Kovalev, A. N. Guda // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 240–251. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_240.

Сведения об авторах

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

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

Information about the authors

Dolgiy Alexander Igorevich

JSC «NIIAS», Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, General Manager, e-mail: info@vniias.ru

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

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК РГУПС»

1 **Материалы статей** представляют в виде текстов, отформатированных и распечатанных на лазерном или струйном принтере (пригодных для сканирования) на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) в одном экземпляре. Рекомендуемый объем статьи – 5–15 страниц.

Одновременно представляют электронную версию статьи, выполненной в текстовом редакторе Word for Windows, шрифт Times New Roman, 11 pt, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание по ширине, абзацный отступ – 1,25 см, все поля – 2 см.

2 На первой странице должны быть указаны:

- **УДК** – в левом верхнем углу;
- интервал;
- **инициалы и фамилии авторов** – по центру, курсивом;
- интервал;
- **название статьи** – заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру, без переносов;
- интервал;
- **аннотация** (80–150 слов);
- **ключевые слова** (5–10 слов);
- интервал;
- **текст статьи** – печатается с переносами.
- интервал;
- **список литературы** на русском и английском языках (не менее 10 источников).

3 **Статья** должна содержать вводную часть, цель научной разработки, основную часть и выводы. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки журнала на компьютере.

4 **Буквы** латинского алфавита набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5 **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6 **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисовочная подпись обязательны.

7 **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8 **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9 **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

Условия и порядок публикации статей в журнале

- 1** Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.
- 2** Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.
- 3** Автор может прислать статью в адрес редакции:
 - по почте;
 - по электронной почте;
 - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4** Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

5 Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

6 На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.

7 Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.

Краткая информация о журнале

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный сериальный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В.И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» (www.pressa-rg.ru под индексом 53720).

Подписаться на журнал можно 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

**№ 2 (90)
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 29.06.2023.
Дата выхода в свет 30.06.2023.
Печать офсетная.
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 29,34.
Тираж 510 экз.
Цена свободная.

Бумага офсетная.
Изд. № 32.
Заказ .

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.**