

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

№ 3 (91)

Ростов-на-Дону
2023

ВЕСТНИК

Ростовского государственного университета путей сообщения

2023
№ 3 (91)

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

А.О. 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.L. Shapovalov**, Doctor of Engineering Sciences, Associate 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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Агапов А.А. Построение интеллектуальных транспортных систем на основе квазиоптимальных структур управления и нечеткого логического вывода	8
Колоденкова А.Е., Верещагина С.С. Подход к проверке базы знаний интеллектуальных систем диагностирования промышленного оборудования	18
Агапов А.А., Зарифьян А.А. (мл.) Возможность использования интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности в системе автоматического регулирования скорости электровоза.....	28

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

Зубков В.Н., Черняев А.Г., Чеботарева Е.А., Егорова И.Н., Долгий И.Д. Меры по согласованному продвижению вагонопотоков к портам Азово-Черноморского бассейна в условиях развития элементов технико-технологической модели управления перевозочным процессом.....	35
Верескун В.Д., Мамаев Э.А., Сорокин Д.В. Оценка перспектив роста грузооборота на международного транспортного коридора «Север – Юг» в современных условиях	45
Сирина Н.Ф., Герус В.Л. Анализ взаимодействия ключевых показателей эффективности с целевыми результатами деятельности компании	57
Третьяков Г.М., Москвичева Е.Е., Пацев Ю.П. Методические принципы выбора маршрутов регулярного контрейлерного сообщения	66

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Нечес И.О., Пирогова Н.Д. Анализ прохождения импульсно-манипулированных сигналов, через нелинейные частотно-селективные устройства	74
Чудотворова К.М., Федоров А.В. Разработка методики моделирования структуры управляющего цифрового автомата противоаварийной защиты технологической установки полимеризации на микроконтроллерах.....	84

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Митрофанов А.Н., Жарков Ю.И., Окладов С.А. Подход к построению моделей цифровых двойников бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов	92
Петрушин А.Д., Ляхов В.В., Меликов А.И. Оптимальные тормозные режимы работы асинхронного электропривода	103
Чаплыгин В.С. Методика оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения	111

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Куштин В.И., Щербак П.Н., Пимшина Т.М., Турчик С.Е. Учет влияния атмосферы на результаты высокоточных геодезических, астрономических и фотограмметрических измерений.....	119
Коваленко Н.И. Повышение уровня технического состояния железнодорожного пути.....	125
Шапвалов В.Л., Окост М.В., Морозов А.В., Кочур А.Г. Подходы к оценке продолжительности восстановления мостовых сооружений после разрушения.....	135

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЯ

Журавлев С.Н. К вопросу поддержания заданной скорости движения маневрового локомотива при работе на сортировочной горке	144
Игнатьев О.Л., Склифус Я.К., Ширококов В.В., Шевченко С. Раздвижная колесная пара для вагонов, обращающихся в межгосударственном сообщении.....	152

Круглов С.П., Иванов П.Ю., Корсун А.А. Математическое обоснование эффективности торможения с постоянным значением коэффициента запаса по нажатию.....	159
Моисеев В.И., Жебанов А.В. Разогрев застывших нефтепродуктов при выгрузке из цистерн различного назначения в зимних условиях.....	169
Соломин В.А., Штанке В.В. Способ диагностики дефектов колесных пар подвижного состава магнитоиндукционными датчиками	177

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Астраханцев Л.А., Базилевский М.П., Лобанов О.В., Ступицкий В.П. Разработка математических моделей напряженно-деформированного состояния металлических опор контактной сети железных дорог методами теории планирования эксперимента.....	188
Почес Н.С., Малышев В.Н. Исследование триботехнических характеристик новых керамополимерных покрытий в экологически безопасных смазочных материалах.....	196
Харитонов А.В., Рыбников Е.К. Возможность применения в узле горизонтальной связи колесной пары и рамы тележки с частотно-зависимой упруго-вязкой характеристикой	204

CONTENTS

MODELING SYSTEMS AND PROCESSES

Agapov A.A. Building intelligent transportation systems based on quasi-optimal control structures and fuzzy logical inference	8
Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Approach to the knowledge base validation of intelligent systems in industrial equipment diagnostics.....	18
Agapov A.A., Zarifyan (Jr.) A.A. The possibility of using intelligent control algorithm based on the maximum condition of the generalized power function in the system of automatic speed control of electric locomotive.....	28

OPERATION AND LOGISTICS ON TRANSPORT

Zubkov V.N., Chernyaev A.G., Chebotareva E.A., Egorova I.N., Dolgiy I.D. Measures for the coordinated promotion of car traffic to the ports of the Azov-Black sea basin in the conditions of development of elements of technical and technological transportation process management models.....	35
Vereskun V.D., Mamaev E.A., Sorokin D.V. The assessment of prospects for growth of cargo turnover in the international transport corridor "North – South" in modern conditions	45
Sirina N.F., Gerus V.L. Analysis of the interaction of key performance indicators with the target results of the company's activities	57
Tretyakov G.M., Moskvicheva E.E., Patsev Yu.P. Methodological principles for selecting routes for regular contrailer services.....	66

INFORMATION TECHNOLOGIES, AUTOMATION
AND TELECOMMUNICATIONS

Neches I.O., Pirogova N.D. Analysis of the passage of pulse-manipulated signals through nonlinear frequency-selective devices.....	74
Chudotvorova K.M., Fedorov A.V. Development of a method for simulating the structure of a control digital automatic emergency protection of technological installation for polymerization on microcontrollers.....	84

POWER ENGINEERING ON TRANSPORT

Mitrofanov A.N., Zharkov Yu.I., Okladov S.A. Approach to building digital twin models of business processes of energy supply for train traction	92
Petrushin A. D., Lyakhov V.V., Melikov A.I. Optimal braking modes of operation of asynchronous electric drive.....	103
Chaplygin V.S. Methodology for assessing occupational risks using the influence of the human factor employees of the electrification and power supply facilities	111

RAIL TRACK AND TRANSPORT CONSTRUCTION

Kushtin V.I., Shcherbak P.N., Pimshina T.M., Turchik S.E. Consideration of the influence of the atmosphere on the results of high-precision geodetic, astronomical and photogrammetric measurements	119
Kovalenko N.I. Improving the technical condition level of the railway track.....	125
Shapovalov V.L., Okost M.V., Morozov A.V., Kochur A.G. Approaches for assessing the time period of the bridge structure rebuilding after destruction.....	135

ROLLING STOCK, TRAFFIC SAFETY AND ENVIRONMENT

Zhuravlev S.N. The question of keeping a specified speed of a shunting locomotive when operating at marshaling yards	144
Ignatiev O.L., Sklifus Y.K., Shirobokov V.V., Shevchenko S. Sliding wheel set for railcars in interstate traffic	152
Kruglov S.P., Ivanov P.Yu., Korsun A.A. Mathematical rationale of braking efficiency with a constant pressure safety factor.....	159
Moiseev V.I., Zhebanov A.V. Heating of frozen petroleum products during unloading from tankers for various purposes in winter conditions.....	169
Solomin V.A., Shtanke V.V. A method for diagnosing defects in wheel sets of rolling stock by magnetoinduction sensors.....	177

MECHANICAL ENGINEERING

Astrakhantsev L.A., Bazilevsky M.P., Lobanov O.V., Stupitskiy V.L. Development of mathematical models of the stress-strain state of metal supports of the railway overhead line by methods of experimental planning theory	188
Poches N.S., Malyshev V.N. Study of tribotechnical characteristics of new ceramic-polymer coatings in environmentally safe lubricants.....	196
Kharitonov A.V., Rybnikov E.K. The possibility of using a hydroblock with a frequency-dependent elastic-viscous characteristic in a horizontal coupling unit of a wheelset and a trolley frame.....	204

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 62 – 50 + 06

DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_8

*А. А. Агапов***ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ
И НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ***

Аннотация. Рассматривается задача обеспечения автоматического управления динамическими объектами, входящими в состав интеллектуальной транспортной системы и функционирующих в различных режимах, что требует повышения эффективности используемых законов управления с целью сохранения быстродействия, устойчивости и др. Исходная система представлена в виде уравнений Лагранжа 2-го рода, на которую наложены ограничения, гарантирующие полную управляемость системы. Для построения управления применяется принцип декомпозиции, разбивающий систему с n степеней свободы на n независимых подсистем с ограниченными возмущениями. В работе построен интеллектуальный закон управления подсистемой с априорно неизвестными возмущениями на основе квазиоптимального по быстродействию закона и закона, обеспечивающего максимизацию области притяжения, с использованием нечеткого логического вывода. Проведено моделирование на примерах с различными нелинейными видами возмущений. Анализ результатов моделирования показывает, что построенный закон управления обеспечивает достижение окрестности терминальной точки за время, близкое к оптимальному, при этом в сравнении с известным квазиоптимальным по быстродействию законом управления предлагаемый закон не входит в колебательный режим вблизи терминальной точки, а также не имеет точек разрыва на траектории движения нелинейной динамической системы. Показано, что применение принципа декомпозиции позволяет построить интеллектуальные законы управления для системы с несколькими степенями свободы.

Ключевые слова: нелинейная динамическая система, квазиоптимальный закон управления, интеллектуальные транспортные системы, уравнения Лагранжа 2-го рода, априорно неизвестные возмущения, нечеткий логический вывод.

Для цитирования: Агапов, А. А. Построение интеллектуальных транспортных систем на основе квазиоптимальных структур управления и нечеткого логического вывода / А. А. Агапов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 8–17. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_8.

Введение

Современная теория автоматического управления развивается в условиях повышения требований к качеству управления транспортными средствами и необходимости учета все большего количества факторов, влияющих на функционирование объектов управления. К таким факторам относятся учет нелинейности модели объекта управления и априорно неизвестных возмущений, действующих на объект в процессе управления, среди которых можно выделить нестационарность параметров объекта управления и различные внешние влияния.

Например, для набирающих популярность беспилотных летательных аппаратов характерны сложные условия, такие как внешние возмущения ветра, струйные воздушные течения, турбулентность атмосферы, внешние воздействия от разрывов снарядов, параметрические возмущения, возникающие вследствие нестационарности характеристик и параметров самого объекта управления, например, изменение массы при несении нагрузки, исполнительных механизмов, функциональных устройств системы управления [1].

Интеграция отдельных объектов управления как транспортных средств в комплексные интеллектуальные транспортные системы [2, 3] с введением повсеместного автоматического управления

* Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 23-29-00812, <https://rscf.ru/project/23-29-00812/>.

движением [4] требует повышения эффективности используемых законов управления с целью сохранения быстродействия, устойчивости и других показателей в условиях функционирования при различных режимах [5].

Данное обстоятельство приводит к необходимости использования интеллектуальных законов управления, обеспечивающих адаптацию к различным режимам движения объекта управления и устойчивость к априорно неизвестным возмущениям [6, 7]. Так как помимо обеспечения адаптации зачастую требуется также обеспечить высокое быстродействие системы, целесообразно строить интеллектуальное управление на базе квазиоптимальных законов.

Цель работы – построение интеллектуального закона управления, устойчивого к априорно неизвестным возмущениям, и сравнение с известными квазиоптимальными решениями.

Постановка задачи

Рассматривается нелинейная управляемая динамическая система, описываемая уравнениями Лагранжа второго рода [8, 9]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = u_i + Q_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T \in R^n$ – вектор обобщенных координат; $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n]^T \in R^n$ – вектор обобщенных скоростей; $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_n(t)]^T$ – вектор управляющих воздействий; $\mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = [Q_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t), \dots, Q_n(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)]^T$ – вектор прочих обобщенных сил, включая неконтролируемые возмущения; $n = \dim \mathbf{q}$ – число степеней свободы динамической системы; T – знак транспонирования; точкой обозначена производная по времени; $T = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ – кинетическая энергия, заданная в виде симметрической положительно-определенной квадратичной формы от обобщенных скоростей:

$$T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \langle \mathbf{A}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}} \rangle = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(\mathbf{q}) \dot{q}_i \dot{q}_j, \quad (2)$$

где матрица кинетической энергии $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ представима в виде [8, 9]

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{q}), \quad (3)$$

где $\bar{\mathbf{A}}$ – постоянная положительно-определенная матрица, $\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{q})$ – неизвестная симметрическая матрица. Предполагается, что евклидовы нормы матриц $\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{q})$ и $\bar{\mathbf{A}}^{-1}$ достаточно малы:

$$\|\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{q})\| \leq \varsigma, \quad \|\bar{\mathbf{A}}^{-1}\| \leq \bar{\varsigma}^{-1}, \quad (4)$$

где ς – достаточно малый параметр, $\varsigma > 0$, $\varsigma < \bar{\varsigma}$, оценки ς , $\bar{\varsigma}$ определены в [9].

Положим, что управляющие воздействия u_i и обобщенные силы Q_i на конечном замкнутом интервале времени $[t_0, t_k] \subset R$ принимают значения, удовлетворяющие ограничениям, которые гарантируют полную управляемость системы (1) [10],

$$\begin{aligned} |u_i| &\leq h_i, \quad \sup |Q_i| < h_i, \\ i &= \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $h_i > 0$ – заданные постоянные.

Задача синтеза управления системой (1) состоит в поиске управляющих обобщенных сил u_i , переводящих за конечное время при условии (5) динамическую систему из начального состояния

$$t = t_0, \quad \mathbf{q}(t_0) = [q_{10}, \dots, q_{n0}]^T, \quad \dot{\mathbf{q}}(t_0) = [\dot{q}_{10}, \dots, \dot{q}_{n0}]^T \quad (6)$$

в окрестность терминального состояния

$$\begin{aligned} |q_i^* - q_i(t_k)| < \delta_{i1}, \quad |\dot{q}_i^* - \dot{q}_i(t_k)| < \delta_{i2}, \\ \delta_{i1}, \delta_{i2} > 0, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\mathbf{q}^* = [q_1^*, \dots, q_n^*]^T$, $\dot{\mathbf{q}}^* = [\dot{q}_1^*, \dots, \dot{q}_n^*]^T$ – цель управления, δ_{i1}, δ_{i2} – заданные постоянные; при этом достижение окрестности (7) должно выполняться за время, близкое к оптимальному, удержание системы в окрестности не должно вызывать колебательного режима управляющего сигнала, управление на всей траектории системы не должно иметь точек разрыва.

Построение закона управления

Для решения поставленной задачи воспользуемся принципом декомпозиции по Черноусько [8, 11, 12] исходной системы на элементарные подсистемы, для каждой из которых построим управление, удовлетворяющее поставленным условиям. Для этого рассмотрим систему (1) в виде

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{u} + \mathbf{S}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t), \quad (8)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ – матрица (3), \mathbf{u} – вектор управляющих воздействий, $\mathbf{S}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ – вектор-функция

$$\mathbf{S}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \mathbf{Q}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) - \sum_{j,k=1}^n \Lambda_{jk} \dot{q}_j \dot{q}_k, \quad (9)$$

где $\Lambda_{jk} = (\Lambda_{1jk}, \dots, \Lambda_{njk})^T$ – n -мерные векторы с компонентами

$$\Lambda_{ijk} = \frac{\partial a_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial a_{jk}}{\partial q_i}. \quad (10)$$

Умножим обе части уравнения (8) на $\bar{\mathbf{A}}\mathbf{A}^{-1}$. Обозначим

$$x_i = [\bar{\mathbf{A}}\mathbf{q}]_i, \quad (11)$$

тогда

$$\ddot{x}_i = u_i + v_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$v_i = S_i - [\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{u} + \mathbf{S})]_i. \quad (13)$$

Система (12), (13) эквивалентна исходному уравнению (8) [9]. Пусть имеют место неравенства

$$|v_i| \leq \rho_i h_i, \quad \rho_i < 1, \quad i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

Функции v_i будем рассматривать в (12) как независимые ограниченные возмущения, удовлетворяющие условию (5). Тогда исходная нелинейная система распадается на n линейных подсистем (i -я подсистема описывается i -м уравнением (12)), подверженных возмущениям, с одной степенью свободы каждая. Таким образом, для решения задачи достаточно решить n более простых задач управления для подсистем второго порядка.

Построим закон управления для i -й подсистемы (12), для простоты опустим индекс i . Известный закон управления, предложенный в работе [9], имеет вид

$$\begin{aligned} u_{game} &= h \cdot \text{sat}(\Psi(x, \dot{x})), \\ \Psi(x, \dot{x}) &= -x - \frac{\dot{x}|\dot{x}|}{2h(1-\rho)}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\text{sat}(\Psi)$ – функция насыщения, обеспечивающая сглаживание функции переключения Ψ ,

$$\text{sat}(\Psi) = \begin{cases} 1, & \Psi > \chi, \\ \frac{\Psi}{\chi}, & |\Psi| \leq \chi, \\ -1, & \Psi < -\chi, \end{cases}$$

χ – малая положительная постоянная.

При этом, как показано в той же работе [9], управление (15) при достижении системой терминальной точки вызывает затухающие колебания управляющего сигнала, что может являться недопустимым для реальных систем управления или приводить к большим энергетическим затратам. Поэтому там же предложено многорежимное управление, которое по достижении окрестности терминальной точки переходит во второй режим (этап) с другой функцией переключения. Однако авторы замечают, что такое управление имеет точку разрыва на любой траектории – в момент переключения режима управления.

Определение устойчивости систем с несколькими режимами работы является сложной задачей, так как переключение между режимами в общем виде является случайным процессом [13], что может быть также осложнено наличием априорно неизвестных возмущений в виде шумов и неточности параметров объекта управления. В связи с этим целесообразно использовать подход, позволяющий избежать наличие точек разрыва в управлении. Одним из таких подходов является применение аппарата нечеткой логики [14], что приводит к построению интеллектуального управления с несколькими режимами работы и нечетким переключением между ними.

Для построения такого интеллектуального закона управления необходимо определить законы, действующие «в большом» и «в малом» отдалении от терминальной точки, а также нечеткий логический вывод, позволяющий объединить их, избегая точек разрыва. В качестве закона, действующего вдали от терминальной точки, выберем закон (15), так как он является квазиоптимальным по быстродействию и обладает малой чувствительностью к изменению параметров системы [9].

После достижения целевой окрестности терминальной точки система должна сохранять свое состояние, поэтому целесообразно в качестве закона «в малом» выбрать закон, позволяющий максимизировать область притяжения системы и применимый вблизи терминальной точки [15], который имеет вид

$$u_{form} = \begin{cases} h, & \gamma(x + \dot{x}) \geq h, \\ \gamma(x + \dot{x}), & |\gamma(x + \dot{x})| < h, \\ -h, & \gamma(x + \dot{x}) \leq -h, \end{cases} \quad (16)$$

где γ – коэффициент усиления, $\gamma < -1$.

Для переключения между режимами (15) и (16) определим нечеткий логический вывод Такаги – Сугено [16–18] с базой правил

$$\begin{aligned} D_1 : r = \alpha_1 &\Rightarrow y_1 = u_{game}, \\ D_2 : r = \alpha_2 &\Rightarrow y_2 = u_{form}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $r = \sqrt{x^2 + \dot{x}^2}$ – расстояние до терминальной точки, α_1, α_2 – нечеткие лингвистические термы блока фаззификации, в котором выполняется процедура определения значений функций принадлежности $m_1(x), m_2(x)$ соответственно; y_1, y_2 – выходные переменные блока вывода [16].

Интеллектуальный закон на базе законов (15), (16) и нечеткого логического вывода с базой правил (17) будет иметь вид

$$u_{int} = \frac{m_1(x)y_1 + m_2(x)y_2}{m_1(x) + m_2(x)}. \quad (18)$$

Моделирование

Рассмотрим систему (1) с двумя степенями свободы в виде (8) с матрицей кинетической энергии вида

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

внешними силами

$$Q_1 = \sin(2q_1 + q_2), Q_2 = -0,8(\dot{q}_1 + 2\dot{q}_2)^2 \quad (20)$$

и начальными и конечными условиями

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(t_0) &= [0,87; -0,93], \dot{\mathbf{q}}(t_0) = [0; 0], \\ \mathbf{q}^* &= [0; 0], \dot{\mathbf{q}}^* = [0; 0]. \end{aligned} \quad (21)$$

Тогда уравнения (12) примут вид

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= u_1 + \sin(x_1), \\ \ddot{x}_2 &= u_2 - 0,8\dot{x}_2^2, \end{aligned} \quad (22)$$

при этом начальные условия для каждой из систем примут вид

$$\begin{aligned} x_1(t_0) &= 0,8, \quad \dot{x}_1(t_0) = 0, \\ x_2(t_0) &= -1, \quad \dot{x}_2(t_0) = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Подсистема 1

Рассмотрим первую подсистему (22)

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= v + u_1, \\ v &= \sin x, \end{aligned} \quad (24)$$

которая соответствует классической задаче управления обратным маятником [19], где x – отклонение маятника от нормали, а точка $[x, \dot{x}] = [0, 0]$ – точка неустойчивого равновесия.

Заметим, что система (24) может рассматриваться при различных параметрах обратного маятника, так как достаточно провести некоторые преобразования для введения безразмерного времени, что приведет к форме (24) [15].

Проведем моделирование систем (19), (15) и (19), (18) при начальных условиях (23) $[x_0, \dot{x}_0] = [0,8; 0]$ с параметрами $\delta_1 = 0,01$ град, $\delta_2 = 0,01$ град/с, $\rho = 0,717$, $\gamma = 4$,

$$m_1(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ 2\left(\frac{x}{0,017}\right)^2, & 0 < x \leq \frac{0,017}{2}, \\ 1 - 2\left(\frac{x - 0,017}{0,017}\right)^2, & \frac{0,017}{2} < x \leq 0,017, \\ 1, & x > 0,017, \end{cases} \quad (25)$$

$$m_2(x) = 1 - m_1(x).$$

Поведение системы (24) под управлением закона (15) и закона (18) представлено на рис. 1, управляющие сигналы законов (15), (18) показаны на рис. 2.

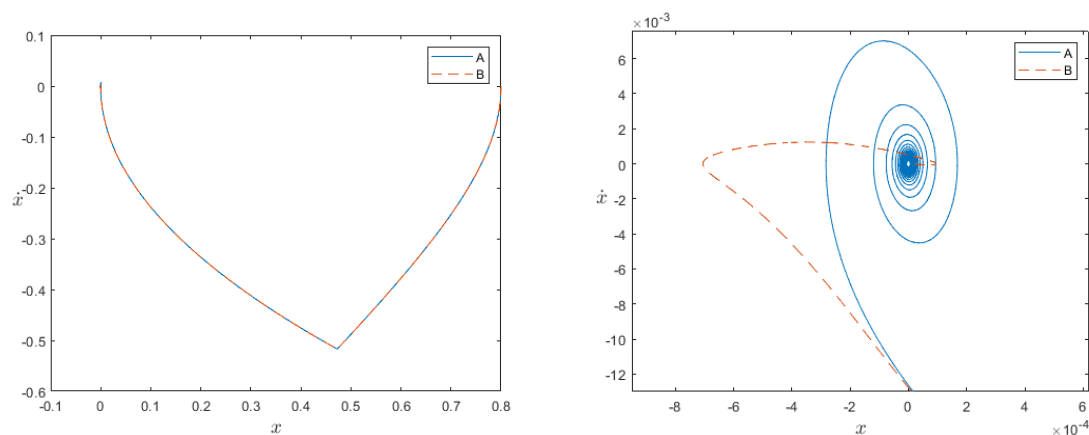


Рис. 1. Поведение системы (19) на фазовой плоскости:
 А – управление (15), В – управление (18), справа – вблизи терминальной точки

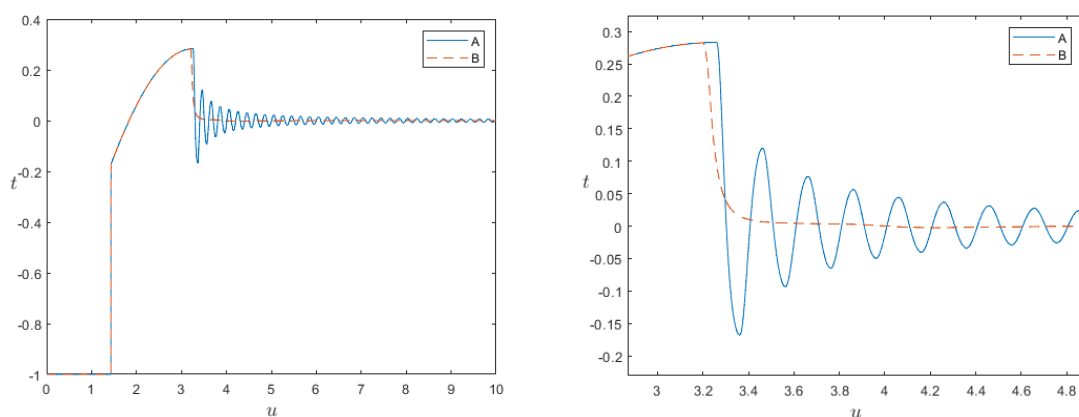


Рис. 2. Управляющие сигналы для системы (19):
 А – (15), В – (18), справа – вблизи терминальной точки

Закон управления (15) приводит систему (24) в окрестность терминальной точки за 3,26 с, закон (18) – за 3,33 с. При этом в отличие от закона (15) закон (18) позволяет избежать появления колебательного режима управляющего сигнала вблизи терминальной точки.

Подсистема 2

Рассмотрим вторую подсистему (22), представленную в работе [9] для анализа закона управления (15):

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= v + u_2, \\ v &= -0,8\dot{x}^2, \end{aligned} \quad (26)$$

Проведем моделирование систем (26), (15) и (26), (18) при начальных условиях (23) $[x_0, \dot{x}_0] = [-1; 0]$ с параметрами $\delta_1 = 0,01$ град, $\delta_2 = 0,01$ град/с, $\rho = 0,8$, $\gamma = 4$, $m_1(x)$ и $m_2(x)$ те же, что и в (24).

Поведение системы (26) под управлением закона (15) и закона (18) представлено на рис. 3, управляющие сигналы законов (15), (18) показаны на рис. 4.

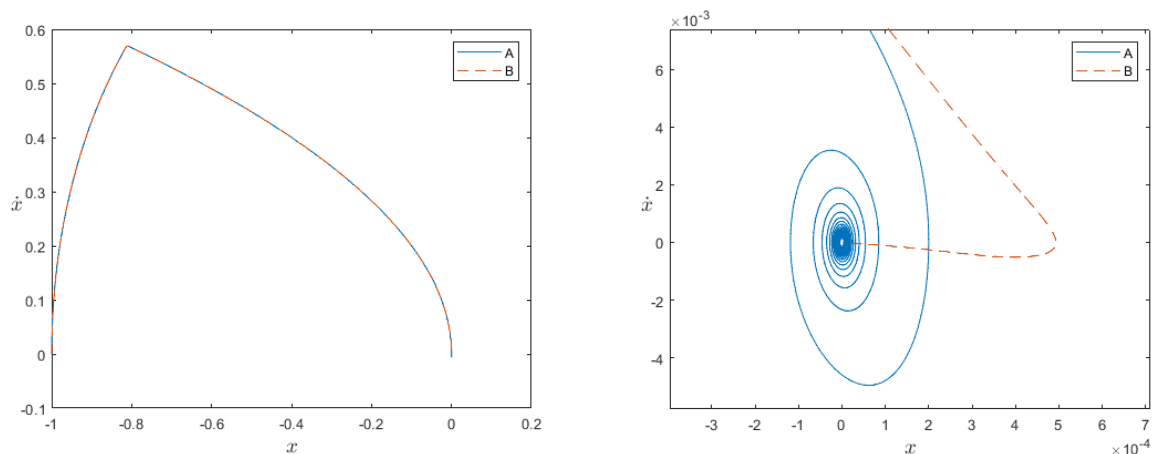


Рис. 3. Поведение системы (21) на фазовой плоскости:
 А – управление (15), В – управление (18), справа – вблизи терминальной точки

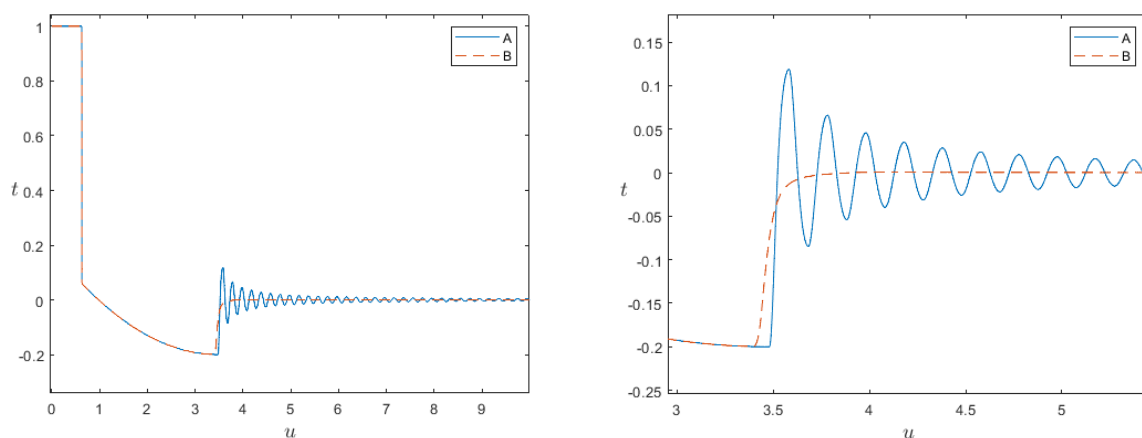


Рис. 4. Управляющие сигналы для системы (21):
 А – (15), В – (18), справа – вблизи терминальной точки

Закон управления (15) приводит систему (26) в окрестность терминальной точки за 3,47 с, закон (18) – за 3,55 с. При этом так же, как и в предыдущем примере, закон (18) позволяет избежать появления колебательного режима управляющего сигнала вблизи терминальной точки в отличие от закона (15).

После определения управлений для каждой из подсистем системы (22) воспользуемся ими для управления исходной системой (1) с параметрами (19), (20). Такая система, разрешенная относительно вторых производных, имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = \frac{2}{3}u_1 + \frac{2}{3}Q_1 - \frac{1}{3}u_2 - \frac{1}{3}Q_2, \\ \ddot{q}_2 = \frac{2}{3}u_2 + \frac{2}{3}Q_2 - \frac{1}{3}u_1 - \frac{1}{3}Q_1. \end{cases} \quad (27)$$

Проведем моделирование системы (27) при условиях (21), результаты моделирования представлены на рис. 5. Система достигает терминального состояния за конечное время, значит, интеллектуальные управления, построенные для каждой из подсистем, полученных в соответствии с принципом декомпозиции, обеспечивают устойчивость всей системы.

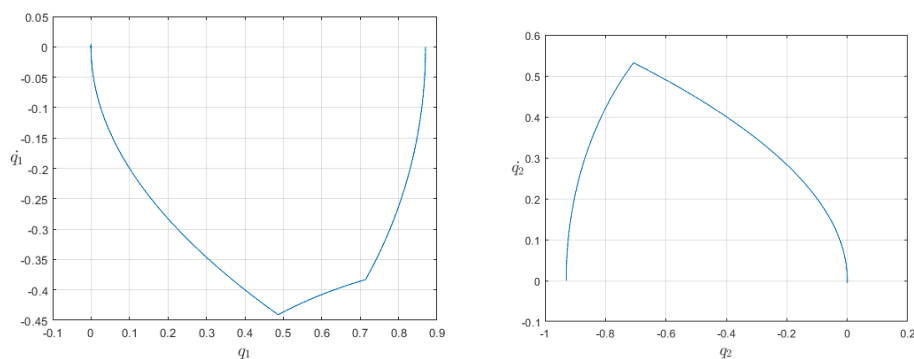


Рис. 5. Поведение системы (27) на фазовой плоскости по двум степеням свободы

Анализ результатов моделирования показывает, что построенное интеллектуальное управление (18) на базе нечеткого логического вывода сохраняет преимущества законов (15) и (16): не требует точного знания нелинейных членов и возмущающих сил в уравнениях движения, мало чувствительно к незначительным вариациям параметров системы и дополнительных возмущений [9], а также не имеет точек разрыва на области управления. Применение принципа декомпозиции позволяет рассматривать систему с несколькими степенями свободы как совокупность отдельных подсистем, благодаря чему можно определить управления, обеспечивающие устойчивость каждой подсистемы, и использовать их для управления исходной системой.

Заключение

Построенный интеллектуальный закон управления на основе принципа декомпозиции и квази-оптимального по быстродействию закона и закона, обеспечивающего максимизацию области притяжения, с использованием нечеткого логического вывода обеспечивает достижение окрестности терминальной точки за время, близкое к оптимальному, при этом в сравнении с известным квазиоптимальным по быстродействию законом управления предлагаемый закон не входит в колебательный режим вблизи терминальной точки, а также не имеет точек разрыва на траектории движения нелинейной динамической системы. Показано, что применение принципа декомпозиции позволяет построить интеллектуальные законы управления для системы с несколькими степенями свободы.

Список литературы

1 Особенности синтеза системы угловой стабилизации высокоточных беспилотных летательных аппаратов / А. С. Сыров, В. Ю. Рутковский, В. М. Глумов [и др.] // Проблемы управления. – 2017. – № 2. – С. 56–67. – ISSN 2712-8687.

2 Солодкий, А. И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России : проблемы и пути их решения. Новый этап / А. И. Солодкий // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 6. – С. 10–19. – ISSN 2077-7175.

3 Маркелов, В. М. Интеллектуальные транспортные системы как инструмент управления / В. М. Маркелов, И. В. Соловьев, В. Я. Цветков // Economic Consultant. – 2014. – № 3(7). – С. 42–49. – ISSN 2686-9012.

4 Жанказиев, С. В. Интеллектуальные транспортные системы : учебное пособие / С. В. Жанказиев. – Москва : МАДИ, 2016. – 120 с. – ISBN 978-5-91837-156-5.

5 Задачи управления движением многорежимных беспилотных летательных аппаратов / А. С. Сы-

References

1 Features of the synthesis of the angular stabilization system for high-precision unmanned aerial vehicles / A. S. Syrov, V. Yu. Rutkovsky, V. M. Glumov [et al.] // Problems of Management. – 2017. – No. 2. – P. 56–67. – ISSN 2712-8687.

2 Solodkiy, A. I. Development of intelligent transport systems in Russia : problems and ways to solve them. New stage / A. I. Solodkiy // Intellect. Innovation. Investments. – 2020. – No. 6. – P. 10–19. – ISSN 2077-7175.

3 Markelov, V. M. Intelligent transport systems as a management tool / V. M. Markelov, I. V. Soloviev, V. Ya. Tsvetkov // Economic Consultant. – 2014. – No. 3(7). – P. 42–49. – ISSN 2686-9012.

4 Zhankaziev, S. V. Intelligent transport systems : textbook. allowance / S. V. Zhankaziev. – Moscow : MADI, 2016. – 120 p. – ISBN 978-5-91837-156-5.

5 Problems of motion control of multi-mode unmanned aerial vehicles / A. S. Syrov, A. M. Puchkov, V. Yu. Rutkovsky,

ров, А. М. Пучков, В. Ю. Рутковский, В. М. Глу-
мов // Проблемы управления. – 2014. – № 4. –
С. 45–52. – ISSN 1819-3161.

6 **Шалягин, Д. В.** Интеллектуализация систем
управления / Д. В. Шалягин, Е. Н. Розенберг,
В. И. Астрахан // Железнодорожный транспорт. –
2014. – № 12. – С. 21–23. – ISSN 0044-4448.

7 **Капустин, М. Ю.** Модель адаптивной системы
прицельного электропневматического торможе-
ния электропоезда / М. Ю. Капустин, С. И. Крас-
нолобов, П. С. Саркисян // Наука и техника транс-
порта. – 2011. – № 4. – С. 33–43. – ISSN 2074-9325.

8 **Черноусько, Ф. Л.** Декомпозиция и синтез
управления в нелинейных динамических системах
/ Ф. Л. Черноусько // Оптимальное управление и
дифференциальные уравнения : Сборник статей.
К семидесятилетию со дня рождения академика
Евгения Фроловича Мищенко. – Москва : Наука;
Физматлит, 1995. – Т. 211. – С. 457–472. –
ISSN 0371-9685.

9 **Ананьевский, И. М.** Непрерывное управление
механической системой на основе метода деком-
позиции / И. М. Ананьевский, С. А. Решмин // Из-
вестия Российской академии наук. Теория и си-
стемы управления. – 2014. – № 4. – С. 3–17. –
ISSN 1029-3620.

10 **Пятницкий, Е. С.** Принцип декомпозиции в
управлении механическими системами / Е. С. Пят-
ницкий // Доклады АН СССР. – 1988. – Т. 300. –
№ 2. – С. 300–303. – ISSN 0002-3264.

11 **Черноусько, Ф. Л.** Декомпозиция и субопти-
мальное управление в динамических системах /
Ф. Л. Черноусько // Прикладная математика и ме-
ханика. – 1990. – Т. 54. – № 6. – С. 883–893. –
ISSN 0032-8235.

12 **Черноусько, Ф. Л.** Декомпозиция управления
динамической системой / Ф. Л. Черноусько // До-
клады АН СССР. – 1990. – Т. 314. – № 4. – С. 801–
805. – ISSN 0002-3264.

13 Двухзонные следящие системы / В. В. Шеваль,
В. И. Дорохов, С. А. Исаков, В. И. Земцов. –
Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 88 с.

14 **Асадуллаев, Р. Г.** Нечеткая логика и нейрон-
ные сети / Р. Г. Асадуллаев. – Белгород, 2017. –
309 с.

15 **Формальский, А. М.** Управление движением
неустойчивых объектов / А. М. Формальский //
ООО Издательская фирма «Физико-математиче-
ская литература», 2012. – 232 с. – ISBN 578-5-
9221-1460-8.

16 **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические
алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская,

V. M. Glumov // Problems of Management. –
2014. – No. 4. – P. 45–52. – ISSN 1819-3161.

6 **Shalyagin, D. V.** Intellectualization of control
systems / D. V. Shalyagin, E. N. Rozenberg,
V. I. Astrakhan. // Railway Transport. – 2014. –
No. 12. – P. 21–23. – ISSN 0044-4448.

7 **Kapustin, M. Yu.** Model of an adaptive sys-
tem for targeted electropneumatic braking of an
electric train / M. Yu. Kapustin, S. I. Krasnol-
obov, P. S. Sarkisyan // Science and technology
of transport. – 2011. – No. 4. – P. 33–43. –
ISSN 2074-9325.

8 **Chernousko, F. L.** Decomposition and control
synthesis in nonlinear dynamical systems /
F. L. Chernousko // Optimal control and differen-
tial equations, Collection of articles : On the occa-
sion of the seventieth birthday of Academician
Evgeniy Frolovich Mishchenko. – Moscow :
Nauka, Fizmatlit, 1995. – Vol. 211. – P. 457–472.
– ISSN 0371-9685.

9 **Anan'evskii, I. M.** Continuous control of a
mechanical system based on the decomposition
method / I. M. Anan'evskiy, S. A. Reshmin //
Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Theory
and control systems. – 2014. – No. 4. – P. 3–17.
– ISSN 1029-3620.

10 **Pyatnitsky, E. S.** Decomposition principle
in the control of mechanical systems / E. S. Py-
atnitsky // Report Academy of Sciences of the
USSR. – 1988. – V. 300. – No. 2. – P. 300–303.
– ISSN 0002-3264.

11 **Chernousko, F. L.** Decomposition and
suboptimal control in dynamic systems /
F. L. Chernous'ko // Applied Mathematics and
Mechanics. – 1990. – V. 54. – No. 6. – P. 883–
893. – ISSN 0032-8235.

12 **Chernousko, F. L.** Decomposition of con-
trol of a dynamical system / F. L. Chernous'ko
// Report Academy of Sciences of the USSR. –
1990. – V. 314. – No. 4. – P. 801–805. –
ISSN 0002-3264.

13 Two-zone tracking systems / V. V. Sheval,
V. I. Dorokhov, S. A. Isakov, V. I. Zemtsov. –
Moscow : Energoatomizdat, 1984. – 88 p.

14 **Asadullaev, R. G.** Fuzzy logic and neural
networks / R. G. Asadullaev. – Belgorod, 2017.
– 309 p.

15 **Formalsky, A. M.** Control of the movement
of unstable objects / A. M. Formalsky // LLC
Publishing Company "Physical and Mathemat-
ical Literature", 2012. – 232 p. – ISBN 578-5-
9221-1460-8.

16 **Rutkovskaya, D.** Neural networks, genetic
algorithms and fuzzy systems /
D. Rutkovskaya, M. Pilinsky, L. Rutkovsky. –

М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия, 2006. – 452 с. – ISBN 5-93517-103-1.

17 **Штовба, С. Д.** Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. – Москва : Горячая линия, 2007. – 288 с. – ISBN 5-93517-359-X.

18 **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с. – ISBN 978-5-9963-1495-9.

19 **Колесников, А. А.** Управление нелинейными колебаниями. Энергетические инварианты / А. А. Колесников // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2009. – № 2. – ISSN 1029-3620.

Moscow : Hot line, 2006. – 452 p. – ISBN 5-93517-103-1.

17 **Shtovba, S. D.** Design of fuzzy systems by means of MatLab / S. D. Shtovba. – Moscow : Goryachaya line, 2007. – 288 p. – ISBN 5-93517-359-X.

18 **Pegat, A.** Fuzzy modeling and control / A. Pegat. – Moscow : BINOM. Knowledge Laboratory, 2013. – 798 p. – ISBN 978-5-9963-1495-9.

19 **Kolesnikov, A. A.** Control of non-linear oscillations. Energy invariants / A. A. Kolesnikov // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory And Control Systems. – 2009. – No. 2. – ISSN 1029-3620.

A. A. Agapov

BUILDING INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS BASED ON QUASI-OPTIMAL CONTROL STRUCTURES AND FUZZY LOGICAL INFERENCE

Abstract. It is considered the problem of providing automatic control of dynamic objects that are part of an intelligent transport system and operate in various modes which requires an increase in the efficiency of the control laws used in order to maintain speed, stability and others. The initial system is presented in the form of Lagrange equations of the second kind, which restrictions are imposed on it to guarantee full controllability of the system. To construct the control, the principle of decomposition is used, which divides the system with n degrees of freedom into n independent subsystems with limited perturbations. In this paper, an intelligent control law for a subsystem with a priori unknown perturbations is constructed based on a law that is quasi-optimal in terms of speed and a law that ensures the maximization of the attraction area, using fuzzy logical inference. Modeling is carried out on examples with various non-linear types of perturbations. The analysis of the simulation results shows that the constructed control law ensures that the ambit of the terminal point is reached in a time close to optimal, while, in comparison with the known quasi-optimal control law in terms of speed, the proposed law does not enter the oscillatory mode near the terminal point, and also has no discontinuity points on trajectories of motion of a nonlinear dynamic system. It is shown that the application of the decomposition principle makes it possible to construct intelligent control laws for a system with several degrees of freedom.

Keywords: nonlinear dynamic system, quasi-optimal control law, intelligent transportation systems, Lagrange equations of the second kind, a priori unknown perturbations, fuzzy logic inference.

For citation: Agapov, A. A. Building intelligent transportation systems based on quasi-optimal control structures and fuzzy logical inference / A. A. Agapov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 8–17. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_8.

Сведения об авторах

Агапов Александр Андреевич
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вычислительная техника и
автоматизированные системы управления»,
ассистент,
e-mail: agapov2794@gmail.com

Information about the authors

Agapov Alexander Andreyevich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computing Machinery and
Computerized Control Systems»,
Lecturer,
e-mail: agapov2794@gmail.com

А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина

ПОДХОД К ПРОВЕРКЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ *

Аннотация. Для повышения эффективности принятия решений при диагностировании промышленного оборудования предложен подход к проверке базы знаний (БЗ), содержащей смешанные продукционные правила (СПП), интеллектуальных систем диагностирования оборудования. Представлена классификация структурных ошибок в БЗ с их определением и представлением в виде ориентированного графа, а также рекомендации по их устранению. Данный подход позволит уменьшить объем БЗ, что сделает процесс поиска более эффективным и облегчит организацию управления выводом. Приведены фрагменты экранных форм разработанной программной системы автоматического поиска структурных ошибок в БЗ. Программная система позволит безошибочно удалять лишние правила без потери полезной информации.

Ключевые слова: база знаний, смешанные продукционные правила, структурные ошибки, статический анализ.

Для цитирования: Колоденкова, А. Е. Подход к проверке базы знаний интеллектуальных систем диагностирования промышленного оборудования / А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 18–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_18.

Введение

В настоящее время интеллектуальные системы диагностирования промышленного оборудования, основанные на БЗ, являются одними из самых распространенных и сложных, поскольку к ним предъявляются жесткие требования не только к надежности системы, но и к принятию решений в условиях разнородной информации. Это обусловлено возрастающей сложностью оборудования, с неполной исходной информацией, полученной во время эксплуатации, а также необходимостью применения экспертной информации, полученной на основе опыта персонала в процессе своей профессиональной деятельности в области технической диагностики, с целью повышения достоверности результата.

Эффективность работы подобных систем зависит от способа представления и хранения знаний, полученных от персонала, методов обработки информации, а также методов логического вывода [1, 2]. В процессе разработки СПП знания постоянно накапливаются, изменяются, используются, поэтому БЗ необходимо регулярно тестировать. При наполнении новыми правилами или изменении существующих правил в БЗ возникают структурные ошибки [3–6], которые могут привести к получению неправильных решений (заклучений, выводов) относительно технического состояния оборудования. Отсутствие данных ошибок приводит к уменьшению времени, затрачиваемого на принятие решения.

Для решения данной проблемы авторами предложен подход к проверке БЗ интеллектуальных систем диагностирования оборудования на основе статического анализа.

1 Классификация структурных ошибок в базе знаний

В настоящее время существует большое количество определений понятия «ошибка» в БЗ [7–9]. Однако в работе под ошибкой будет пониматься нарушение, наблюдаемое в БЗ, содержащей СПП, выявляемое в процессе статического анализа, порождающее проблемы из-за невозможности получить достоверные выводы в определенные моменты времени.

На рис. 1 представлена классификация структурных ошибок в БЗ, часто встречающихся в интеллектуальных системах диагностирования промышленного оборудования. Рис. 1 адаптирован по материалам [4, 7–10].

Под СПП понимается модифицированная модель нечетких продукционных правил [11, 12]

$$R_j : \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{j1}(w_{k1}) \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{j2}(w_{k2}) \text{ И... } x_n = \tilde{A}_{jn}([x_{jn\min}, x_{jn\max}]) (w_{kn}), \text{ ТО } y = B_j \quad [\text{Ранг}_j], \quad (1)$$

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

где x_i – входные переменные (параметры оборудования), $A_i, i = 1, \dots, n$; A_i – четкие значения переменных; $\tilde{A}_i = \{x_i, \mu_{\tilde{A}_i}(x_i)\}$ – нечеткие значения переменных, $\mu_{\tilde{A}_i}(x_i)$ – функция принадлежности; $\tilde{A}_i([x_{i\min}, x_{i\max}])$ – значения переменных представлены в виде интервала, где $x_{i\min}, x_{i\max}$ – минимальное и максимальное значения i -й переменной, которые могут принимать только числовые значения; y – выходная переменная (результат); w_i – веса входных переменных, которые характеризуют их важность, $w_i \in [0, 1]$; R_j – СПП, $j = 1, \dots, k$, k – количество СПП; B – четкое и/или нечеткое значение выходной переменной (параметра); Ранг – значимость СПП, $\text{Ранг} \in \{1, 2, \dots, k\}$, $\text{Ранг} \in [0, 1]$.

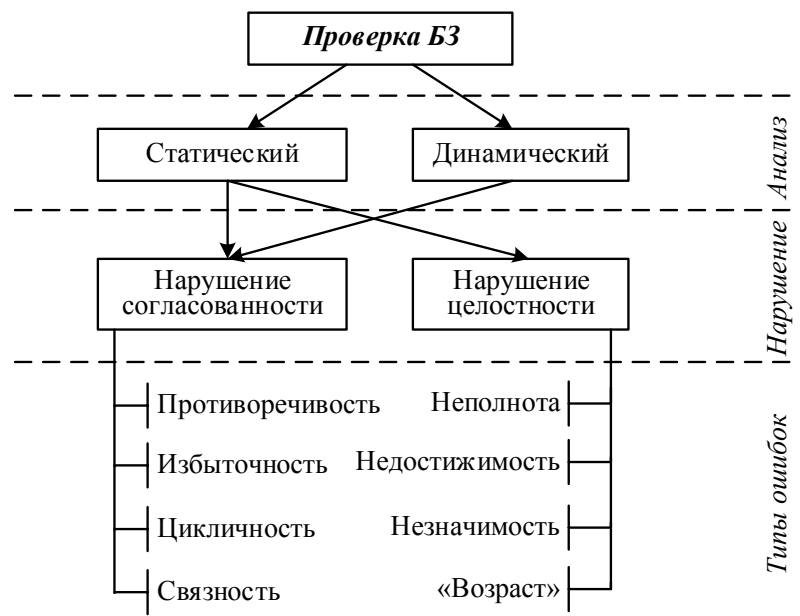


Рис. 1. Классификация структурных ошибок в БЗ

Если ошибки в БЗ появляются при сопоставлении отдельных СПП, то осуществляется статический анализ, если в цепочке СПП – динамический анализ.

Для проведения статического анализа рекомендуется использовать ориентированный граф (вершинам соответствуют входные и выходные переменные, а ребрам – связи между переменными), позволяющий наглядно представить БЗ. Для выявления нарушения согласованности веса входных переменных w_i могут не учитываться.

Определение 1. Смешанные продукционные правила называются противоречивыми, если они имеют одинаковые условия (одинаковые значения входных переменных), но различные заключения (различные значения выходных переменных) (рис. 2):

$$R_1 : \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{11} \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{12} \text{ И... И } x_n = \tilde{A}_{1n} ([x_{1n\min}, x_{1n\max}]), \text{ ТО } y = B_1,$$

$$R_2 : \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{11} \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{12} \text{ И... И } x_n = \tilde{A}_{1n} ([x_{1n\min}, x_{1n\max}]), \text{ ТО } y = B_2.$$

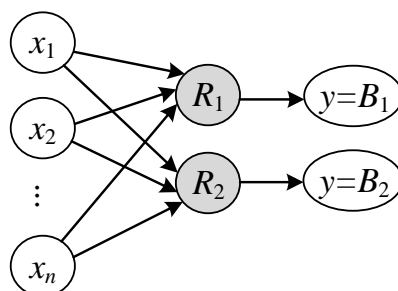


Рис. 2. Противоречивость в БЗ

Из рис. 2 видно, что правила R_1 и R_2 являются противоречивыми, поскольку одно и то же условие (A_{11} и $\tilde{A}_{12}, \dots, \tilde{A}_{1n}([x_{1n\min}, x_{1n\max}])$) активизирует разные выходные переменные (значения B_1 и B_2).

Определение 2. Смешанные продукционные правила называются избыточными, если два правила R_1 и R_2 полностью дублируют друг друга (содержат один и тот же набор условий (но условия могут быть расположены в различном порядке) и имеют одно и то же заключение).

В случае избыточности в БЗ СПП могут привести к тому, что одна и та же информация будет подсчитана дважды, что приведет к неправильному увеличению значения Ранга их заключений.

Следовательно, БЗ будет являться неизбыточной, если будут выполняться условия:

1) отсутствуют полные дубликаты СПП, т.е. в БЗ отсутствуют правила с одинаковыми условиями и заключениями (рис. 3):

$$R_1 : \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{11} \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{12} \text{ И... И } x_n = \tilde{A}_{1n}([x_{1n\min}, x_{1n\max}]), \text{ ТО } y = B_1,$$

$$R_2 : \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{11} \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{12} \text{ И... И } x_{1n} = \tilde{A}_{1n}([x_{1n\min}, x_{1n\max}]), \text{ ТО } y = B_1.$$

Для решения данной проблемы необходимо удалить все СПП дублирования, кроме одного;

2) отсутствуют неполные дубликаты (рис. 4):

$$R_1 : \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{11} \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{12}, \text{ ТО } y = B_1,$$

$$R_2 : \text{ЕСЛИ } x_2 = \tilde{A}_{12} \text{ И... И } x_n = \tilde{A}_{2n}([x_{2n\min}, x_{2n\max}]), \text{ ТО } y = B_1;$$

3) отсутствует включение условий, т.е. в БЗ не существует правил с одинаковыми заключениями, таких, что условие некоторого правила является подмножеством условия другого правила (рис. 5):

$$R_1 : \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{11} \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{12}, \text{ ТО } y = B_1,$$

$$R_2 : \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{11} \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{12} \text{ И... И } x_n = \tilde{A}_{2n}([x_{2n\min}, x_{2n\max}]), \text{ ТО } y = B_1.$$

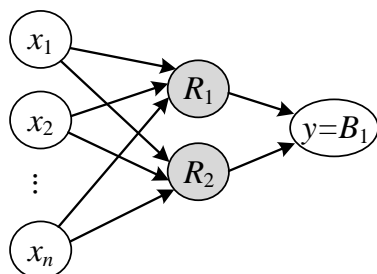


Рис. 3. Избыточность в БЗ (полные дубликаты СПП)

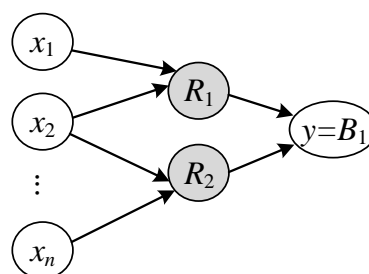


Рис. 4. Избыточность в БЗ (неполные дубликаты СПП)

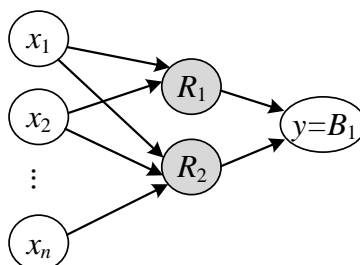


Рис. 5. Избыточность в БЗ (включение условий)

Единого решения для исправления условий 2 и 3 не существует, поэтому конкретное решение о способе улучшения БЗ и исправлении структурных ошибок принимает персонал в каждом конкретном случае.

Определение 3. Смешанные продукционные правила называются циклическими, если цепочка правил в наборе циклических правил образует цикл (рис. 6).

$$R_1 : \text{ЕСЛИ } x_1 = A_{11} \text{ И } x_2 = \tilde{A}_{12}, \text{ ТО } y = B_1,$$

$$R_2 : \text{ЕСЛИ } x_3 = B_1 \text{ И } x_4 = \tilde{A}_{22} \text{ И } x_5 = \tilde{A}_{23}, \text{ ТО } y = B_2,$$

$$R_3 : \text{ЕСЛИ } x_6 = B_2 \text{ И } x_7 = \tilde{A}_{32} \text{ И } x_8 = \tilde{A}_{33}, \text{ ТО } y = \tilde{A}_{12}.$$

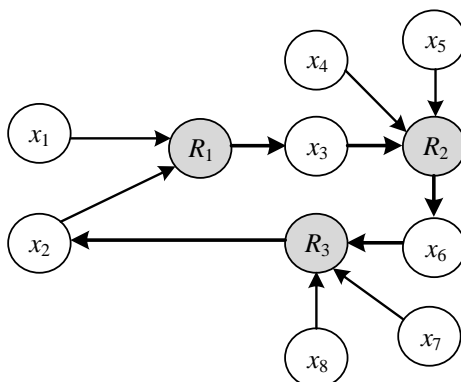


Рис. 6. Цикличность в БЗ

Следовательно, в БЗ отсутствуют циклические правила, если выполняются условия [13]:

- 1) отсутствует прямой цикл, т.е. в БЗ отсутствуют правила, в которых в условии и заключении присутствуют термы одной лингвистической переменной (ЛП);
- 2) отсутствует непрямой цикл, т.е. в БЗ отсутствуют правила, при которых ЛП определяют ЛП, от которых они зависят.

Определение 4. База знаний является связной, если для любой пары смежных СПП значение выходной ЛП тоже смежное, т.е. условия этих правил отличаются только одним условием из n условий, использующих одну и ту же ЛП с различными значениями:

$$R_1 : \text{IF } x_1 = A_{11} \text{ AND } x_2 = \tilde{A}_{12} \text{ AND... AND } x_n = \tilde{A}_{1n} ([x_{1n\min}, x_{1n\max}]), \text{ THEN } y = B_1,$$

$$R_2 : \text{IF } x_1 = A_{21} \text{ AND } x_2 = \tilde{A}_{12} \text{ AND... } x_n = \tilde{A}_{1n} ([x_{1n\min}, x_{1n\max}]), \text{ THEN } y = B_2.$$

Приведенные СПП являются смежными, поскольку значения A_{11} и A_{21} входной переменной x_1 смежные.

Определение 5. База знаний является неполной, если в ней отсутствуют СПП, приводящие к определенным значениям целевых параметров, которые могут служить конечной целью вывода [7]. В качестве ошибки неполноты могут выступать изолированные входные и выходные переменные, т.е. отсутствуют правила, ведущие к ним (рис. 7).

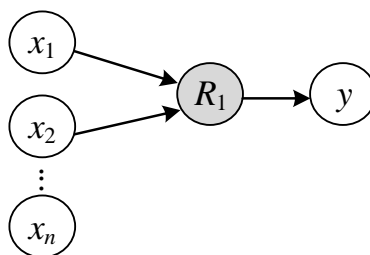


Рис. 7. Неполнота в БЗ (изолированные переменные)

Из рис. 7 видно, что переменная x_n является изолированной. Для решения данной проблемы персоналу предлагается выяснить следующее: если переменная является важной входной либо целевой выходной переменной, необходимо добавить правило, иначе переменная может быть удалена из БЗ.

Существуют три основные причины неполноты БЗ: 1) в процессе приобретения знаний персонал, возможно, непреднамеренно оставил пробелы в БЗ, не заметив этого; 2) поведение персонала часто основано на эвристических, неполных и неопределенных знаниях, которые переносятся в интеллектуальную систему; 3) персонал может сбиться с пути, поскольку БЗ становится все больше и становится неразрешимой.

Определение 6. Смешанные продукционные правила называются правилами недостижимого вывода, если заключение не является целью и не фигурирует в качестве условия ни в одном другом СПП, хранящемся в БЗ.

Отметим, что для исправления структурной ошибки – избыточности авторы предлагают проводить оценку правил по значимости и «возраста».

Оценивание значимости СПП осуществляется на основе длины условий правила [14]. Смешанное продукционное правило, включающее в себя большое количество входных переменных, получает ранг 1, далее 2 и т.д. (чем больше ранг СПП, тем оно полезнее для принятия решений). Поскольку значимость правила должна находиться в пределах $[0, 1]$, применяется правило нормирования, тогда в этом случае, чем меньше значение ранга, тем оно более значимое.

Данная оценка необходима для того, чтобы выявить менее значимые СПП, которые можно удалить из БЗ без какой-либо потери информации о работе и техническом состоянии оборудования. Для выбора СПП с минимальной комплексной оценкой значимости предлагается модифицированный логический вывод, основанный на правилах (1):

$$R_j^* = \min\{\text{Ранг}_j^*\},$$

где Ранг – комплексная оценка значимости для каждого j -го правила, $\text{Ранг}_j^* = Tr_j \cdot w_j^* \cdot \text{Ранг}_j$,

$$\text{Ранг}_j^* \in [0, 1]; w_j^* - \text{накопленная сумма весов условной части } j\text{-го правила, } w_j^* = \frac{\sum_{kn=1}^{n_{kn}} w_{kn}}{\sum_{i=1}^n w_i}, w_j^* \in [0, 1],$$

w_{kn} – веса входных переменных, значения которых известны (определены) в условиях СПП; Tr_j – степени срабатывания (уровня срабатывания) условий $Tr \in [0, 1]$ для каждого СПП R_j $j = 1, \dots, k$,

$$Tr_j = \bigcap_{i=1}^n \mu_{\vec{A}_i}^-(x_i) \quad [15] \quad (\text{где } \vec{A}_i - \text{значения входных переменных; } \mu_{\vec{A}_i}^-(x_i) - \text{степень принадлежности из-}$$

вестных значений x_i входных переменных \vec{A}_i СПП; \cap – символ, который обозначает операторы «AND», \min , произведение алгебры или любую T -норму).

Отметим, что для расчета накопленной суммы весов условной части j -го правила вводится понятие «сработало правило»: если условная часть j -го СПП имеет большой вес (например, $w_j^* = 0,9$), то считается, что заключение сработало. Если заключение не сработало (например, $\text{Ранг}_j = 0,3$), то условная часть j -го СПП w_j^* автоматически принимает малое значение, которое не влияет на принятие решений, и правило неактуально. Следовательно, существует возможность его удалить из БЗ.

На СПП с минимальной комплексной оценкой значимости ниже 0,5 следует обратить особое внимание, поскольку они в первую очередь подлежат удалению из БЗ.

Оценивание «возраста» СПП предлагается рассчитывать по формуле [16]

$$Age_j(t) = t - \frac{\sum_{l=1}^{N_j} t_l}{N_j(t)}, \quad Age \in [0; t], \quad j = \overline{1; k}, \quad (2)$$

где t – текущее время ($t = 2, 3, \dots$); t_l – индекс времени, когда была считана выборка входных переменных; $N_j(t)$ – количество выборок входных переменных.

Ранжирование СПП по возрасту осуществляется следующим образом. Каждый раз, когда создается новое правило, его возраст определяется индексом выборки данных, который используется в качестве отправной точки этого правила. Когда новая выборка данных привязывается к существующему правилу (расстояние от образца до этой фокальной точки меньше, чем расстояние до любых других фокальных точек), возраст этого правила становится меньше. Если правилу не присвоен ни один образец, оно становится старше на единицу. После ранжирования СПП по возрасту «старые» правила, возраст которых превышает средний возраст для этого правила более чем на «одну сигму» [16], могут быть удалены из БЗ.

2 Пример поиска структурных ошибок в БЗ системы диагностирования электротехнического оборудования нефтяного предприятия

Для автоматической проверки БЗ была разработана программная система (ПС) [17]. Для реализации ПС была выбрана интегрированная среда разработки *Microsoft Visual Studio*, обладающая большим числом инструментов и функций, и объектно-ориентированный язык программирования *C#*, поскольку он имеет статистическую типизацию, поддерживает полиморфизм. Для хранения СПП была использована СУБД *Microsoft SQL Server Management Studio*. Далее приведены фрагменты экранных форм ПС.

На рис. 8 представлена экранная форма входной информации «Добавление параметров и их значений».

Рис. 8. Экранная форма «Добавление параметров и их значений»

После добавления в БЗ всех переменных персонал переходит в окно «Добавление правил» (рис. 9).

Рис. 9. Экранная форма «Добавление правил»

Для проверки БЗ открывают таблицу правил и нажимают кнопку «Запустить проверку» (рис. 10).

№	Посылки правила	Связь посылок	Заключение правила	Важность правила
1	Напряжения фазы В=Низкое;Мощность из сети=Низкое;Ток ст...	Конъюн...	Исправность ТС АД=Исправное с небо...	1
2	Напряжения фазы В=Высокое;Мощность из сети=Высокое;	Конъюн...	Исправность ТС АД=Исправное с небо...	1
3	Мощность из сети=Низкое;Ток статора=Низкое;	Конъюн...	Исправность ТС АД=Исправное с небо...	1
4	Напряжения фазы С=Низкое;Напряжения фазы А=Низкое;Напр...	Конъюн...	Козэффициент полезного действия=Ум...	1
5	Напряжения фазы В=Низкое;Мощность из сети=Низкое;Ток ст...	Конъюн...	Исправность ТС АД=Неисправное	1

Рис. 10. Экранная форма «Выявление противоречивости в БЗ»

Выполнение проверки представлено на рис. 11.

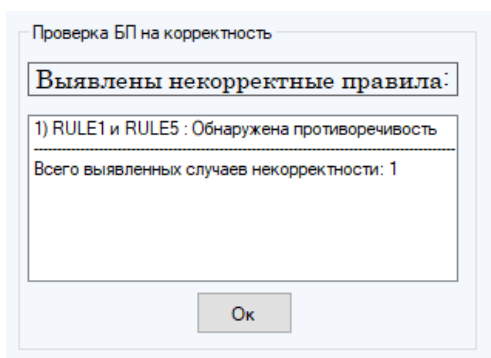


Рис. 11. Экранная форма «Результат проверки БЗ»

При выявлении противоречивых правил ПС исключает то правило, которое имеет наименьший вес. В случае обнаружения противоречивых правил с одинаковым весом выбор правила для исключения из БЗ остается за персоналом.

Результат диагностики представлен на рис. 12. В верхнем поле отображаются правила, с условиями, соответствующими введенным диагностируемому параметрам. Далее персонал выбирает сработавшее правило, способ дефаззификации и в нижнем окне выполняет нечеткий логический вывод по данному правилу. Вся информация о диагностировании оборудования записывается в базу данных и отображается во вкладке «Журнал диагностики».

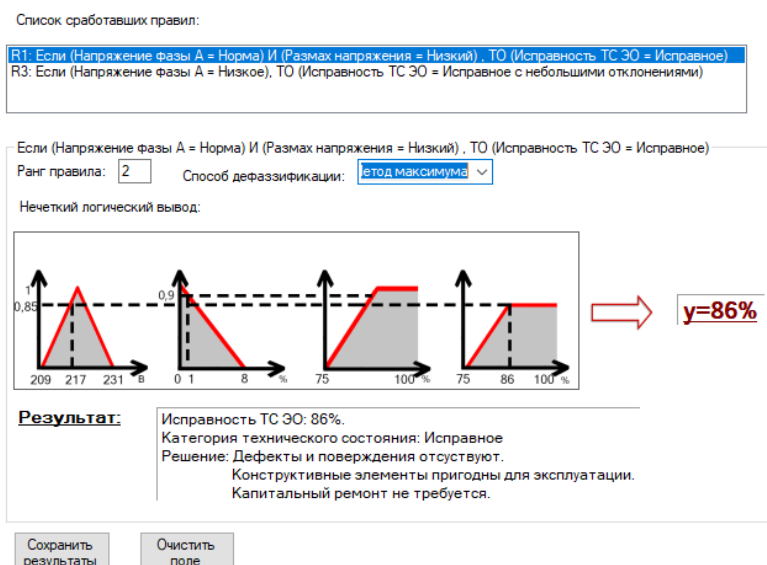


Рис. 12. Экранная форма «Результат диагностирования»

Для диагностирования технического состояния асинхронного электродвигателя трехфазного переменного тока с короткозамкнутым ротором серии ВАО5К-450, 560 дежурным персоналом были созданы СПП. Созданная БЗ содержала 953 правила, поскольку было определено 32 параметра (14 параметров, каждый из которых содержит одинаковое число термов, равное трем, и 18 параметров, содержащих число термов, равное двум). В результате проверки БЗ на нарушение согласованности база сократилась до 642 правил, при проверке на нарушение целостности база сократилась до 466 правил.

Заключение

В настоящей работе для повышения эффективности принятия решений при диагностировании промышленного оборудования предлагается подход к проверке БЗ, содержащей СПП интеллектуальных систем диагностирования оборудования. Для обнаружения ошибок в БЗ авторами предложен статистический анализ, а также приводятся рекомендации по их устранению в условиях множества разнородной информации. Данный подход позволяет безошибочно удалять СПП из БЗ без потери полезной ин-

формации для принятия диагностических решений относительно технического состояния оборудования, тем самым уменьшая объем БЗ в два раза, что делает процесс поиска более эффективным и облегчает организацию управления выводом.

Список литературы

- 1 **Ogheneovo, E. E.** Knowledge representation in artificial intelligence and expert systems using inference rule / E. E. Ogheneovo, P. A. Nlerum // *Int. J. Sci. Eng. Res.* – 2020. – Vol. 4. – P. 1886–1900.
- 2 **Yurin, A. Y.** Personal knowledge base designer: Software for expert systems prototyping / A. Y. Yurin, N. O. Dorodnykh // *SoftwareX.* – 2020. – Vol. 11. – P. 1–6.
- 3 **Рыбина, Г. В.** Верификация баз знаний в интегрированных экспертных системах / Г. В. Рыбина, В. В. Смирнов // *Новости искусственного интеллекта.* – 2005. – № 3. – С. 7–19. – ISSN 1682-8917.
- 4 **Dolinina, O.** Formal Models of the Structural Errors in the Knowledge Bases of Intellectual Decision Making Systems / O. Dolinina, N. Suchkova // *Computer Science On-line Conference.* – 2017. – P. 156–167.
- 5 QOS of data networks analyzing based on the fuzzy knowledge base / L. Globa, Z. Savchuk, O. Vasylenko, E. Siemens // *International Conference Infocommunications–Present and Future.* – 2020. – P. 130–149.
- 6 **Cao, Q.** Using rule quality measures for rule base refinement in knowledge-based predictive maintenance systems / Q. Cao, C. Zanni-Merk, A. Samet, F.D.B de Beuvron, C. Reich // *Cybernetics and Systems.* – 2020. – Vol. 2. – P. 161–176.
- 7 **Рыбина, Г. В.** Методы и алгоритмы верификации баз знаний в интегрированных экспертных системах / Г. В. Рыбина, В. В. Смирнов // *Известия РАН. Теория и системы управления.* – 2007. – № 4. – С. 91–102. – ISSN 1029-3620.
- 8 **Harmelen, F.** Applying rule-base anomalies to KADS inference structures / F. Harmelen // *Decision Support Systems.* – 1998. – Vol. 21. – P. 41–46.
- 9 **Pira, E.** Verification of confliction and unreachability in rule-based expert systems with model checking / E. Pira, M. Miralvand, F. Soltani // *International Journal of Artificial Intelligence.* – 2014. – Vol. 2. – P. 1–7.
- 10 **Vanthienen, J.** Experiences with Modeling and Verification of Regulations / J. Vanthienen, C. Mues, S. Goedertier // *REMO2V'06.* – 2006. – P. 793–799.
- 11 **Kolodenkova, A. E.** Integrated approach to processing diagnostic data based on heterogeneous cognitive models / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, V. E. Vereshchagin // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies.* – 2020. – P. 1–5.

References

- 1 **Ogheneovo, E. E.** Knowledge representation in artificial intelligence and expert systems using inference rule / E. E. Ogheneovo, P. A. Nlerum // *Int. J. Sci. Eng. Res.* – 2020. – Vol. 4. – P. 1886–1900.
- 2 **Yurin, A. Y.** Personal knowledge base designer: Software for expert systems prototyping / A. Y. Yurin, N. O. Dorodnykh // *SoftwareX.* – 2020. – Vol. 11. – P. 1–6.
- 3 **Rybina, G. V.** Verification of knowledge bases in integrated expert systems / G. V. Rybina, V. V. Smirnov // *Artificial Intelligence News.* – 2005. – No. 3. – P. 7–19. – ISSN 1682-8917.
- 4 **Dolinina, O.** Formal Models of the Structural Errors in the Knowledge Bases of Intellectual Decision Making Systems / O. Dolinina, N. Suchkova // *Computer Science On-line Conference.* – 2017. – P. 156–167.
- 5 QOS of data networks analyzing based on the fuzzy knowledge base / L. Globa, Z. Savchuk, O. Vasylenko, E. Siemens // *International Conference Infocommunications–Present and Future.* – 2020. – P. 130–149.
- 6 **Cao, Q.** Using rule quality measures for rule base refinement in knowledge-based predictive maintenance systems / Q. Cao, C. Zanni-Merk, A. Samet, F.D.B de Beuvron, C. Reich // *Cybernetics and Systems.* – 2020. – Vol. 2. – P. 161–176.
- 7 **Rybina, G. V.** Methods and algorithms of knowledge base verification in integrated expert systems / G. V. Rybina, V. V. Smirnov // *Izvestiya RAS. Theory and control systems.* – 2007. – No. 4. – P. 91–102. – ISSN 1029-3620.
- 8 **Harmelen, F.** Applying rule-base anomalies to KADS inference structures / F. Harmelen // *Decision Support Systems.* – 1998. – Vol. 21. – P. 41–46.
- 9 **Pira, E.** Verification of confliction and unreachability in rule-based expert systems with model checking / E. Pira, M. Miralvand, F. Soltani // *International Journal of Artificial Intelligence.* – 2014. – Vol. 2. – P. 1–7.
- 10 **Vanthienen, J.** Experiences with Modeling and Verification of Regulations / J. Vanthienen, C. Mues, S. Goedertier // *REMO2V'06.* – 2006. – P. 793–799.
- 11 **Kolodenkova, A. E.** Integrated approach to processing diagnostic data based on heterogeneous cognitive models / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, V. E. Vereshchagin // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies.* – 2020. – P. 1–5.

- 12 **Kolodenkova, A. E.** Verification of mixed production rules correctness in intelligent systems for diagnosing industrial equipment / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, V. O. Tuvaeva // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. – 2022. – Vol. 272. – P. 363–370.
- 13 **Simiński, R.** Circularity in rule knowledge bases detection using decision unit approach / R. Simiński, A. Wakulicz-Deja // *Monitoring, Security, and Rescue Techniques in Multiagent Systems*. – 2005. – P. 273–279.
- 14 Diagnostics of the technical condition of industrial equipment based on a system of hierarchical production rules / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, V. O. Tuvaeva, A. N. Guda // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 330 LNNS. – P. 180–187.
- 15 **Катасёв, А.** Нейронечеткая модель формирования нечетких правил для оценки состояния объектов в условиях неопределенности / А. Катасёв // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2019. – Т. 11. – № 3. – С. 477–492. – ISSN 2077-6853.
- 16 **Angelov, P.** Evolving fuzzy-rule-based classifiers from data streams / P. Angelov, X. Zhou // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2008. – Vol. 16. – P. 1462–1475.
- 17 **Колоденкова, А. Е.** Система смешанных продукционных правил для диагностирования технического состояния асинхронных электродвигателей / А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина // *Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023616943, 04.04.2023*. – EDN HZUGDJ.
- 12 **Kolodenkova, A. E.** Verification of mixed production rules correctness in intelligent systems for diagnosing industrial equipment / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, V. O. Tuvaeva // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. – 2022. – Vol. 272. – P. 363–370.
- 13 **Simiński, R.** Circularity in rule knowledge bases detection using decision unit approach / R. Simiński, A. Wakulicz-Deja // *Monitoring, Security, and Rescue Techniques in Multiagent Systems*. – 2005. – P. 273–279.
- 14 Diagnostics of the technical condition of industrial equipment based on a system of hierarchical production rules / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, V. O. Tuvaeva, A. N. Guda // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 330 LNNS. – P. 180–187.
- 15 **Katasev, A.** Neurofuzzy model of fuzzy rules formation for object condition assessment under uncertainty conditions / A. Katasev // *Computer research and modeling*. 2019. – Vol. 11. – No. 3. – P. 477–492. – ISSN 2077-6853.
- 16 **Angelov, P.** Evolving fuzzy-rule-based classifiers from data streams / P. Angelov, X. Zhou // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2008. – Vol. 16. – P. 1462–1475.
- 17 **Kolodenkova, A. E.** System of mixed production rules for diagnosing the technical condition of asynchronous electric motors / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // *Certificate of registration of a computer program No. 2023616943, 04.04.2023*. – EDN HZUGDJ.

A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina

APPROACH TO THE KNOWLEDGE BASE VALIDATION OF INTELLIGENT SYSTEMS IN INDUSTRIAL EQUIPMENT DIAGNOSTICS

Abstract. The paper considers the efficiency of decision making in industrial equipment diagnosis, an approach to the knowledge base validation (KBV) containing mixed production rules (MPRs) of intelligent equipment diagnosis systems. The classification of structural errors in the KBV with their definition and representation in the form of a directed graph, as well as recommendations for their elimination, is proposed. This approach will reduce the KBV size, which will make the search process more efficient and simplify the organization of output control. It is given the screen parts forms of the developed software system for automatic search using the structural errors in the KBV. The software system will provide to remove unnecessary rules without losing useful information.

Keywords: knowledge base, mixed production rules, structural errors, static analysis.

For citation: Kolodenkova, A. E. Approach to the knowledge base validation of intelligent systems in industrial equipment diagnostics / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobsheniya*. – 2023. – No. 3. – P. 18–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_18.

Сведения об авторах**Колоденкова Анна Евгеньевна**

Самарский государственный технический университет (СамГТУ),
кафедра «Информационные технологии»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Верещагина Светлана Сергеевна

Самарский государственный технический университет (СамГТУ),
кафедра «Информационные технологии»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: werechaginass@mail.ru

Information about the authors**Kolodenkova Anna Evgenievna**

Samara State Technical University,
Chair «Information Technology»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associated Professor, Head of the Chair,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Vereshchagina Svetlana Sergeevna

Samara State Technical University,
Chair «Information Technology»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: werechaginass@mail.ru

А. А. Агапов, А. А. Зарифьян (мл.)

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ УСЛОВИЯ МАКСИМУМА ФУНКЦИИ ОБОБЩЕННОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА

Аннотация. Рассмотрена возможность использования интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и аппарата нечеткой логики в задаче автоматического управления скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем. Построен автоматический регулятор скорости электровоза, проведено моделирование движения пассажирского поезда с локомотивом ЭП20 с заданной скоростью на участках Москва – Рязань и Москва – Адлер с соответствующем профилем пути. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что разработанный интеллектуальный алгоритм управления можно использовать при построении системы автоматического управления (САУ) скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем для обеспечения движения с заданной скоростью в различных режимах работы локомотива в условиях априорно неизвестных воздействий.

Ключевые слова: автоматическое регулирование скорости, интеллектуальный алгоритм управления, условие максимума функции обобщенной мощности, нечеткая логика.

Для цитирования: Агапов, А. А. Возможность использования интеллектуального алгоритма управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности в системе автоматического регулирования скорости электровоза / А. А. Агапов, А. А. Зарифьян (мл.) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 28–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_28.

Введение

Сегодня отрасль железнодорожного транспорта продолжает развиваться в условиях определенных ограничений. Так, после введения санкций [1] крупнейший российский производитель пассажирских вагонов «Трансмашхолдинг» (ТМХ) прекратил выпуск пассажирских электровозов ЭП20, созданных вместе с Alstom, кроме того, есть определенные зоны риска по текущим закупкам инновационных локомотивов. В связи с этим РЖД рассчитывают на появление нового отечественного пассажирского электровоза ЭП40 в 2025 году [2], а НЭВЗ, входящий в состав ТМХ, представил контактно-аккумуляторный маневровый электровоз ЭМКА2 с асинхронными тяговыми двигателями постоянного тока, которые могут питаться от контактной сети или бортового накопителя энергии и способны заряжаться от общепромышленных источников электроэнергии, что позволит снизить текущие эксплуатационные расходы на 40–60 % [3].

Появление новых единиц тягового подвижного состава требует внедрения отечественных элементов вместо импортных, в том числе и программного обеспечения. В «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» указано, что в транспортных стратегиях стран с высокоразвитыми транспортными системами в качестве одного из приоритетов выбрана задача развития новых технологий и решений: развитие инновационной железнодорожной инфраструктуры, подвижного состава и систем управления, например, автоматических систем управления поездом, в частности автоматического регулирования скорости.

Конструктивным решением задачи автоматического регулирования скорости поезда может быть использование квазиоптимальных методов синтеза законов управления [4] и интеллектуальных алгоритмов на их основе в совокупности с применением аппарата нечеткой логики [5, 6]. Рассмотрим возможность применения разработанного закона управления, представленного в работе [7], в системе автоматического управления (САУ) скоростью электровоза на примере пассажирского электровоза ЭП20.

Построение модели

Уравнение движения поезда в установившемся режиме можно представить в виде [8]:

$$Ma = F_t - R, \quad (1)$$

где $M = 1000 \frac{(P + Q)}{g}$ – масса поезда; P – вес локомотива; Q – вес состава; g – ускорение свободного падения; a – ускорение поезда; F_t – сила тяги/электрического торможения, развиваемая локомотивом, в рассматриваемом случае с одиночной тягой равна силе тяги/электрического торможения единственного локомотива в поезде; R – равнодействующая сил основного и дополнительного сопротивления движению.

Разгон поезда до заданной скорости осуществляется с постоянным ускорением, ограниченным сверху предельным значением $a_{\max} = 0,7 \text{ м/с}^2$, заданным в технических требованиях, предъявляемых заказчиком.

Определим параметры модели поезда. Вес локомотива ЭП20 P равен 1265 кН, вес пассажирского вагона примем равным 637 кН, вес состава, вес и масса поезда в зависимости от количества пассажирских вагонов приведены в таблице.

Вес и масса поезда с локомотивом ЭП20 в зависимости от количества пассажирских вагонов

Количество пассажирских вагонов	Вес состава Q , кН	Вес поезда, кН	Масса поезда, т
10	6370	7635	779
20	12740	14005	1429
30	19110	20375	2079

Определим расчетное сопротивление движению поезда. Удельное сопротивление локомотива равно, Н/кН [9]:

$$w_{\text{лок}} = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2, \quad (2)$$

где v – скорость поезда, км/ч.

Удельное сопротивление пассажирского состава, Н/кН [9]:

$$w_{\text{сост}} = 0,7 + (8 + 0,18v + 0,003v^2) / 160. \quad (3)$$

С учетом (2), (3) полное основное сопротивление поезда имеет вид, Н [9]:

$$W_{\text{осн}}(v) = w_{\text{лок}}(v)P + w_{\text{сост}}(v)Q. \quad (4)$$

Для проведения моделирования будем учитывать дополнительное сопротивление движению, равное сопротивлению, возникающему от уклона профиля пути, тогда равнодействующая сил сопротивления движению R будет равна $W_{\text{осн}}(v)$, Н [9]:

$$R = W_{\text{осн}}(v) + W_{\text{п}}(q), \quad (5)$$

где $W_{\text{п}}(q)$ – сопротивление от уклона профиля пути.

Силы, возникающие от уклона профиля пути, могут быть аппроксимированы тригонометрическими функциями, в частности, синусом угла наклона. Для проведения моделирования движения поезда с локомотивом ЭП20 возьмем участок Москва – Адлер [10] с соответствующим профилем пути, приведенным на рис. 1.

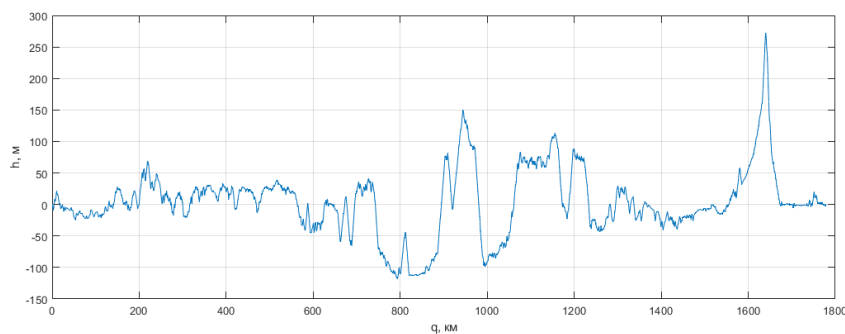


Рис. 1. Профиль пути Москва – Адлер:

q – расстояние относительно начальной точки, км; h – высота относительно начальной точки, м

При составлении модели поезда можно использовать различные подходы, например теорию конечных автоматов [11], рассматривая электропривод как неинерционную систему либо как аperiodическое звено первого или второго порядка [12]. Исходя из экспериментальных данных, полученных на обкатном кольце полигона Щербинка, модель тягового электропривода локомотива ЭП20 можно представить в виде аperiodического звена второго порядка, характеризующего запаздывание:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 F_{\text{тяги}}}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dF_{\text{тяги}}}{dt} + F_{\text{тяги}} = F_{\text{ref}}, \quad (6)$$

где $T_1 = 1,44$ с, $T_2 = 2,53$ с – значения постоянных времени. Структурная схема электропривода представлена на рис. 2. и включает в себя ограничитель тяги для ЭП20 тяга ограничена величиной 350 кН, а также мощностью

$$N = N_d \cdot n_d, \quad (7)$$

где N_d – мощность одного двигателя, кВт; n_d – количество двигателей; для локомотива ЭП20 $N_d = 1100$ кВт, $n_d = 6$.

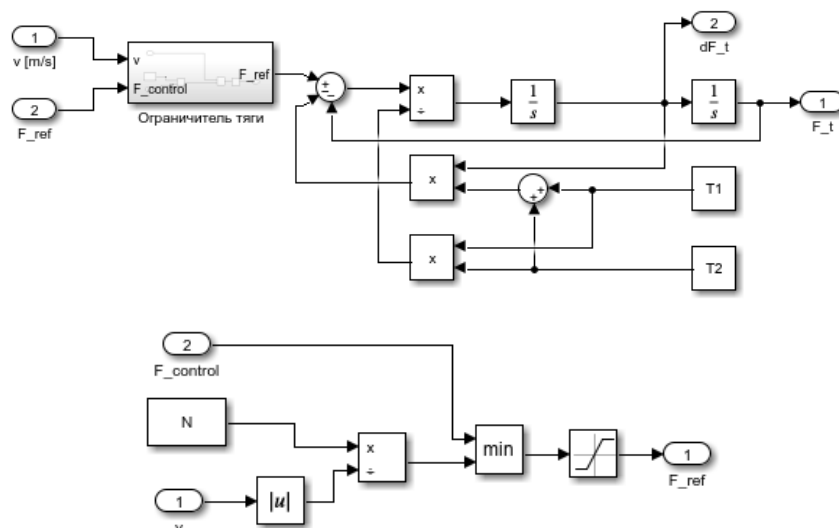


Рис. 2. Структурная схема тягового электропривода (вверху) и ограничитель тяги тягового электропривода, $N = 6600$ кВт (внизу)

Структурная схема разработанной САУ скоростью электровоза ЭП20 представлена на рис. 3 (вверху). САУ скоростью электровоза содержит регулятор скорости (см. рис. 3, по центру), построенный с использованием интеллектуального закона управления на основе условия максимума функции обобщенной мощности и нечеткого логического вывода. Структурная схема нечеткой подсистемы, обеспечивающей адаптивное изменение параметра закона управления, представлена на рис. 3 (внизу).

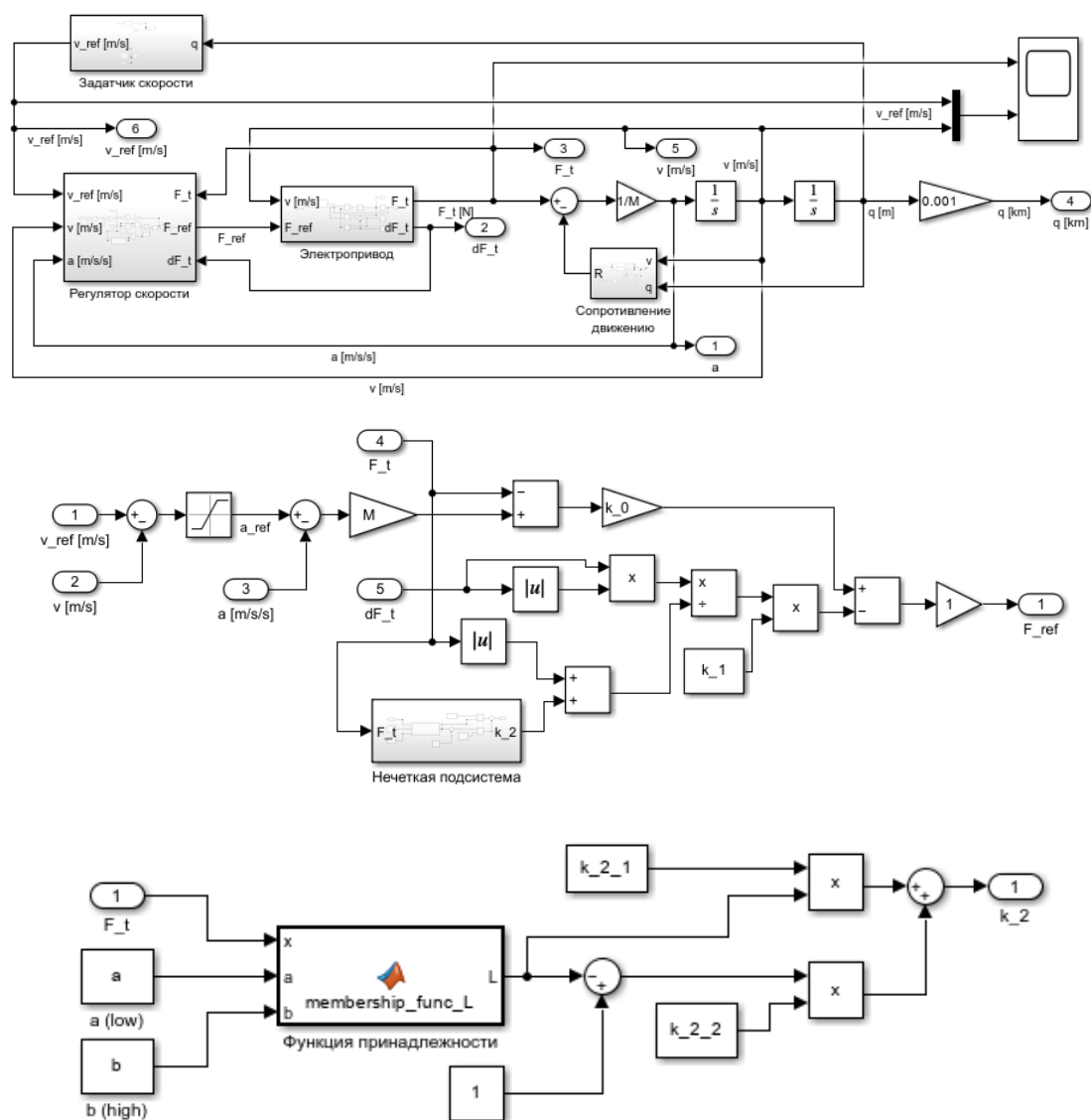


Рис. 3. Структурная схема САУ скоростью электровоза ЭП20 (вверху), структурная схема разработанного блока регулятора скорости электровоза ЭП20 (по центру) и структурная схема нечеткой подсистемы разработанного регулятора скорости электровоза ЭП20 (внизу)

Заметим, что в рассматриваемом случае регулятор скорости не содержит данных о профиле пути участка движения, следовательно, внешние возмущения в виде сопротивления движению поезда являются априорно неизвестными.

Моделирование

Рассмотрим движение поезда с составом из 20 пассажирских вагонов на равнинном участке Москва – Рязань, профиль пути которого представлен на рис. 4. Проведем моделирование разгона поезда с $v_0 = 0$ м/с до $v_1 = 55,5$ м/с с последующим торможением до $v_2 = 0$ м/с при параметрах $k_0 = 1,7$, $k_1 = 3,45$, $k_{21} = 0,1$, $k_{22} = 2$, $a = 10^4$, $b = 9 \cdot 10^4$.

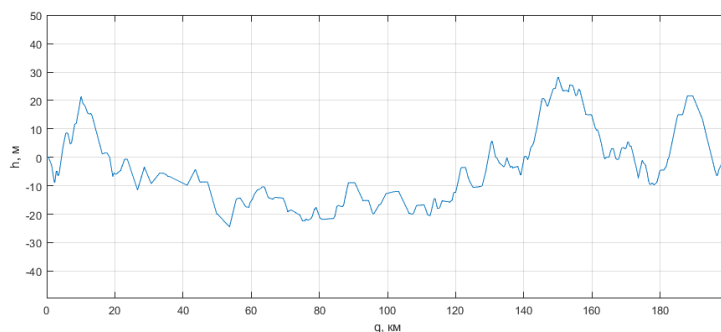


Рис. 4. Профиль пути Москва – Рязань:

q – расстояние относительно начальной точки, км; h – высота относительно начальной точки, м

Результаты моделирования представлены на рис. 5. Разработанная САУ скоростью электровоза ЭП20 на основе полученного интеллектуального закона управления позволяет поддерживать заданную скорость, обеспечивая движение в режимах тяги и рекуперативного торможения.

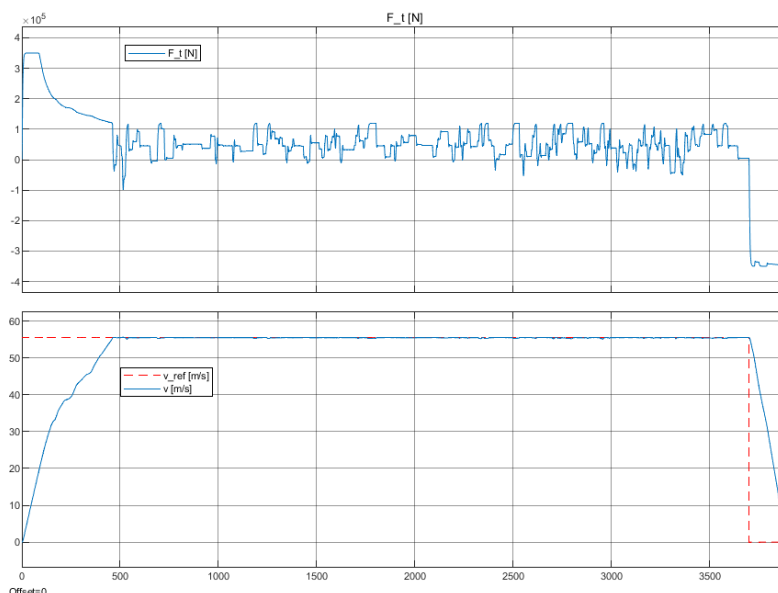


Рис. 5. Результат движения поезда с разгоном и торможением до заданной скорости на участке Москва – Рязань под управлением разработанной САУ скоростью электровоза ЭП20: первый график – тяга локомотива, второй график – заданная (красная линия) и действительная (синяя линия) скорости поезда

Аналогичные результаты получены в результате моделирования на всем участке Москва – Адлер. Разработанная САУ скоростью электровоза позволяет поддерживать заданную скорость, не превышая ее более чем на 1 км/ч, что соответствует требованиям к САУ.

Заключение

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что разработанный интеллектуальный алгоритм управления можно использовать при построении САУ скоростью электровоза нового поколения с асинхронным тяговым двигателем для обеспечения движения с заданной скоростью в различных режимах работы локомотива в условиях априорно неизвестных воздействий.

Список литературы

1 ТМХ прекратил выпуск созданных с Alstom электровозов, но сделает российские // РИА Новости: [сайт]. – 2023. – 24 июля. – URL: <https://ria.ru/20230724/elektrovozy-1885859910.html> (дата обращения: 28.08.2023).

References

1 TMH stopped production of electric locomotives created with Alstom, but will make Russian ones // RIA Novosti: [website]. – 2023. – July 24. – URL: <https://ria.ru/20230724/elektrovozy-1885859910.html> (date of access: 08/28/2023)

2 РЖД ждут от заводов линейку полностью отечественных локомотивов // 1prime.ru : [сайт]. – 2023. – 25 апреля. – URL: <https://1prime.ru/transport/20230425/840470004.html> (дата обращения: 28.08.2023).

3 **Шевченко, А.** ТМХ впервые в РФ представил контактно-аккумуляторный маневровый электровоз / А. Шевченко // neftegaz.ru : [сайт]. – 2023. – 27 августа – URL: <https://neftegaz.ru/news/Oborudovanie/791664-tmkh-vpervye-v-rf-predstavil-kontaktno-akkumulyatornyy-manevrovyuy-elektrovoz> (дата обращения: 28.08.2023).

4 **Костоглотов, А. А.** Метод квазиоптимального синтеза законов управления на основе редукции задачи Лагранжа к изопериметрической задаче с использованием асинхронного варьирования / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – Т. 6, № 6. – С. 3–12. – ISSN 1029-3620.

5 **Жданов, А. А.** Применение нечеткой логики в имитационной системе автономного адаптивного управления / А. А. Жданов, М. В. Караваяев // Труды ИСП РАН. – 2002. – Т. 3. – С. 121–137. – ISSN 2220-6426.

6 **Савин, М. М.** Теория автоматического управления / М. М. Савин, В. С. Елсуков, О. Н. Пятинина. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. – 469 с. – ISBN 978-5-222-11274-8.

7 **Агапов, А. А.** Анализ эффективности квазиоптимальных законов управления с применением аппарата нечеткой логики в задачах интеллектуализации транспортных систем / А. А. Агапов, А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 126–135. – ISSN 0201-727X.

8 **Кузмич, В. Д.** Теория локомотивной тяги / В. Д. Кузмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – Москва : Маршрут, 2005. – 448 с. – ISBN 5-89035-265-2.

9 Правила тяговых расчетов для поездной работы : утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 09.02.2018 № 182/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 516 с.

10 **Зарифьян, А. А.** Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Зарифьян Александр Александрович. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2016. – 121 с.

2 Russian Railways expects a line of completely domestic locomotives from factories // 1prime.ru : [website]. – 2023. – 25 April. – URL: <https://1prime.ru/transport/20230425/840470004.html> (date of access: 08/28/2023).

3 **Shevchenko, A.** TMH for the first time in the Russian Federation presented a contact-battery shunting electric locomotive / A. Shevchenko // neftegaz.ru : [website]. – 2023. – 27 August. – URL: <https://neftegaz.ru/news/Oborudovanie/791664-tmkh-vpervye-v-rf-predstavil-kontaktno-akkumulyatornyy-manevrovyuy-elektrovoz> (date of access: 08/28/2023).

4 **Kostoglotov, A. A.** A method of quasi-optimal synthesis of control laws based on the reduction of the Lagrange problem to an isoperimetric problem using asynchronous variation / A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Theory and control systems. – 2021. – Vol. 6, No. 6. – P. 3–12. – ISSN 1029-3620.

5 **Zhdanov, A. A.** Application of fuzzy logic in the simulation system of autonomous adaptive control / A. A. Zhdanov, M. V. Karavaev // Proceedings of ISP RAS. – 2002. – Т. 3. – P. 121–137. – ISSN 2220-6426.

6 **Savin, M. M.** Theory of automatic control / M. M. Savin, V. S. Elsukov, O. N. Pyatina. – Rostov-on-Don : Phoenix, 2007. – 469 p. – ISBN 978-5-222-11274-8.

7 **Agapov, A. A.** Analysis of the effectiveness of quasi-optimal control laws using the apparatus of fuzzy logic in the problems of intellectualization of transport systems / A. A. Agapov, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1(89). – P. 126–135. – ISSN 0201-727X.

8 **Kuzmich, V. D.** Theory of locomotive traction / V. D. Kuzmich, V. S. Rudnev, S. Ya. Frenkel. – Moscow : Route, 2005. – 448 p. – ISBN 5-89035-265-2.

9 Rules for traction calculations for train work : approved by Order of Russian Railways dated May 12, 2016 No. 867r as amended by Order of Russian Railways dated February 9, 2018 No. 182/r. – Moscow : JSC “Russian Railways”, 2016. – 516 p.

10 **Zarifyan, A. A.** Improving the energy efficiency of passenger electric locomotives with asynchronous traction drive when powered from a DC network : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences : 05.22.07 / Zarifyan Alexander Alexandrovich. – Rostov-on-Don : RSTU, 2016. – 121 p.

11 **Зарифьян, А. А.** Синтез регулятора скорости электровоза методами теории конечных автоматов / А. А. Зарифьян // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3(75). – С. 30–37. – ISSN 0201-727X.

12 **Zarifyan, A.** Synthesis of the heavy freight locomotive speed control system by finite-state machine theory / A. Zarifyan // The 16th International Conference on Civil, Structural & Environmental Engineering Computing. – Riva del Garda, Italy, 2019. – ISBN 978-1-905088-45-4.

11 **Zarifyan, A. A.** Synthesis of the electric locomotive speed controller by methods of the theory of finite automata / A. A. Zarifyan // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 3(75). – P. 30–37. – ISSN 0201-727X.

12 **Zarifyan, A.** Synthesis of the heavy freight locomotive speed control system by finite-state machine theory / A. Zarifyan // The 16th International Conference on Civil, Structural & Environmental Engineering Computing. – Riva del Garda, Italy, 2019. – ISBN 978-1-905088-45-4.

A. A. Agapov, A. A. Zarifyan (Jr.)

THE POSSIBILITY OF USING INTELLIGENT CONTROL ALGORITHM BASED ON THE MAXIMUM CONDITION OF THE GENERALIZED POWER FUNCTION IN THE SYSTEM OF AUTOMATIC SPEED CONTROL OF ELECTRIC LOCOMOTIVE

Abstract. The paper considers the possibility of using an intelligent control algorithm based on the maximum condition of the generalized power function and the fuzzy logic apparatus in the problem of automatic speed control of a new generation electric locomotive with an asynchronous traction motor. An automatic speed controller for an electric locomotive was built, and the simulation of the movement of a passenger train with an EP20 locomotive at a given speed on the Moscow – Ryazan and Moscow – Adler sections with an appropriate track profile was carried out. An analysis of the simulation results allows us to conclude that the developed intelligent control algorithm can be used to build a speed control system for a new generation electric locomotive with an asynchronous traction motor to ensure movement at a given speed in various operating modes of the locomotive under conditions of a priori unknown influences.

Keywords: automatic speed control, intelligent control algorithm, condition for the maximum of the generalized power function, fuzzy logic.

For citation: Agapov, A. A. The possibility of using intelligent control algorithm based on the maximum condition of the generalized power function in the system of automatic speed control of electric locomotive / A. A. Agapov, A. A. Zarifyan (Jr.) // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No 3. – P. 28–34. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_28.

Сведения об авторах

Агапов Александр Андреевич
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вычислительная техника
и автоматизированные системы управления»,
ассистент,
e-mail: agapov2794@gmail.com

Зарифьян Александр Александрович (мл.)
ТМХ Инжиниринг,
кандидат технических наук, эксперт,
e-mail: zarifyan.alexander@gmail.com

Information about the authors

Agapov Alexander Andreevich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computing Machinery and Computerized
Control Systems»,
Lecturer,
e-mail: agapov2794@gmail.com

Zarifyan Alexander Alexandrovich (Jr.)
TMH Engineering,
Candidate of Engineering Sciences, Expert,
e-mail: zarifyan.alexander@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ И ЛОГИСТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.222 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_35

*В. Н. Зубков, А. Г. Черняев, Е. А. Чеботарева, И. Н. Егорова, И. Д. Долгий***МЕРЫ ПО СОГЛАСОВАННОМУ ПРОДВИЖЕНИЮ ВАГОНОПОТОКОВ
К ПОРТАМ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА
В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ**

Аннотация. В исследовании проводится анализ как теоретических, так и технологических основ действующей технико-технологической модели управления перевозочным процессом на полигоне в направлении портов Азово-Черноморского бассейна (АЧБ). Выполнен анализ объемов местной работы, объемов поступления вагонопотоков по стыкам дороги, на основании которого даны предложения по оптимизации модели управления перевозочным процессом с учетом «узких» мест по продвижению вагонопотоков. Цель работы – на основании существующей модели управления перевозочным процессом, имеющих ограничений пропускной способности, проводимых мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры, динамики поступления вагонопотоков по стыкам в адрес конкретных припортовых станций и их доли маршрутизации сформировать предложения по организации продвижения вагонопотока в адрес АЧБ с вынесением предложений по корректировке модели управления перевозочным процессом на полигоне Северо-Кавказской железной дороги в направлении припортовых станций.

Ключевые слова: железнодорожные перевозки, рост объемов перевозок, пропускная способность, развитие инфраструктуры, маршрутизация, работа локомотива бригад, мероприятия.

Для цитирования: Меры по согласованному продвижению вагонопотоков к портам Азово-Черноморского бассейна в условиях развития элементов технико-технологической модели управления перевозочным процессом / В. Н. Зубков, А. Г. Черняев, Е. А. Чеботарева [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 35–44. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_35.

Введение

Рассматривая эксплуатационные задачи, поставленные перед железными дорогами, обслуживающими крупные морские порты, можно выделить типовые факторы, влияющие на качество выполнения эксплуатационной работы: темпы развития инфраструктуры по сравнению с темпами прироста объемов перевозок грузов в порты, необходимость установления приоритетов между пассажирской, поездной и местной работой, отклонение рабочего парка груженых и порожних вагонов для припортовых дорог и станций от нормативных значений, неравномерность перевозочного процесса, применяемые технологии и др. Поэтому, анализируя работу припортовых железных дорог за определённый плановый период, в научных исследованиях часто идет сопоставление плановых и фактических результатов работы полигонов и отдельных участков сети, выполнения плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры [1–6]. Безусловно, такой анализ необходим и дает представление о развитии железнодорожной инфраструктуры в рамках долгосрочных инвестиционных программ. Так, в рамках реализации инвестиционных программ, направленных на развитие инфраструктуры на подходах к портам АЧБ, только в период с 2018 по 2020 годы было освоено более 100 млрд рублей [7], выполнена комплексная реконструкция участка Им. М. Горького – Котельниково – Тихорецкая – Крымская с обходом Краснодарского железнодорожного узла, а в настоящее время идет реконструкция железнодорожных станций Тихорецкая и Сальск. Параллельно с модернизацией инфраструктуры на полигонах дорог, в том числе припортовых, решались общесетевые задачи по созданию технологии управления локомотивными парками на базе созданных Центров управления тяговыми ресурсами (ЦУТР). Проводится работа по созданию новых информационных инструментов [8–12], например, систем ДМ ЗИ (Динамической модели загрузки инфраструктуры), ДИЛС (Дорожной информационно-логистической системы) и др.

Изменение объемов грузо- и пассажироперевозок требует поиска новых путей форсирования пропускных способностей при обязательном выполнении заданных параметров эксплуатационной работы смежных дорог в направлении портов АЧБ. В приоритете – задачи организации вагонопотоков и ускорения пропуска поездопотоков в направлении портов, повышения участковой скорости и улучшения показателей использования тягового и другого подвижного состава. Техничко-технологическая модель управления перевозочным процессом в направлении портов Азово-Черноморского бассейна на перспективу до 2025 года, разработанная АО «ИЭРТ», включала формирование оптимального порядка направления вагонопотоков в увязке с технологическими процессами работы железнодорожных путей необщего пользования (портов, паромных переправ, погрузочно-выгрузочных комплексов). Однако переориентация грузов на новые маршруты в связи с геополитическими факторами требует новых методов совершенствования технико-технологической модели управления перевозочным процессом на полигоне в направлении портов уже с учетом выполненных направлений по модернизации инфраструктуры с целью повышения эффективности использования имеющихся транспортных мощностей СКЖД и граничащих с ней дорог.

Основная часть

Основной целью разработки модели АЧБ было создание технологического документа, описывающего задачи и пути обеспечения перевозок возрастающих объемов грузов за счет повышения эффективности управления перевозочным процессом, в том числе за счет развития полигонных принципов управления. Поэтому существующая технико-технологическая модель управления перевозочным процессом на полигоне в направлении портов АЧБ включает в себя достаточно много элементов (рис. 1).



Рис. 1. Элементы технико-технологической модели управления перевозочным процессом на полигоне в направлении портов АЧБ

Стратегия управления перевозочным процессом в условиях полигонных технологий учитывает применение экстерриториальных подходов, взаимодействия причастных подразделений ОАО «РЖД» регионального и сетевого уровней, принципов сквозного планирования перевозочного процесса в направлении портов АЧБ с учетом пропускных и перерабатывающих способностей инфраструктур общего и необщего пользования. Поэтому, рассматривая СКЖД как систему, были проанализированы входные параметры, прежде всего здесь идет речь о «входящем» по стыкам поездо- и вагонопотоке. На СКЖД основной экспортный вагонопоток поступает по стыкам Сохрановка, Котельниково, Морозовская и Олейниково и следует в направлении крупных выгрузочных районов АЧБ.

На СКЖД имеются также регионы, в которых наблюдается концентрация междорожных грузопотоков и, соответственно, междорожный обмен поездопотоками в значительных размерах. Этот фактор также необходимо учитывать. Далее необходимо проанализировать не только объемы поступления вагонов по стыкам, но и их распределение по таким параметрам, как доля маршрутизации в адрес

конкретных припортовых станций, доля вагонопотока, поступающего в разборочных поездах. Выполнен анализ структуры вагонопотоков по стыкам дороги. Данные по стыкам Сохрановка (основной пассажирский ход) и Котельниково (основной грузовой ход) приведены на рис. 2 и 3.

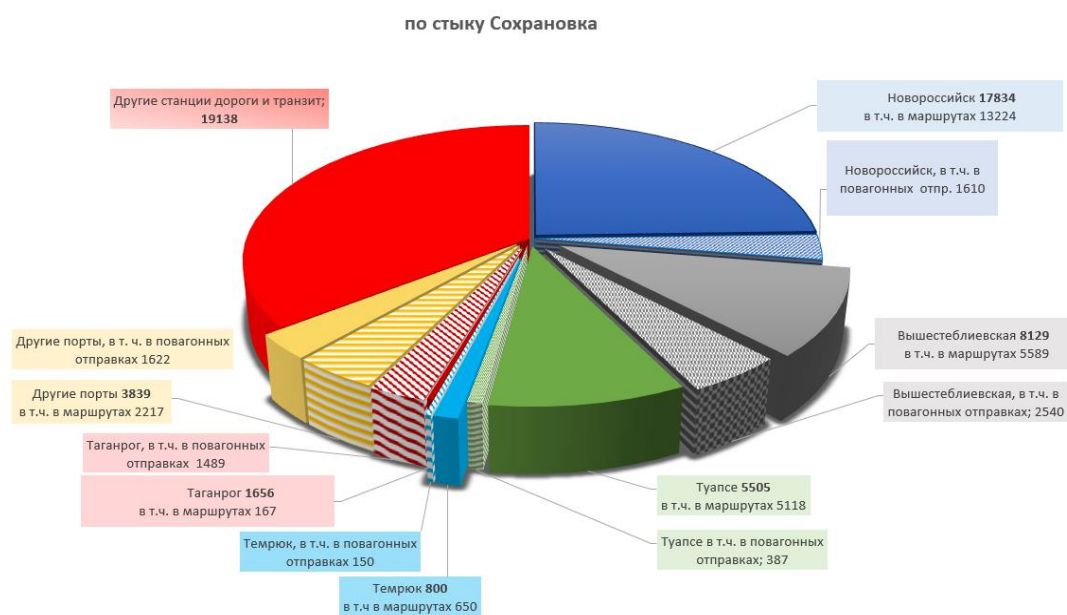


Рис. 2. Поступление повагонных и маршрутных отправок по стыку Сохрановка на СКЖД

Если анализировать показатель маршрутизации, то в целом наблюдается увеличение доли маршрутизации по дороге. При этом проведенный анализ за исследуемый период (февраль и ноябрь 2022 года) показывает, что доля маршрутизации в адрес припортовых станций различная, а в целом для припортовых станций уровень маршрутизации составляет 79,11 % (рис. 4).

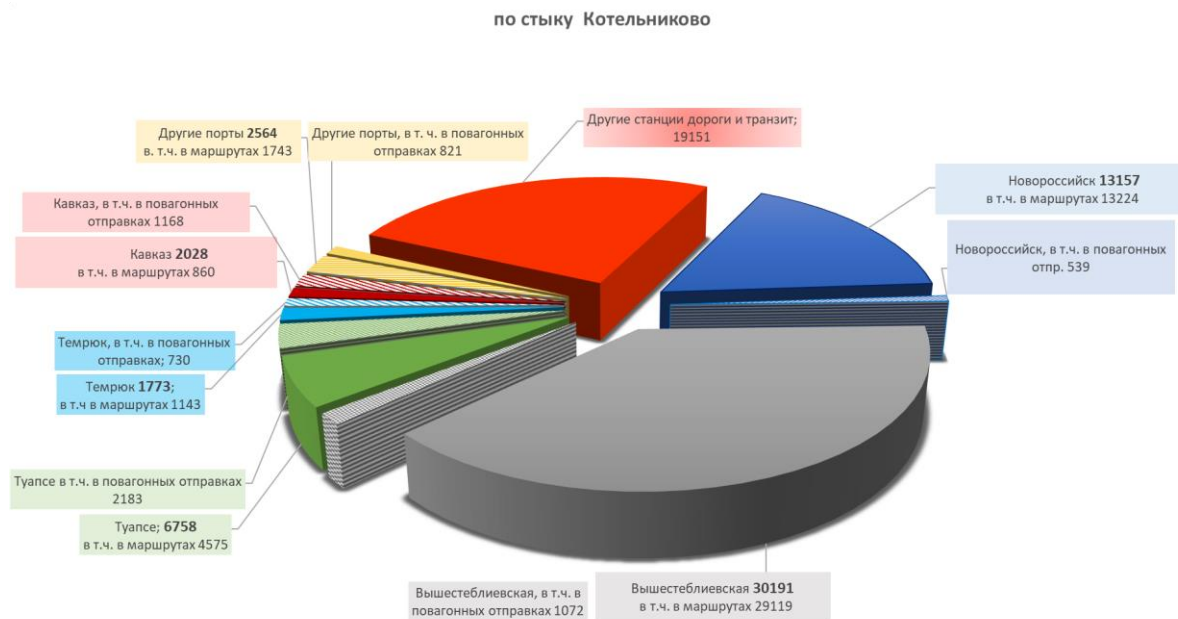


Рис. 3. Поступление повагонных и маршрутных отправок по стыку Котельниково на СКЖД

Также на рис. 4 видно, что еще достаточно большой поток идет в разборочных поездах. Например, если анализировать поступление маршрутов на станцию Вышестеблиевскую, то выявлено ежедневное поступление 3,13 маршрута в среднем по стыку Сохрановка (таблица), 15,27 поездов по Котельниково, 2,8 поезда по Олейниково. Необходимо рассмотреть возможность пропуска всех поездопотоков через стык Котельниково (в данном конкретном примере – 21,2 поезда в сутки).

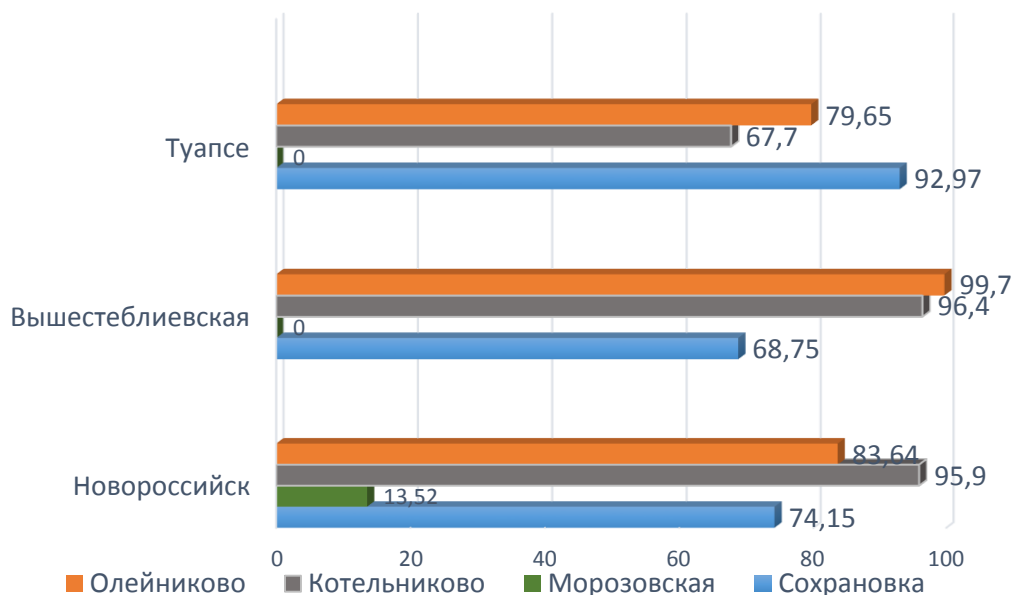


Рис. 4. Доля маршрутизации по стыкам

Вагонопоток по стыку Сохрановка (по данным АС РПФП)

Станции назначения	Всего вагонов	В т.ч. в маршрутах	Процент маршрутизации	Всего маршрутов, поездов	Маршрутов в среднем в сутки, поездов
Новороссийск	17834	13224	74,15	250	8,33
Вышестеблиевская	8129	5589	68,75	94	3,13
Туапсе	5505	5118	92,97	80	2,67
Темрюк	800	650	81,25	15	0,50
Кавказ	417	210	50,36	4	0,13
Грушевая	0	0	0	0	0
Ейск	1477	985	66,69	17	0,57
Азов	693	300	43,29	6	0,20
Заречная	943	662	70,20	12	0,40
Кизитеринка	309	60	19,42	2	0,007
Таганрог	1656	167	10,08	3	0,10
Всего в адрес припортовых станций	37763	26965	71,41	483	16,10
Всего по стыку					33,10

Для этого необходимо определить ограничения пропускных способностей основных направлений СКЖД для пропуска грузовых поездов, особенно в период массовых летних перевозок. Ограничения пропускной способности основных направлений СКЖД прежде всего связаны:

- с особенностями графика движения и большими размерами пассажирского движения (максимальные размеры более 130 пар в сутки – в августе, минимальные – менее 70 пар в ноябре);
- с динамичным увеличением перерабатывающей способности грузовых фронтов портов и припортовых терминалов. Например, по станции Новороссийск увеличение с 2553 вагонов в среднем в

сутки (2019 год) до 2786 вагонов в среднем в сутки (2023 год), по станции Вышестеблиевская с 1101 до 3012 вагонов в среднем в сутки соответственно и, как следствие, ростом грузопотока в адрес припортовых станций АЧБ;

– с существующим распределением вагонопотоков по основным стыкам Сохрановка, Морозовская, Котельниково и Олейниково, завышенным рабочим парком вагонов.

Классическая технология разработки плана формирования поездов и направление вагонопотоков по кратчайшему расстоянию в границах припортовой железной дороги и на подходах к ней не всегда показывает свою эффективность. Это связано, прежде всего, с тем, что припортовые станции технически не в состоянии обеспечить расформирование всего прибывающего под грузовые операции вагонопотока, а также неравномерным поступлением вагонопотока в адрес выделенных грузополучателей. Для снижения данных негативных факторов на показатели работы дороги на СКЖД была разработана технология, которая обеспечивала подвод вагонов на припортовые станции в соответствии со сменно-суточными планами, составленными совместно работниками припортовых станций и грузополучателями. Указанная технология предусматривала организацию отправительской и технической маршрутизации, направление избыточного разборочного потока для припортовых станций на сортировочные станции СКЖД, такие как Батайск, Краснодар-Сортировочный, а отдельные вагонопотоки направлялись на участковые станции, такие как Тихорецкая, Кавказская, Тимашевская, Белореченская, Минеральные Воды и т. д. Как пример, по станции Батайск в Южной сортировочной системе (четной) только для станции Новороссийск в разные периоды формировалось до восьми назначений.

После завершения строительства вторых главных путей от станции Им. М. Горького до станции Тамань-Пассажирская с обходом Краснодарского узла, а также в условиях увеличения размеров пассажирского движения в направлении Крымского Федерального округа основным грузовым направлением СКЖД, становится участок Им. М. Горького – Котельниково – Сальск – Тихорецкая – Разъезд 9 км – Тамань-Пассажирская протяжённостью 875 км с расчётной пропускной способностью к 2026 году, обеспечивающей пропуск потребных размеров движения поездов. По состоянию на сегодняшний день после реализации основного этапа по строительству вторых главных путей перегонов на направлении Им. М. Горького – Разъезд 9 км остаётся ряд барьерных мест (см. рис. 4):

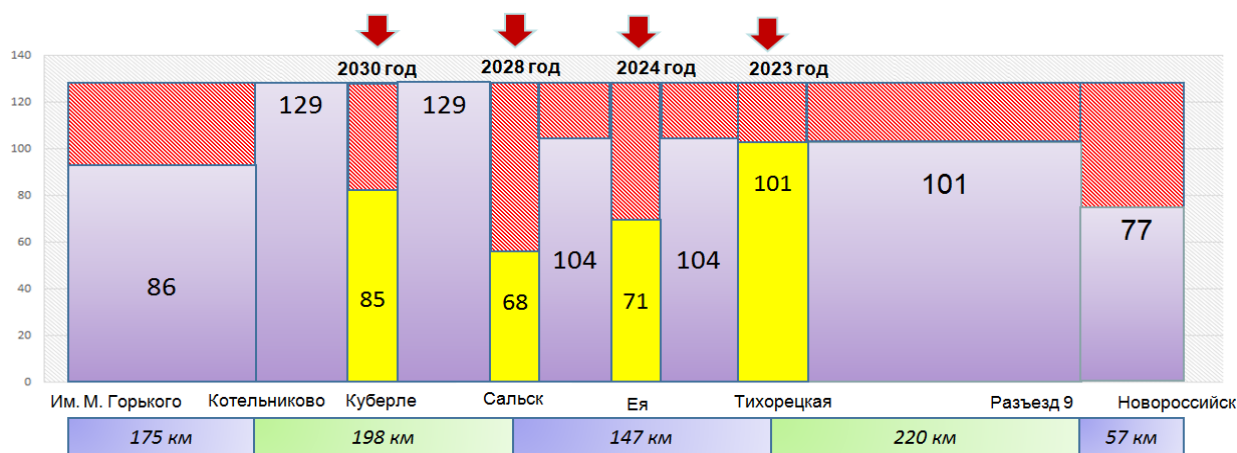
– наличие однопутного участка на перегоне Ровное – Ея, чётная горловина станции Ея (расчётная пропускная способность на 2023 год 71 пара поездов в сутки). Завершение строительства и ввод в эксплуатацию планируется в 2024 году;

– наличие конструктивного ограничения скорости 40 км/ч по главным путям станции Куберле, расположение станции в кривом участке и организация безостановочного пропуска поездов по боковым направлениям стрелочных переводов;

– недостаточное путевое развитие станции Сальск, наличие в парке «А» десяти приёмоотправочных путей, парк «С» – девять приёмоотправочных путей, что не позволяет обеспечить пропуск перспективного поездопотока со сменой локомотивных бригад (расчётная пропускная способность на 2023 год 48 пар поездов в сутки). Завершение реконструкции и ввод в эксплуатацию планируется в 2028 году;

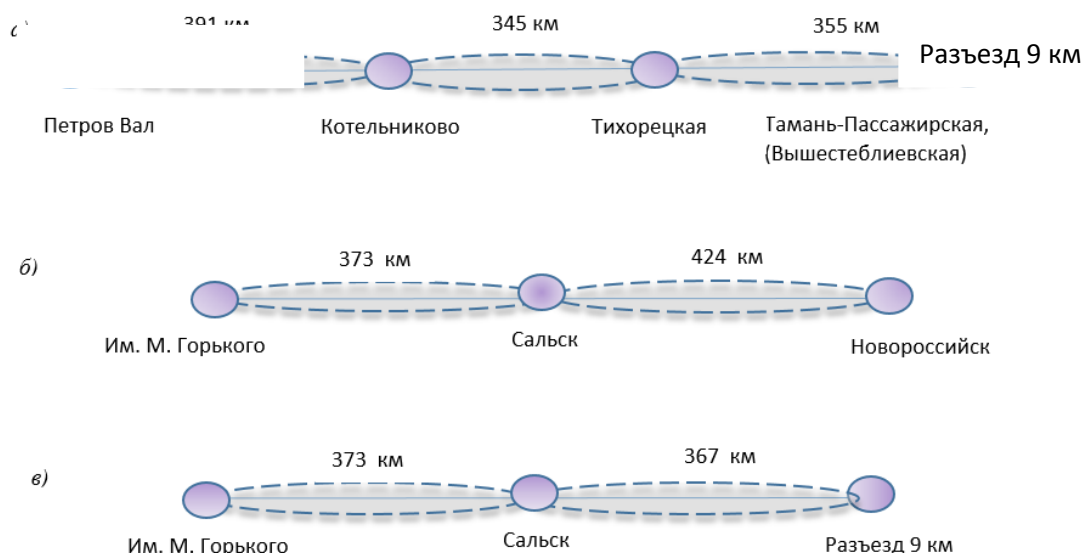
– наличие на станции Им. М. Горького одной сортировочной системы для переработки вагонопотока, которая не может обеспечить переработку и пропуск перспективного поездопотока с четырёх направлений из-за недостатка пропускной способности на текущий период, окончание строительства чётной сортировочной системы станции Им. М. Горького и ввод в эксплуатацию планируется в 2030 году.

С учётом перспективного переключения основного грузопотока, следующего к портам АЧБ на направление станция Им. М. Горького – станция Разъезд 9 км, на котором нет ни одной сортировочной станции способной переработать этот вагонопоток, возникает потребность для изменения существующей логистической технологии подвода и переработки экспортных вагонопотоков. Основную работу по формированию поездов с экспортными грузами в перспективе должна взять на себя сетевая сортировочная станция Им. М. Горького с перераспределением сортировочной работы с другими вагонопотоками на сортировочные станции Приволжской, Юго-Восточной, Куйбышевской и Южно-Уральской железных дорог до ввода в эксплуатацию чётной сортировочной системы станции Им. М. Горького. Целевая задача – исключение поступления разборочного потока по станции Котельниково в адрес припортовых станций СКЖД. Специализация плеч обслуживания локомотивных бригад на этом направлении должна строиться в зависимости от назначения грузовых поездов.



**Рис. 4. «Барьерные» места на направлении
Им. М. Горького – Котельниково – Новоросийск**

Для обеспечения пропуска предъявляемого вагонопотока, в условиях наличия перечисленных выше барьерных мест, необходимо сегодня организовать движения поездов на удлинённых плечах обслуживания локомотивных бригад (рис. 5).



**Рис. 5. Варианты удлинённых плеч обслуживания локомотивных бригад
в направлении портов АЧБ**

Организованные поезда назначением на станцию Вышестеблиевская, более 25 поездов в сутки из 41 % от общего входящего потока под выгрузку и транзита на дороге должны пропускаться по следующему маршруту и иметь следующие плечи обслуживания локомотивных бригад: Петров Вал – Котельниково (391 км), Котельниково – Тихорецкая (345 км), Тихорецкая – Тамань-Пассажирская (355 км). Организованные поезда назначением на станцию Новоросийск более 20 поездов в сутки из 31 % от общего входящего потока под выгрузку и транзита на дороге должны пропускаться по следующему маршруту и иметь следующие плечи обслуживания локомотивных бригад: станция Им. М. Горького – Сальск (373 км), Сальск – Новоросийск (424 км) или Сальск – станция Разъезд 9 км (367 км). Проработка этого вопроса требует серьезной научно-технологической поддержки и согласования.

Для совершенствования технологии работы локомотивного комплекса требуется также предусмотреть перевод основного локомотивного депо Тимашевская на станцию Разъезд 9 км и основного эксплуатационного депо Краснодар на станцию Тихорецкая, а также усилению ПТОЛ по станциям Тамань-Пассажирская, Новоросийск, Тихорецкая (рис. 6).

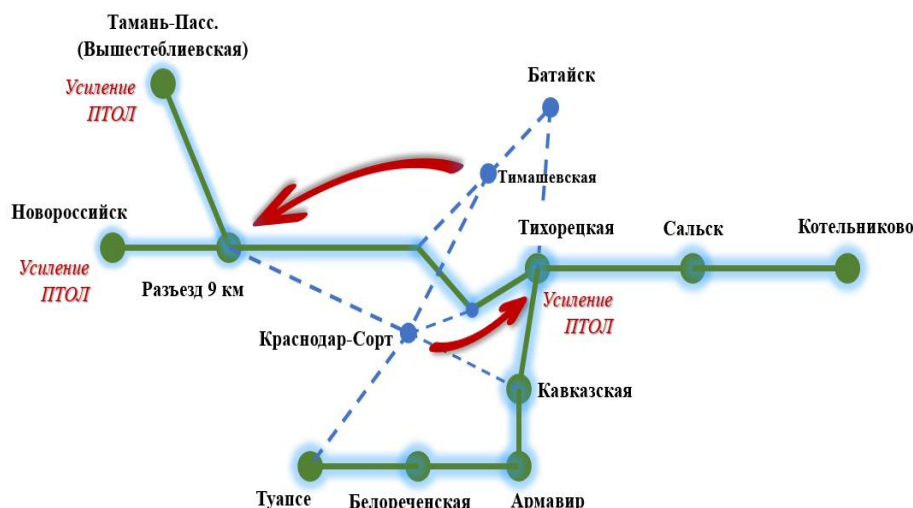


Рис. 6. Подготовка инфраструктуры локомотивного хозяйства Северо-Кавказской дирекции тяги

Переключение основного вагонопотока, следующего в адрес припортовых станций СКЖД, на направление станция Им. М. Горького – станция Разъезд 9 км повлечёт за собой изменение организации логистического управления вагонопотоками – разработка плана подвода поездов к припортовым станциям должна будет осуществляться от станции Им. Максима Горького, что расширяет зону ответственности Логистического центра Северо-Кавказской дирекции управления движением.

Высвободившуюся пропускную способность по станциям Сальск, Тихорецкая, Разъезд 9 км возможно использовать для пропуска и переработки остального вагонопотока, поступающего по стыку Котельниково назначением на остальные станции СКЖД.

Управление входными параметрами (доля маршрутизации по каждой станции назначения для конкретных стыковых пунктов, организация работа локомотивных бригад) позволит сбалансированно управлять работой припортовой транспортно-технологической системой.

Выводы

Задачи оптимизации эксплуатационной работы припортовой дороги – это не только задачи местного, локального уровней, это корректировка технологических процессов по всему маршруту следования экспортных вагонопотоков. Важнейшая роль для нормального режима работы СКЖД в перспективе отводится динамичному плану формирования поездов станции Им. М. Горького, оценке возможностей данной станции по переработке и подборке вагонопотоков для портов АЧБ, изменению технологии работы локомотивного комплекса. Стратегические решения по изменению технико-технологической модели управления перевозочным процессом на полигоне в направлении портов АЧБ должны находить отражение в технологических и нормативных документах, в частности в графике движения и плане формирования поездов, технологических процессах, технических планах и бюджетных заданиях.

Список литературы

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

References

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

2 **Аношкин, К. В.** Совершенствование системы контроля и принимаемых мер по снижению числа нарушений сроков доставки грузов и порожних вагонов на Северо-Кавказской железной дороге / К. В. Аношкин, В. Н. Зубков // Транспорт : наука, образование, производство. – Ростов-на-Дону. – 2022. – С. 160–164. – ISBN 978-5-907295-67-4.

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

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

5 **Солоп, И. А.** К вопросу реализации мероприятий, направленных на повышение операционной эффективности и оптимизации расходов в центральной дирекции управления движением / И. А. Солоп, Е. А. Чеботарева // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : материалы Международной научно-практической конференции ТрансПромЭк-2020. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2020. – С. 229–233.

6 **Zubkov, V. N.** The analysis of the cargo base and development of measures to increase the competitiveness of freight railway transportation / V. N. Zubkov, N. N. Musienko, Y. V. Ryazanova. // Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. – Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 509. – P. 1–11. – DOI 10.1007/978-3-031-11058-0_1.

7 Северо-Кавказская железная дорога вложит около 100 млрд. рублей в инфраструктуру к 2020 году. – URL: <https://trans.ru/news/severo-kavkazskaya-zheleznaya-doroga-vlozhit-okolo-100-mlrd-rub-v-infrastrukturu-k-2020-godu> (дата обращения: 01.08.2023).

8 **Мамаев, Э. А.** Перспективы цифровых технологий управления на железнодорожном транспорте / Б. И. Алибеков, Э. А. Мамаев // Транспорт : наука, образование, производство : материалы Международной научно-практической конференции «Транспорт-2021». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2021. – С. 16–20.

9 **Кучинский, Д. Г.** Развитие цифровых транспортно-логистических систем для повышения эффективности перевозочного процесса на укрупненном полигоне / Д. Г. Кучинский,

2 **Anoshkin, K. V.** Improvement of the control system and measures taken to reduce the number of violations of the terms of delivery of goods and empty wagons on the North Caucasus Railway / K. V. Anoshkin, V. N. Zubkov // Transport : science, education, production. – Rostov-on-Don. – 2022. – P. 160–164. – ISBN 978-5-907295-67-4.

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

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

5 **Solop, I. A.** On the issue of implementing measures aimed at improving operational efficiency and optimizing costs in the Central Directorate of Traffic Management / I. A. Solop, E. A. Chebotareva // Actual problems and prospects of development of transport, industry and economy of Russia : mater. International Scientific – practical conf. TransPromEk-2020. – Rostov-on-Don: RSTU, 2020. – P. 229–233.

6 **Zubkov, V. N.** The analysis of the cargo base and development of measures to increase the competitiveness of freight railway transportation / V. N. Zubkov, N. N. Musienko, Y. V. Ryazanova. // Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. – Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 509. – P. 1–11. – DOI 10.1007/978-3-031-11058-0_1.

7 The North Caucasus Railway will invest about 100 billion rubles in infrastructure by 2020. – URL: <https://trans.ru/news/severo-kavkazskaya-zheleznaya-doroga-vlozhit-okolo-100-mlrd-rub-v-infrastrukturu-k-2020-godu> (date of access: 08/01/2023).

8 **Mamaev, E. A.** Prospects of digital management technologies in railway transport / B. I. Alibekov, E. A. Mamaev // Transport: science, education, production : mater. International Scientific – practical conference “Transport-2021”. – Rostov-on-Don : RSTU, 2021. – P. 16–20.

9 **Kuchinsky, D. G.** Development of digital transport and logistics systems to improve the efficiency of the transportation process at an enlarged landfill / D. G. Kuchinsky, V. N. Zubkov, N. N. Musienko // Transport and logistics : spatial

В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко // Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития : материалы Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : 2020. – С. 167–171.

10 **Кудряшов, К. В.** Перевозки грузов в железнодорожно-морском сообщении на Юге России / К. В. Кудряшов, В. Н. Зубков, Э. А. Мамаев, Е. А. Чеботарева // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 4. – С. 4–10. – ISSN 0044-4448.

11 **Шапкин, И. Н.** Цифровые технологии приходят на смену прежней идеологии управления перевозками / И. Н. Шапкин, А. Т. Осминин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : материалы научно-практической конференции с международным участием. – Москва, 2022. – С. 413–431.

12 **Кабанов, А. Б.** Научный подход к планированию железнодорожных грузовых перевозок / А. Б. Кабанов, А. Т. Осминин // Железнодорожный транспорт. 2022. – № 8. – С. 12–16. – ISSN 0044-4448.

and technological synergy of development : mater. International Scientific – practical conf. – Rostov-on-Don : 2020. – P. 167–171.

10 **Kudryashov, K. V.** Cargo transportation in rail-sea communication in the South of Russia / K. V. Kudryashov, V. N. Zubkov, E. A. Mamaev, E. A. Chebotareva // Railway transport. – 2019. – No. 4. – P. 4–10. – ISSN 0044-4448.

11 **Shapkin, I. N.** Digital technologies are replacing the former ideology of transportation management / I. N. Shapkin, A. T. Osminin // Innovative technologies in railway transport: mater. Scientific and practical conference with international participation. – Moscow, 2022. – P. 413–431.

12 **Kabanov, A. B.** A scientific approach to the planning of railway freight transportation / A. B. Kabanov, A. T. Osminin // Rail transport. – 2022. – No. 8. – P. 12–16. – ISSN 0044-4448.

V. N. Zubkov, A. G. Chernyaev, E. A. Chebotareva, I. N. Egorova, I. D. Dolgiy

MEASURES FOR THE COORDINATED PROMOTION OF CAR TRAFFIC TO THE PORTS OF THE AZOV-BLACK SEA BASIN IN THE CONDITIONS OF DEVELOPMENT OF ELEMENTS OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT MODELS

Abstract. The study analyzes both the theoretical and technological foundations of the current technical and technological model for managing the transportation process at the landfill in the direction of the ports of the Azov-Black Sea Basin (ACB). The analysis of the volume of local work, the volume of incoming car traffic at the junctions of the road, on the basis of which proposals are made to optimize the model of management of the transportation process, taking into account the "bottlenecks" for the promotion of car traffic. Based on the existing model of transportation process management, the existing capacity constraints, the measures taken to develop the transport infrastructure, the dynamics of the arrival of car traffic at the junctions to specific port stations and their share of routing, proposals were formed for the organization of the promotion of car traffic to the address of the ACB. The key proposals for adjusting the model of transportation process management at the landfill of the North Caucasus Railway have been identified.

Keywords: railway transportation, growth of traffic volumes, throughput capacity, infrastructure development, routing, work of locomotive crews, transportation process management.

For citation: Measures for the coordinated promotion of car traffic to the ports of the Azov-Black sea basin in the conditions of development of elements of technical and technological transportation process management models / V. N. Zubkov, A. G. Chernyaev, E. A. Chebotareva [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 35–44. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_35.

Сведения об авторах

Зубков Виктор Николаевич
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной

Information about the authors

Zubkov Viktor Nikolaevich
Rostov State Transport University (RSTUPS),
Chair «Management of Operational Work»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,

работой»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: uer@rgups.ru

Черняев Алексей Геральдович

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

Чеботарева Евгения Андреевна

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

Егорова Ирина Николаевна

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

e-mail: uer@rgups.ru

Chernyaev Alexey Geraldovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of operational work»,
Candidate of Engineering Sciences,
Senior Lecturer,
e-mail: uer@rgups.ru

Chebotareva Evgeniya Andreyevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Management of Operational Work»,
Candidate of Engineering Sciences,
Senior Lecturer,
e-mail: abrosimova@ya.ru

Egorova Irina Nikolayevna

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

В. Д. Верескун, Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ РОСТА ГРУЗОБОРОТА МЕЖДУНАРОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРА «СЕВЕР – ЮГ» В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Увеличению числа и потенциала транспортных коридоров способствует динамика глобального рынка. Рассматриваемый в работе транспортный коридор «Север – Юг» является одним из стратегических в обеспечении товаропотока в направлении Индия – Иран – Азербайджан – Россия – Европейский союз.

Проведен прогнозный анализ динамики развития грузооборота транспортного коридора, определены драйверы и барьеры его развития в условиях изменений геополитического и экономического окружения рынков. Уделено внимание вопросам сбалансированного развития потенциала транспортных коридоров с учетом формирования узловых транспортно-логистических центров в пересечениях меридиональных и широтных коридоров.

Показано, что железнодорожный транспорт в МТК «Север – Юг» в его российском сегменте становится ключевым фактором развития и конкурентоспособности перевозок по сравнению с альтернативными маршрутами. Рассмотрены вопросы конкурентоспособности контейнерных перевозок МТК «Север – Юг» в условиях роста мультимодальности и роста контейнеропригодных грузов. Перспективы развития МТК «Север – Юг» в будущем зависят от активных организационных решений в обеспечении планирования и регулирования потоков, исключая международные барьеры в его развитии, а также внедрения цифровых технологий мониторинга и управления потоками.

Ключевые слова: транспортный коридор, грузовые перевозки, мультимодальные перевозки, контейнерные перевозки, транспортно-логистические издержки, качество транспортных услуг.

Для цитирования: Верескун, В. Д. Оценка перспектив роста грузооборота международного транспортного коридора «Север – Юг» в современных условиях / В. Д. Верескун, Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 45–56. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_45.

Введение

В истории человечества транспорт и торговля являются основными катализаторами культурно-технологического обмена между регионами. Одним из ключевых элементов, играющих ведущую роль в консолидации мировых экономик, сегодня является сеть международных транспортных коридоров (МТК). Актуальность темы развития транспортных коридоров в мировой экономике также подтверждается инфраструктурными и объединяющими факторами ее развития, основным детерминантом которого является дальнейшее разделение рынков труда и потребления (рис. 1).

В. А. Дергачев дает следующее определение международному транспортному коридору: «концентрация развития на генеральных направлениях транспорта общего пользования, интенсификация материальных, финансовых и информационных потоков, высокое качество обслуживания и разнообразие оказываемых услуг, обеспечивающие ускорение оборачиваемости, в первую очередь, мирового капитала». С другой точки зрения существует определение транспортного коридора как «совокупности договоренностей, направленных на изменение скорости и направления движения грузопотоков по определенным маршрутам...». Организация Объединенных Наций дает определение ТК как «набору норм и правил, регулирующих аспекты транспортировки и транзита товаров по определенному маршруту, которые подкреплены договором, подписанным странами-участниками». В числе основных функций и задач МТК: обеспечение товарооборота с низкой добавленной стоимостью транспортно-логистических издержек, поддержка глобализации экономики, повышение конкурентоспособности продукции национальных экономик на международном рынке. Оценка потенциала МТК для развития национальной экономики стран-транзитеров, ускорения мирового товарооборота в зоне его тяготения и устранение инфраструктурных и иных барьеров является актуальной задачей.



Рис. 1. Рынки товаров – специализация территорий и стран

(Источник: <https://www.visualcapitalist.com/wp-content/uploads/2018/02/top-export-every-country-map.html>)

Состояние проблемы

Исследования потенциала развития транспортных коридоров являются не только задачей стратегического развития транспортных систем, отдельных элементов и технологий организации перевозок, базирующихся на прогнозных оценках, анализе драйверов и барьеров развития, но и исследований спроса и качества транспортно-логистических услуг на базе инфраструктуры транспортного коридора. Сложность и многокритериальность оценок потенциала транспортных коридоров, включая и транспортный коридор «Север – Юг», отражены в публикациях.

Вопросам качественной оценки состояния транспортного коридора и его элементов посвящены работы [1–3]; методы анализа объема перспективного грузопотока включают как экспертные, так и расчетно-аналитические [4–5]. Важное место в развитии транспортных коридоров занимают совершенствование технологий организации перевозочного процесса [6–8]. Взаимодействие предприятий и национальные интересы стран в зоне тяготения транспортного коридора становится доминантным фактором в его развитии [9–12]. С позиций получателей транспортно-логистических услуг показатели их качества, скорость доставки грузов, цена и другие параметры определяют выбор маршрута доставки грузов [13]. При этом вопросы конкуренции за привлечение инвестиций для развития инфраструктуры национальных транспортных систем определяют конкуренцию на глобальном рынке транспортно-логистических услуг [14–18]. В то же время методические подходы оценки потенциала грузопотоков транспортного коридора являются приоритетными в исследованиях.

Основная часть

Оценка факторов глобализации мировой экономики и их влияние на развитие МТК, представленная в табл. 1, показывает их взаимную обусловленность.

Таблица 1

Факторы глобализации мировой экономики и развитие МТК

Факторы развития мировой экономики	Факторы развития МТК
Научно-технический прогресс: применение новых знаний, инноваций для производства продуктов с высокими потребительскими свойствами	Инновационные технологии в развитии транспортной инфраструктуры, сокращение издержек взаимодействия агентов в логистических цепях
Транснационализация мировой экономики: расширение сферы влияния транснациональных компаний	Инициация проектов развития МТК для обеспечения устойчивых потоков

Окончание табл. 1

Факторы развития мировой экономики	Факторы развития МТК
Экономические аспекты глобальных проблем человечества: обеспечение продовольствием, экология, здравоохранение и др.	Потребность в снижении транспортно-логистической составляющей в цене товаров, высокотехнологичные и экологичные технологии доставки товаров до конечного потребителя, обеспечение мобильности населения
Интернационализация и глобализация мировой экономики: выход национальных экономик за национальные границы, повышение взаимозависимости национальных экономик, долгосрочные (стратегические) связи между компаниями из разных стран.	Обеспечение доступности товаров и услуг в планетарном масштабе

В числе преимуществ, предоставляемых МТК странам-участникам, можно отметить следующие:

- повышение конкурентоспособности национальной транспортной системы в сегменте транзитных перевозок;
- увеличение пропускной способности генеральных направлений на маршрутах следования транзитного грузопотока за счет эффективного стратегического планирования загруженности транспортной сети;
- рациональное использование имеющихся мощностей инфраструктуры в обеспечении потребностей экономики страны;
- встраивание национальной экономики в систему мирового товарооборота с минимальными издержками, с повышением устойчивости межнациональных связей;
- получение дополнительного дохода от транзита грузов, реализации экспортно-импортного потенциала национальной экономики и другие.

Безусловно, имеются негативные факторы при реализации проектов МТК в национальных транспортных системах, в числе которых:

- увеличение экологической нагрузки на регионы пролегания МТК;
- вытеснение отдельных видов продукции из национальной экономики за счет снижения издержек экспортно-импортных операций;
- развитие диспропорций в территориальном развитии в стране с преимущественным ростом экономики регионов пролегания МТК;
- увеличение экономической и политической интеграции между странами-участницами МТК.

Рассмотрим перспективы развития МТК «Север – Юг» в приведенных аспектах, а также в контексте сближения трансконтинентальных рынков производства и потребления Азия – Европейский союз.

Формирование МТК «Север – Юг» инициировано Минтрансом России в целях реализации стратегического партнерства нашей страны со странами Прикаспийского региона. Международное соглашение о его создании было подписано между Россией, Ираном и Индией 12 сентября 2000 г. В настоящее время в Соглашение еще вошли Азербайджан, Армения, Беларусь, Казахстан, Оман, Сирия. МТК «Север – Юг» в своей южной части предполагает несколько маршрутов следования грузов с использованием железнодорожного транспорта (рис. 2):

- 1) Транскаспийский маршрут;
- 2) Западная ветвь коридора;
- 3) Восточная ветвь коридора;
- 4) Новый восточный маршрут (2014 г.) – железнодорожное сообщение Актау (Казахстан) – Бекет (Туркменистан) – Этрек (Туркменистан) – Инче Бурун (Иран) через Казахстан и Туркменистан.

Западная ветвь МТК «Север – Юг» обладает рядом преимуществ перед другими маршрутами, основным из которых является сокращение сроков доставки грузов в виду наикратчайшего расстояния перевозки. В перспективе данное направление может стать востребовано в первую очередь для кон-

тейнерных перевозок. В настоящее время уже ведется работа по организации мультимодального маршрута Россия – Азербайджан – Иран – Индия, по которому на регулярной основе будут осуществляться международные контейнерные перевозки.

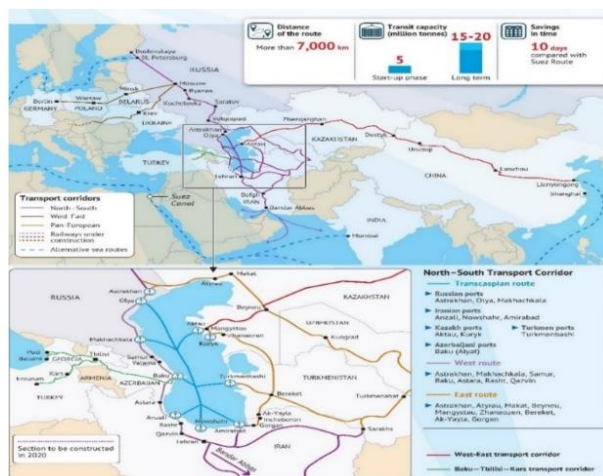


Рис. 2. МТК «Север – Юг»

(Источник: <https://valdaiclub.com/multimedia/infographics/international-transport-corridor/>)

В табл. 2 приведены характеристики маршрутов МТК «Север – Юг», проходящие через центральные регионы Российской Федерации.

Таблица 2

**Основные параметры вариантов маршрута «Север – Юг»:
Мумбаи (Индия) – Ворсино (Россия) [1]**

Маршрут	Расстояние, км	Расстояние между ст. Астрахань I и ст. Бендер-Аббас, км	Сроки доставки, сут.	Стоимость транспортировки, US\$/FEU
№ 1. Транскаспийский маршрут МТК	6802	2984	24	4850
№ 2. Западная ветвь МТК через Азербайджан	6754	2936	22	4600
№ 3. Восточная ветвь МТК через Казахстан – Узбекистан – Туркменистан	7880	4061	29	6500
№ 4. Восточная ветвь МТК через Казахстан – Туркменистан	7900	4082	28	5950
№ 5. Морской маршрут до Санкт-Петербурга + авто	14400	–	36	3390
№ 6. Морской маршрут до Новороссийска + авто	9260	–	28	3270

Последним недостающим звеном прямого железнодорожного сообщения западной ветви МТК «Север – Юг» является линия Решт – Астара (Иран) – Астара (Азербайджан), ввод в эксплуатацию, которой будет иметь стратегическое значение для определения места МТК «Север – Юг» в системе международных транспортных коридоров. Следует отметить следующие конкурентные преимущества железнодорожного сообщения западной ветви МТК «Север – Юг» (через Азербайджан):

- протяженность: наикратчайшее расстояние до столицы Ирана (г. Тегеран) и до ближайшего порта Персидского залива Бендер-Аббас;
- число пограничных переходов: одна страна-транзитер – Азербайджан;
- двухпутный электрифицированный участок через Махачкалу, Дербент и Баку;
- развитая экономика регионов пролегания ветви;

– практически непрерывная железнодорожная инфраструктура за исключением строящейся магистральной Астара (Азербайджан) – Решт (Иран).

Темпы развития торгово-экономических отношений между странами Международного соглашения о МТК «Север – Юг» в совокупности с привлечением грузопотоков в сообщении между Европой, странами Южной Азии и Персидского залива напрямую повлияют на эффективность рассматриваемого коридора и его перспективность как конкурентного международного маршрута (табл. 3). По многим странам данных за 2020 год нет.

Таблица 3

**Внешняя торговля Российской Федерации со странами
по маршрутам МТК «Север–Юг», млн долл. США**

Страна	2017 г.		2018 г.		2019 г.		2020 г.	
	Экс-порт	Им-порт	Экс-порт	Им-порт	Экс-порт	Им-порт	Экс-порт	Им-порт
Страны-транзитеры								
Азербайджан	1934,8	692,5	1713,5	773,3	2312,5	857,4	2075,4	813,7
Иран	1314,9	392,2	1207,8	533,1	1518,2	584,4	1425,2	795,7
Казахстан	12465,4	5016,4	13041,2	5348,9	14327,0	5725,0	14031,0	5034,1
Узбекистан	2 625,1	1026,6	3 320,8	1 063,0	3908,0	1179,3	4660,1	1222,6
Туркменистан	343,8	84,5	288,8	155,2	543,3	151,5	649,5	320,6
Страны-участники Соглашения МТК «Север – Юг»								
Армения	1247,0	528,8	1341,4	627,0	1692,5	857,2	1657,7	646,8
Беларусь	18613,8	12043,4	22015,7	12409,6	20780,7	13086,7	15956,2	12585,1
Оман	112,1	3,3	153,5	2,7	235,9	3,9	–	–
Сирия	279,8	3,2	396,8	4,2	300,4	5,2	–	–
Страны зоны притяжения								
Афганистан	205,3	2,9	118,7	3,9	120,9	5,1	–	–
Кувейт	707,9	0,1	644,5	0,5	552,6	1,4	–	–
ОАЭ	1458,9	171,3	1483,3	205,8	1599,3	235,2	–	–
Катар	49,8	23,5	42,3	36,4	45,9	36,5	–	–
Саудовская Аравия	770,7	144,5	762,7	292,1	1402,9	264,2	–	–
Пакистан	261,0	280,0	418,7	313,6	168,9	372,6	–	–
Китай	38	48	56019,4	52225,4	57322,0	54140,5	49061,0	54908,2

При относительном спаде международного товарооборота в 2020 году по отношению к 2019 г. наблюдается абсолютный прирост товарооборота со всеми странами, за исключением Кувейта и Афганистана. При этом среднегодовой прирост товарооборота со странами-транзитерами составляет более 5 % в год. Положительный прирост товарооборота со странами-участниками соглашения также является позитивным фактом в прогнозе грузооборота МТК «Север – Юг». Точные оценки перспективного грузооборота связаны не только с оценкой потенциала стран тяготения МТК «Север – Юг», но и с транзитными возможностями коридора грузопотоков из Индии и стран АТР в Восточную и Западную Европу.

Существующие геополитические и инфраструктурные ограничения в части функционирования трансконтинентального железнодорожного сообщения порты Балтики и Персидского залива, не позволяют провести точные оценки по грузообороту. Оценивая самодостаточность грузовой базы МТК «Север – Юг», можно привести разные цифры из разных источников. Самые пессимистичные прогнозы определяют объемы свыше 12–15 млн тонн в год (табл. 4). Учитывая, что самокупаемость железнодорожной линии достигается на уровне более 10 млн. тонн, можно сделать вывод о стратегической экономической и финансовой устойчивости функционирования МТК «Север – Юг».

Развитие трансконтинентальных направлений организации потоков грузов и пассажиров имеют как сторонников, так и конкурентов-противников. Зачастую решение таких масштабных задач находится больше в геополитической плоскости, нежели в геоэкономической или национальной. Рассматривая геополитические аспекты развития МТК, следует исходить из конкуренции с существующими

щими в зоне его тяготения транспортными коридорами и их влиянием на его грузовую базу. МТК «Север – Юг» достаточно самостоятельный и относительно независимый от других коридоров. Причем его развитие его может способствовать развитию альтернативных коридоров (табл. 5).

Таблица 4

Прогнозные объемы грузооборота МТК «Север – Юг»

Прогноз, млн тонн	Документ, название, ссылка
20	Анализ существующих МТК, действующих международных транспортных коридоров, проходящих через территории государств – членов ЕвроАзЭС, 2019. (URL: https://index1520.com/analytics/analiz-sushchestvuyushchikh-mezhdunarodnykh-transportnykh-koridorov-prokhodyashchikh-cherez-territor/)
25	В. В. Путин: Запуск МТК «Север – Юг» позволит в 2,5 раза быстрее доставлять грузы из Европы, 2018. (URL: https://1prime.ru/News/20180812/829118358.html)
10 (+ 4 млн пасс)	Президент Ирана призвал к завершению строительства железной дороги к порту Энзели, 2021; Состоялась встреча посла Ирана в России с представителем руководства РЖД России, 2021. (URL: http://casp-geo.ru/sostoyalas-vstrecha-posla-irana-v-rossii-s-predstavitelem-rukovodstva-rzhd-rossii/)
15–20	Караваев А. Транспортный коридор «Север – Юг»: реалии транзита и перспективы трансрегиональной интеграции, 2019. (URL: http://politanalyse.com/2019/06/19/transportnyj-koridor-sever-yug-realii-tranzita-i-perspektivy-transregionalnoj-integracii/)

Современное состояние МТК «Север – Юг» можно охарактеризовать следующими положениями: установившиеся оси развития, активное развитие международных программ поддержки коридоров, инвестиционная поддержка Мирового банка, наличие проблем развития инфраструктуры наземных кластеров транспортных коридоров, обострение борьбы за привлечение инвестиций и геополитическое влияние за счет реализации проектов МТК. При этом основными логистическими факторами организации потоковых процессов в интересах рынка и конечного потребителя являются гарантированность времени доставки, интегральная стоимость услуги, время доставки, сохранность (надежность, безопасность). В современных транспортно-логистических цепях сухопутные транспортные сообщения не уступают морским, что позволяет дать оптимистичные прогнозы развития МТК «Север – Юг», который пережил десятилетия забвения по геополитическим причинам. Многовариантность развития и возможность соединения южных и северных морей сухопутным путем протяженностью около 2,5 тыс. км – один из главных преимуществ развития МТК «Север – Юг».

Таблица 5

Конкуренция и «сотрудничество» МТК «Север – Юг» с другими транспортными коридорами

Транспортный коридор	Преимущества	Недостатки
Транскаспийский МТК и «ТРАСЕКА»	Активная позиция по ее развитию стран ЕС, Центральной Азии и даже Китая; готовая транспортная инфраструктура; развитие портовой инфраструктуры Азербайджаном и Грузией	Пересечение морских акваторий Каспийского и Черного морей; большое число пограничных переходов; конкурентность грузовой базы на отдельных направлениях
Транспортный коридор «Транссиб»	Неконкурентный характер грузовой базы с МТК «Север – Юг»; возможность «сотрудничества» меридионального и широтного коридоров в точках их пересечения	Отсутствие координационных транспортно-логистических центров в пунктах пересечения с другими; слабая согласованность политики развития

Окончание табл. 5

Транспортный коридор	Преимущества	Недостатки
Евразийский транспортный коридор	Установившийся грузопоток и пункты пропуска; развитые пункты пропуска; единое таможенное пространство	Конкуренция с грузопотоками проходящими через Центральную Азию (из Индии и Пакистана)

Другие преимущества транспортного коридора, такие как пересечение двух национальных границ (в кратчайшем варианте), сильные экономики в зоне тяготения коридора, высокая плотность населения территорий в коридоре трасс МТК, благоприятные географико-климатические условия, отсутствие геополитических рисков транзитных стран и растущее число стран, «присоединяющихся» к проекту – катализаторы развития этого проекта. В то же время следует отметить определенное отставание транспортно-логистического рынка основных стран партнеров МТК «Север – Юг» (Российская Федерация, Азербайджан, Исламская республика Иран) при положительном тренде их оценок за последние годы. Данные рейтинга эффективности логистики от мирового банка представлены на рис. 3 (данные рейтинга в Азербайджане за последние годы отсутствуют).

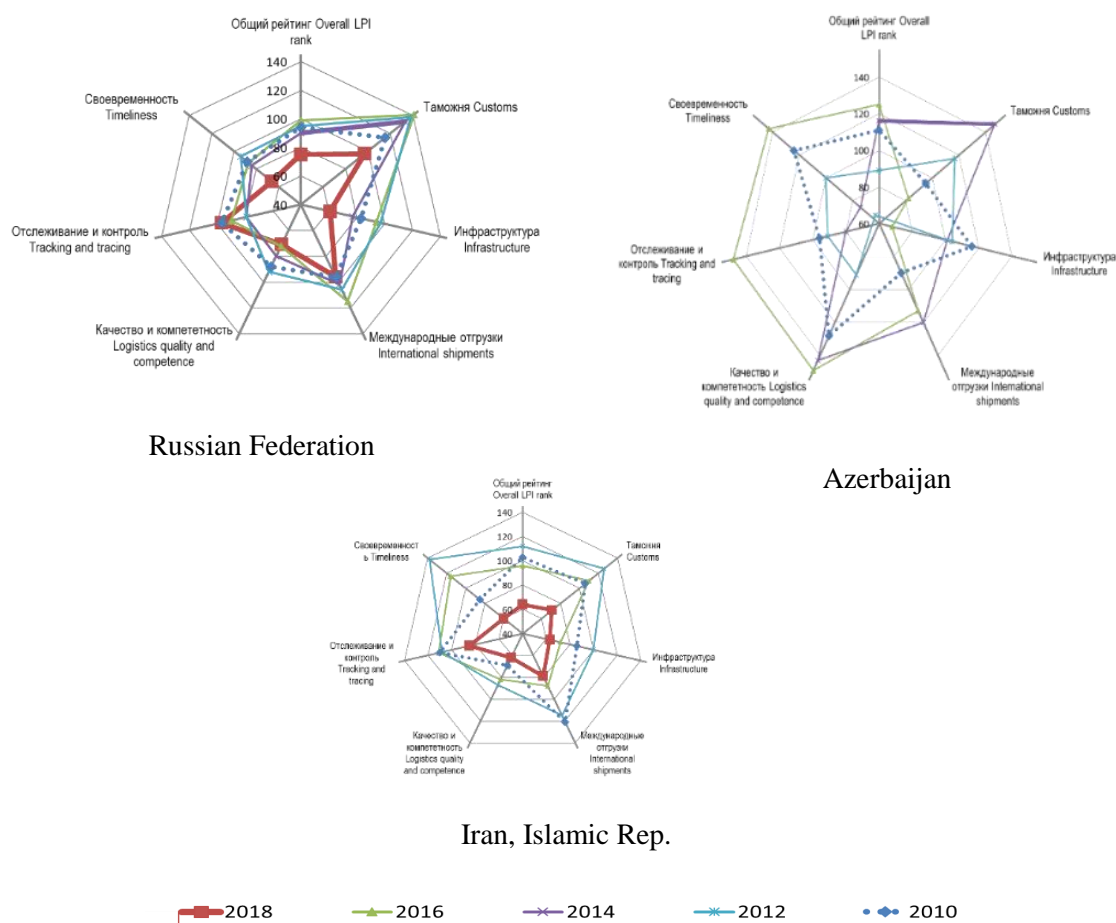


Рис. 3. Рейтинг LPI стран-регионов МТК «Север – Юг»

В связи с активными геополитическими изменениями в отношении стран-транзитеров МТК «Север – Юг», такими как экономические санкции и военные операции в зоне тяготения коридора, наблюдаются неустойчивость, низкие значения, неполнота данных.

При определении зоны притяжения транспортного коридора нужно исходить из теоретических положений, приведенных в [19].

Возникает задача определения грузовой базы с учетом удовлетворения главных для грузовладельцев параметров перевозки (срок доставки, стоимость перевозки) с привлечением грузопотоков смежных маршрутов, которую можно локализовать в следующих подзадачах (рис. 4):

- анализ и расчет возможных схем доставки грузов согласно тарифообразованию на различных видах транспорта;
- графическое представление и описание возможностей транспортного коридора в конкурентной среде;
- распределение грузопотоков транспортного коридора, согласно выбранной схеме доставки.

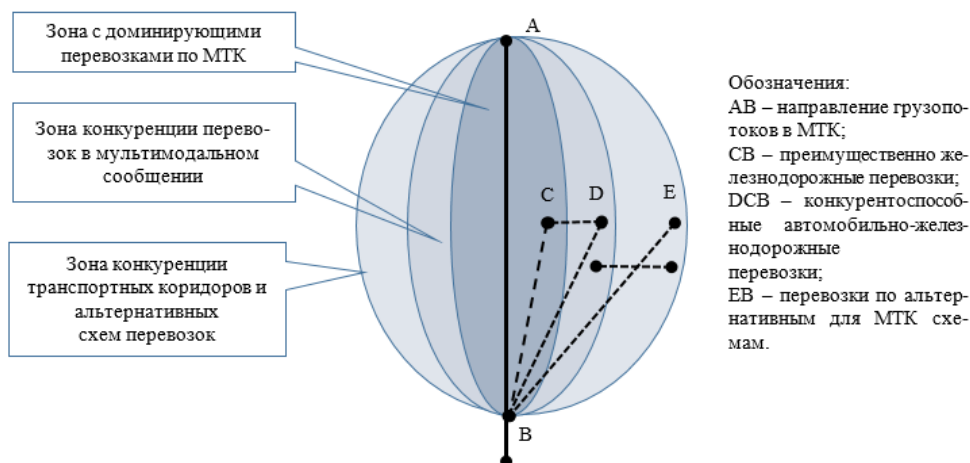


Рис. 4. Схема зон притяжения транспортного коридора

Данные расчетов стоимости перевозки и сроков доставки грузов автомобильным и железнодорожным видами транспорта (табл. 6).

Таблица 6

Параметры оценки привлекательности транспортного коридора

Наименование транспортного узла	Автомобильный транспорт			Железнодорожный транспорт		
	Бусловская	Выборг	Усть-Луга	Бусловская	Выборг	Усть-Луга
<i>Стоимость перевозки транзитных грузов в контейнере, USD^{*)}</i>						
Таганрог	3144,7	3101,9	3148,9	682	680	682
Ейск	3311,4	3268,6	3315,6	685	685	685
Тамань	3747,4	3704,6	3751,6	703	700	700
Новороссийск	3654,7	3612,0	3659,0	697	695	695
Туапсе	3731,7	3688,9	3735,9	705	703	705
Оля	3998,1	3955,4	4002,4	700	700	700
Махачкала	4273,1	4230,4	4277,4	718	715	715
Самур	4538,1	4495,4	4542,4	725	723	725
<i>Сроки доставки транзитных грузов в контейнере, сут.</i>						
Таганрог	3	3	3	7	8	8
Ейск	3	3	3	7	8	8
Тамань	3	3	3	8	9	9
Новороссийск	3	3	3	8	9	9
Туапсе	3	3	3	8	9	9
Оля	3	3	3	8	9	9
Махачкала	4	4	4	8	9	9
Самур	4	4	4	8	9	9

*Расчет сроков доставки для автомобильного транспорта производился согласно [11], в котором обозначен режим труда и отдыха водителей-дальнобойщиков (9–11 ч. в сутки).

Стоимостная разница между железнодорожной и автомобильной перевозкой заключается в способности железнодорожного транспорта к массовым перевозкам именно тяжеловесных грузов с

наименьшими затратами в сравнении с автотранспортом, а также предоставляемыми ОАО «РЖД» пониженными тарифами на перевозку контейнерных грузов.

Дискуссия

Основными проблемами в области развития транспортно-логистической инфраструктуры и ее сбалансированности МТК «Север – Юг», на наш взгляд, являются:

- наличие инфраструктурных разрывов в железнодорожном сообщении по территории Ирана;
- санкционное давление на Исламскую республику Иран, тормозящее реализацию железнодорожных и иных транспортных проектов, а также использование территории Ирана как страны-транзитёра;
- несбалансированность пропускных способностей участков коридора как в автодорожном, так и железнодорожном сообщениях;

- отсутствие объектов транспортно-логистических центров сопряжения коридора с широтными и иными коридорами, способствующих вариативности организации перевозок и увеличению грузовой базы.

Развитие транспортных технологий и логистического сервиса как драйвера развития МТК «Север – Юг» происходит по следующим направлениям:

- организационные решения в области создания консолидирующих грузовую базу, транспортную инфраструктуру (особенно подвижной состав, контейнеры), управление перевозочным процессом в форме единых операторов;

- создание центров цифрового управления транспортным коридором, обеспечивающие устранение барьеров в организации документооборота, развитие коммуникаций участников перевозок;

- создание центров финансовой ответственности развития транспортной инфраструктуры, страхования перевозок, обеспечение дисциплины платежей и других вопросов;

- создание аналитического центра мониторинга транспортно-логистических процессов МТК «Север – Юг», научного сопровождения его развития, формирование аналитических материалов в интересах участников проекта.

Ниже приведены практические решения, которые могут способствовать развитию международного транспортного коридора «Север – Юг»:

- контейнеризация грузовой базы как способ повышения мультимодальности перевозок;
- подготовка и реализация схем увеличения потенциала грузовой базы транспортного коридора за счет подвозящих маршрутов перевозок с развитием их транспортной инфраструктуры;
- консолидированное развитие МТК «Север – Юг» с широтными и другими конкурентными коридорами.

Заключение

Современные тренды в экономике и геополитике и их влияние на технологии международных перевозок выражаются в следующих положениях, имеющие непосредственное отношение и к МТК «Север – Юг»:

1 Цифровизация глобальных экономических связей (цифровая логистика, цифровой транспорт, смарт-логистика) формируют новое качество в организации МТК, которое связано с новой (четвёртой) промышленной революцией.

2 Активный переход к единым платформам в транспортных технологиях (например, страны Евросоюза, проекты Евразия).

3 Унификация товарных и грузовых единиц (паллет, контейнер, контрейлер и др.) дает новый импульс к системе онлайн-торговли и связанное с этим увеличение товарных потоков в МТК.

4 Активизация разработок в сфере кроссплатформенных транспортных средств для перевозок в международном сообщении.

5 Проекты интегрированного развития грузового и(или) пассажирское движения, увеличивающие социальную значимость МТК.

6 Интеграция образовательных программ в сфере подготовки кадров для МТК, в области международной и интегрированной логистики.

Список литературы

1 **Федоренко, Р. В.** Современные вопросы развития таможенно-логистической инфраструктуры международного транспортного коридора «Север – Юг» / Р. В. Федоренко, С. И. Ашмарина, М. Во-

References

1 **Fedorenko, R. V.** Modern Issues of Development of the Customs and Logistics Infrastructure of the International North-South Transport Corridor / R. V. Fedorenko, S. I. Ashmarina, Vochozka M. // Sustainable Growth and Development of Economic

хозка // Устойчивый рост и развитие экономических систем. – Springer Cham, 2019. – С. 63–75. – DOI 10.1007/978-3-030-11754-2-5.

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

3 **Šakalys, R.** Research on Intermodal Terminal Interaction in International Transport Corridors / R. Šakalys, N. Batarlienė // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 187. – P. 281–288. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.04.376.

4 **Prinston, P.** World Transport System and Logistics : the Main Directions of Development / P. Prinston. – URL: <https://www.searates.com/blog/post/world-transport-system-and-logistics-the-main-directions-of-development> (date of access: 06/22/2023).

5 **Акперов, И. Г.** Направления комплексного регионального социально-экономического развития на основе когнитивного моделирования реализации инвестиционной стратегии / И. Г. Акперов, Н. В. Брюханова, Д. И. Дынник ; под редакцией Р. Алиева и др. // 13-я международная конференция по теории и применению нечетких систем и мягких вычислений – ICAFS-2018. Достижения в области интеллектуальных систем и вычислительной техники. – Т. 896. – Springer Cham. – DOI 10.1007/978-3-030-04164-9_56.

6 Эффективная и безопасная логистическая транспортная система / М. В. Колесников, Н. Н. Лябах, Е. А. Мамаев, М. В. Бакалов // IOP Conf. Серия : Материаловедение и инженерия. – 2020. – Издательство IOP. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031.

7 Моделирование железнодорожных грузовых перевозок методом экономико-географического разграничения в регионе юго-восточного побережья Балтийского моря / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. М. Задорожний [и др.] // Транспортные проблемы. 2019. – Том 14. – С. 77–87. – DOI 10.20858/tp.2019.14.2.7.

8 **Прокофьев, М. Н.** Перспективы транспортного коридора «Север – Юг» / М. Н. Прокофьев, М. М. Тахиров // Мир транспорта и транспортировка. – 2019. – Т. 17, Вып. 5. – С. 200–213. – DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-5-200-213.

9 Распоряжение Правительства Российской Федерации № 2101-р от 30.09.2018 г. «О Комплексном плане модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до

Systems. Contributions to Economics. – Springer Cham, 2019. – P. 63–75. – DOI 10.1007/978-3-030-11754-2-5.

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

3 **Šakalys, R.** Research on Intermodal Terminal Interaction in International Transport Corridors / R. Šakalys, N. Batarlienė // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 187. – P. 281–288. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.04.376.

4 **Prinston, P.** World Transport System and Logistics : the Main Directions of Development / P. Prinston. – URL: <https://www.searates.com/blog/post/world-transport-system-and-logistics-the-main-directions-of-development> (date of access: 06/22/2023).

5 **Akperov, I. G.** Directions of Complex Regional Socio-Economic Development Based on Cognitive Modeling of Realization of Investment Strategy / I. G. Akperov, N. V. Brukhanova, D. I. Dynnik ; in ed. by R. Aliev et al. // 13th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 896. – Springer Cham. – DOI 10.1007/978-3-030-04164-9_56.

6 Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – IOP Publishing. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031.

7 Modeling of the rail freight traffic by the method of economic-geographical delimitation in the region of the south-easter coast of the Baltic Sea / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. M. Zadorozhniy [et al.] // Transport Problems. 2019. Vol. 14. – P. 77–87. – DOI 10.20858/tp.2019.14.2.7.

8 **Prokofiev, M. N.** Respects for North-South transport corridor / M. N. Prokofiev, M. M. Tahirov // World of transport and transportation. – 2019. – Vol. 17, Iss. 5. – P. 200–213. – DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-5-200-213.

9 Russian Federation government decree No. 2101-r dated 30.09.2018 « On a comprehensive plan for the modernization and expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024

2024 года (с изменениями на 13.03.2020 г.))». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/551365461> (date of access: 09/20/2020).

10 **Мамаев, Э. А.** Современные тенденции развития транспортных коридоров в России и мире / Э. А. Мамаев, Б. И. Алибеков // Конференция «Транспорт: наука; образование; производство». – РГУПС, 2018. – Т. 1. – С. 40–43.

11 **Мамаев, Э. А.** Стратегические тенденции грузооборота в крупных хабах: оценка, кластеризация и прогнозирование / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, Б. А. Левин [и др.] // Международный журнал экономических перспектив. – 2017. – Вып. 11 (2).

12 **Михайлик, М.** Эмпирические маркеры в концепции цифровой логистики многоканальных цепочек поставок/ М. Михайлик, В. Багинова, Э. Мамаев // Актуальные проблемы архитектуры, гражданского строительства и экономики окружающей среды (ТРАСЕЕ 2018). Веб-конференция E3S. – Том 91. – 2019. – DOI 10.1051/e3sconf/20199108056.

13 **Haghighi, M.** Development of container transit from the iranian south ports with a focus on the international north south transport corridor / M. Haghighi, T. Hassangholi Pour, H. Khodadad Hossani [et al.] // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation : Maritime Transport and Shipping. – 2013. – P. 187–193.

14 **Пак, Е.** Транзитные потенциалы России и Казахстана. Мировая экономика и международные отношения. – 2020. – Т. 64, № 11. – С. 132–138. – DOI 10.20542/0131-2227-2020-64-11-132-138.

15 Trans-Caspian International Transport Route. Available at: <https://middlecorridor.com/ru> (date of access: 02/14/2020).

16 **Solhdoost, M.** (2021) Iran's geo-strategic orientations toward China and India, Journal of the Indian Ocean Region / M. Solhdoost. – DOI 10.1080/19480881.2021.1878583.

17 **Davtyan, V.** Armenia's transport security within the framework of ITC TRACECA and "North-South" / V. Davtyan. – MATEC Web of Conferences 212. – 05004. – 2018. – DOI 10.1051/matecconf/201821205004.

18 **Тимакова, О. А.** Стратегия стран Персидского залива: особенности политики в отношении стран Центральной Азии / О. А. Тимакова // Центральная Азия и Кавказ. – 2020. – Том 21, Вып. 1. – С. 33–42. – DOI 10.37178/ca-c.20.1.03.

19 **Мамаев, Э. А.** К оценке потенциала развития международного транспортного коридора «Север – Юг» / Э. А. Мамаев, Д. В. Сорокин // Известия Транссиба. – 2020. – № 3. – С. 86–96. – EDN SKXKAC.

(as amended on 13.03.2020))». – URL: <http://docs.cntd.ru/document/551365461> (date of access: 09/20/2020).

10 **Mamaev, E. A.** Current trends in the development of transport corridors in Russia and the world / E. A. Mamaev, B. I. Alibekov // Conf. «Transport: science; education; production». – RGUPS, 2018. – Vol. 1. – P. 40–43.

11 **Mamaev, E. A.** Strategic trends of cargo turnover in major hubs : Assessment, clustering and prediction / E. A. Mamaev, A. N. Guda, B. A. Levin [et all.] // International Journal of Economic Perspectives. – 2017. – Iss. 11 (2).

12 **Mikhaylyk, M.** Empirical markers in the concept of digital logistics of multichannel supply chains / M. Mikhaylyk, V. Baginova, E. Mamaev // Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TRACEE 2018). E3S Web Conf. Vol. 91. – 2019. – DOI 10.1051/e3sconf/20199108056.

13 **Haghighi, M.** Development of container transit from the iranian south ports with a focus on the international north south transport corridor / M. Haghighi, T. Hassangholi Pour, H. Khodadad Hossani [et al.] // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation: Maritime Transport and Shipping. – 2013. – P. 187–193.

14 **Pak, E.** Transit Potentials of Russia and Kazakhstan. World economy and international relations. – 2020. – Vol. 64, No 11. – P. 132–138. – DOI 10.20542/0131-2227-2020-64-11-132-138.

15 Trans-Caspian International Transport Route. Available at: <https://middlecorridor.com/ru> (date of access: 02/14/2020).

16 **Solhdoost, M.** (2021) Iran's geo-strategic orientations toward China and India, Journal of the Indian Ocean Region / M. Solhdoost. – DOI 10.1080/19480881.2021.1878583.

17 **Davtyan, V.** Armenia's transport security within the framework of ITC TRACECA and "North-South" / V. Davtyan. – MATEC Web of Conferences 212. – 05004. – 2018. – DOI 10.1051/matecconf/201821205004.

18 **Timakova, O. A.** Strategy of the gulf countries: Special aspects of policy towards central Asian countries / O. A. Timakova // Central Asia and the Caucasus. – Vol. 21, Iss. 1. – P. 33–42 – DOI 10.37178/ca-c.20.1.03.

19 **Mamaev, E. A.** To assess the development potential of the «North-South» international transport corridor / E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // Transsib news. – 2020. – No. 3. P. 86–96. – EDN SKXKAC.

V. D. Vereskun, E. A. Mamaev, D. V. Sorokin

THE ASSESSMENT OF PROSPECTS FOR GROWTH OF CARGO TURNOVER OF THE INTERNATIONAL TRANSPORT CORRIDOR "NORTH - SOUTH" IN MODERN CONDITIONS

Abstract. The dynamics of the global market contributes to the increase in the number and potential of transport corridors. The North-South transport corridor considered in the work is one of the strategic ones in ensuring the flow of goods in the direction of India-Iran-Azerbaijan-Russia-European Union.

A predictive analysis of the dynamics of the development of the freight turnover of the transport corridor was carried out, drivers and barriers to its development were identified in the context of changes in the geopolitical and economic environment of the markets. Attention is paid to the issues of balanced development of the potential of transport corridors, taking into account the formation of nodal transport and logistics centers at the intersections of meridional and latitudinal corridors.

It is shown that railway transport in the ITC "North-South" in its Russian segment is becoming a key factor in the development and competitiveness of transportation compared to alternative routes. The issues of the competitiveness of container transportation of the ITC "North - South" in the conditions of growing multimodality and the growth of containerized cargo are considered. Prospects for the development of the ITC "North-South" in the future depend on active organizational decisions in ensuring the planning and regulation of flows, excluding international barriers in its development, as well as the introduction of digital technologies for monitoring and managing flows.

Keywords: transport corridor, cargo transportation, multimodal transportation, container transportation, transport and logistics costs, quality of transport services.

For citation: Vereskun, V. D. The assessment of prospects for growth of cargo turnover of the international transport corridor "North – South" in modern conditions / V. D. Vereskun, E. A. Mamaev, D. V. Sorokin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 45–56. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_45.

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

Мамаев Энвер Агапашаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Логистика и управление транспортными системами»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: mamaev_enver@mail.ru

Сорокин Дмитрий Валерьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
доцент,
e-mail: 2013014015@list.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

Mamaev Enver Agapashaevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Logistics and Transport System Management»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of Chair,
e-mail: mamaev_enver@mail.ru

Sorokin Dmitry Valeryevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Operational Process Management»,
Associate Professor,
e-mail: 2013014015@list.ru

Н. Ф. Сирина, В. Л. Герус

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ С ЦЕЛЕВЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОМПАНИИ

Аннотация. Представлены результаты исследования ключевых показателей эффективности в контексте стратегического развития и постановки целевых результатов деятельности компании. Раскрыто содержание системы сбалансированных показателей и ключевых показателей эффективности, а также специфика приведенных показателей в сфере транспортно-логистической деятельности. На основе анализа действующих КРП выявлены проблемы взаимодействия подразделений ОАО «РЖД» при выполнении перевозочного процесса и сформулированы новые сквозные КРП, позволяющие устранять «узкие места» в управлении Единым сетевым технологическим процессом. Деятельность дирекции управления движением определена как результирующая в управлении эффективностью сквозного процесса. Сформулированы требования к моделированию бизнес-процессов ОАО «РЖД» на основе управления КРП.

Ключевые слова: стратегия развития железнодорожного транспорта; методологии управления перевозочным процессом; эффективность перевозочного процесса; система сбалансированных показателей; ключевые показатели эффективности; Единый сетевой технологический процесс.

Для цитирования: Сирина, Н. Ф. Анализ взаимодействия ключевых показателей эффективности с целевыми результатами деятельности компании / Н. Ф. Сирина, В. Л. Герус // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 57–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_57.

Стратегические ориентиры холдинга «РЖД», сформулированные в долгосрочной программе развития до 2025 года, определяют основные положения организации процессов железнодорожного транспорта, направленные на достижение национальных целей развития Российской Федерации [1, 2]. Социально-экономическое развитие и повышение благосостояния граждан, приведенные как миссия государства в транспортной стратегии РФ до 2030 г. [3], в том числе обеспечиваются достижением таких целей, как повышение качества транспортно-логистического обслуживания пассажиров и грузовладельцев и развитие транспортно-логистической инфраструктуры обслуживаемой территории.

Достижение целей и оптимальное выполнение технических и технологических процессов затрудняется значительным количеством проблемных мест на сети железных дорог, а также сложностью взаимодействия между железными дорогами, обусловленной сложившимися взаимосвязями региональных подразделений.

Решение таких проблем заключается в актуализации и совершенствовании нормативно-технологической базы ОАО «РЖД» и введении прозрачной системы контроля достижения плановых результатов работы подразделений. Системное взаимодействие подразделений, ориентированное на достижение общих целей ОАО «РЖД», реализуется в рамках Единого сетевого технологического процесса (ЕСТП), учитывающего динамику структуры и направления основных транспортных потоков, прогнозируемой величины грузооборота, изменения дальности перевозок, внедрения и использования инновационных техники и технологии, изменения требований к управлению перевозочным процессом в условиях сквозных технологий [5]. Устойчивое развитие компании предполагает соблюдение принципа адаптивности, который заключается в своевременном и адекватном изменении параметров процессов и в том числе совершенствовании процедур их мониторинга и оценки показателей эффективности. В работе [12] отмечается, что «системный анализ функционирования железнодорожного транспорта России и тенденций его развития свидетельствует о том, что, несмотря на стабильную работу, для отрасли характерен ряд серьезных проблем. И главная из них заключается в том, что ассортимент

и качество услуг, уровень эффективности перевозочного процесса и инфраструктурного комплекса не в полной мере отвечают требованиям пользователей».

Решение таких проблем и повышение эффективности функционирования предприятий сферы транспорта возможно путем реализации принципиально новых подходов к управлению бизнес-процессами, определения и изменения их характеристик, выходных параметров и требуемых ресурсов.

Система ключевых показателей эффективности, разработанная и внедряемая в ОАО «РЖД», представляет собой формализованную систему анализа и управления основными показателями деятельности с целью повышения эффективности бизнес-процессов. К основным преимуществам системы КПЭ относят предметность и объективность, они, в свою очередь, позволяют значительно повысить эффективность управления бизнес-процессами. Основное назначение системы КПЭ заключается в развитии клиентоориентированности предприятия за счет реализации следующих положений:

– стандартизация параметров качества логистического обслуживания и бизнес-процессов, что позволит удовлетворять больше требований потребителей, а значит, и увеличивать долю рынка транспортно-логистических услуг;

– повышение доходности оказываемых транспортно-логистических услуг;

– повышение эффективности транспортно-логистических бизнес-процессов и конкурентоспособности на рынке транспортно-логистических услуг в соответствии со стратегическими задачами и ценностями компании [10].

Система ключевых показателей эффективности деятельности структурных подразделений ОАО «РЖД» и их взаимодействия базируется на концепции Дэвида Парментера, общее содержание которой заключается в отображении результатов многих видов деятельности в течение достаточно продолжительного периода [6].

КПЭ сгруппированы в соответствии с рекомендуемым «правилом 10/80/10». Наибольшее внимание в современной отечественной литературе и в отчетности компании уделяется показателям эффективности, характеризующим стратегический аспект работы компании, таким как EBITDA, ROIC, количество перевезенных пассажиров, приведенная работа по инфраструктуре и т. д. Однако, как отмечают авторы концепции KPI, производственные показатели, характеризующие технические и технологические аспекты деятельности, составляют большую часть разрабатываемой системы, а значит, требуют более детализированного анализа и более четко формализации в рамках выполнения бизнес-процессов.

Взаимодействие основных участников перевозочного процесса, в частности подразделений производственного блока, регламентируется ЕСТП и основывается на сквозных принципах управления перевозочным процессом, при этом ответственность за его эффективность несет дирекция управления движением как собственник процесса. Следовательно, именно дирекция управления движением определяет интегральные показатели эффективности и результативности процессов всех подразделений ОАО «РЖД» как большой сложной адаптивной системы.

Действующая в настоящее время в ОАО «РЖД» система KPI позволяет оценивать эффективность как сквозного процесса в целом, так и частных процессов его участников. Для этого используются показатели оценки эффективности достижения целевых результатов при затраченных ресурсах по отдельным показателям производственных процессов филиалов и структурных подразделений региональных дирекций. При этом персонал этих подразделений должен правильно воспринимать регламентированные для них ключевые показатели эффективности для достижения стратегических целей компании. Ключевые показатели эффективности должны носить нормативный характер и в неизменном состоянии обеспечивать устойчивую деятельность компании [12].

На стыках взаимодействия филиалов производственного блока возникает большое количество проблемных вопросов, для решения которых нередко принимаются не самые эффективные и оптимальные решения. Для выявления проблемных мест взаимодействия между различными подразделениями производственного блока ОАО «РЖД» проведен опрос более ста руководителей и специалистов, результаты которого представлены на рис. 1–3.

Исходя из результатов, представленных на рис. 1, по мнению большинства опрошенных ключевыми проблемами во взаимодействии дирекций являются низкое качество коммуникаций и взаимодействия, а также разноплановые цели дирекций. При этом недостаточный уровень регламентации не выглядит существенной проблемой.

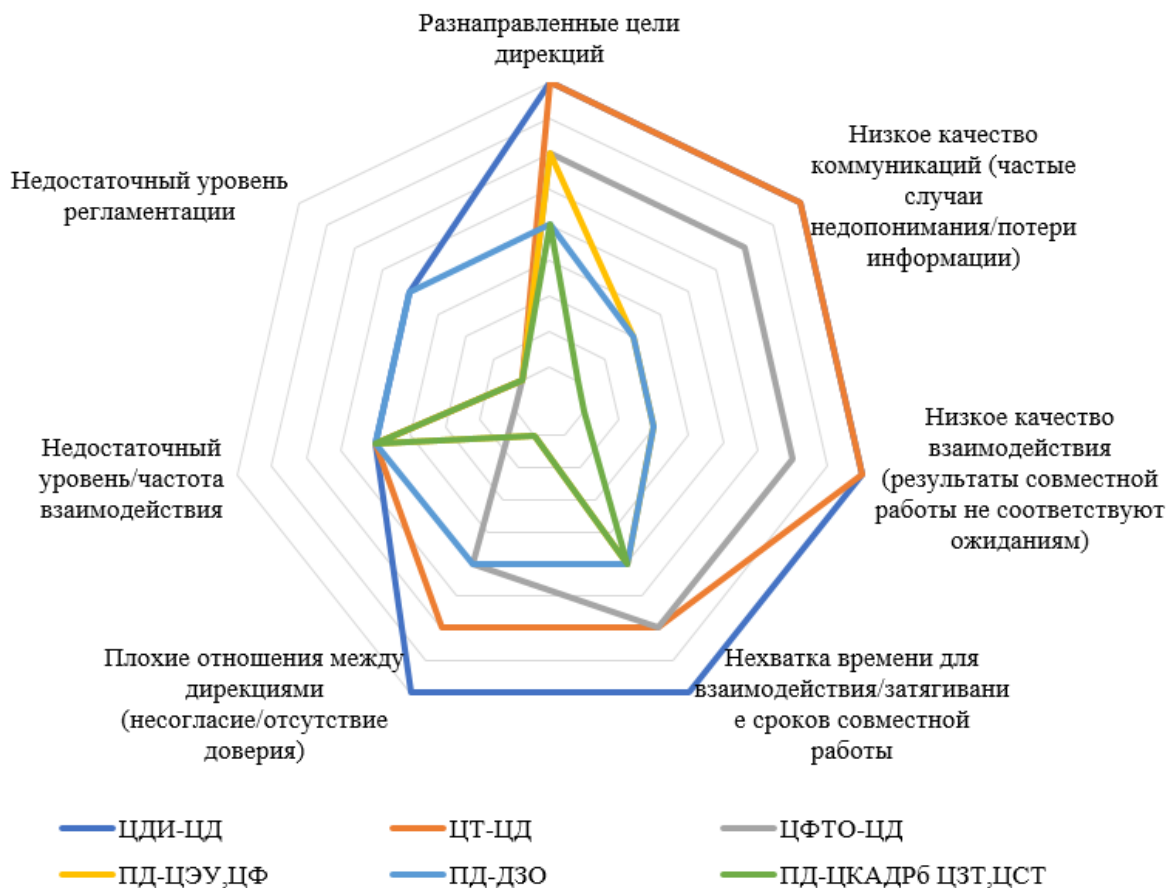


Рис. 1. Проблемы взаимодействия подразделений

Использование системы КПЭ позволит оперативно уточнять правила взаимодействия между структурными подразделениями, обеспечивать регулярное обновление регламентов и договоренностей между отделами и спецификацию целей при составлении должностных регламентов и распределении задач в производственных процессах, контролировать промежуточные итоги выполнения задач и обеспечивать обратную связь относительно понимания исполнителями полученной информации.

Результаты опроса, приведенные на рис. 2 и 3, также позволяют сделать вывод о слабой согласованности восприятия задач стратегического управления ОАО «РЖД» руководителями и исполнителями на местах.

По результатам этого исследования отмечаются проблемы в реализации цели Стратегии ОАО «РЖД» и системного выполнения Единого сетевого технологического процесса.

Требования к повышению внутренней эффективности процессов ОАО «РЖД» обуславливают необходимость совершенствования взаимодействия подразделений блока ЦФТО–ЦД–ЦДИ–ЦТ, что, в свою очередь, формулирует задачу актуализации системы сквозных ключевых показателей эффективности для оценки деятельности и дальнейшей балансировки плановых значений показателей с целью достижения не локальных, а общих для холдинга результатов.

Проблема нарушения коммуникаций между подразделениями достаточно распространена в практике ОАО «РЖД» вследствие функционального и географического масштаба организации. К ос-

новным причинам ее возникновения принято относить отсутствие внутренних договоренностей, устаревающие правила координации и взаимодействия, цели подразделений, которые зачастую могут противоречить друг другу, несмотря на системный характер их регламентации, проблемы в организации коммуникационных каналов при передаче информации между подразделениями.



Рис. 2. Проблемы, возникающие при реализации целей Стратегии ОАО «РЖД»



Рис. 3. Проблемы внедрения изменений ОАО «РЖД»

Для выявления разрывов в существующей системе ключевых показателей эффективности произведено сопоставление целей подразделений и задействования ключевых драйверов ОАО «РЖД». На рис. 4 и 5 представлены основные приоритеты и действующие KPI подразделений производственного блока ОАО «РЖД».

	Приоритет	Действующие KPI	Действующие KPI	Приоритет
ЦД	Обеспечить доставку	Отношение эксплуатационного парка к рабочему	Отношение эксплуатационного парка к рабочему	Обеспечить эффективность использования тяговых ресурсов
		Коэффициент разрыва (отклонение т.км эксплуат. и тариф.)	Рабочий парк	
		Производительность маневрового локомотива	Расход электроэнергии	
		Соотношение средней участковой и технической скоростей	Средняя производительность локомотива эксплуатационного парка	
		Средняя техническая скорость	Производительность труда	
ЦФТО	Обеспечить снижение себестоимости в сфере ответственности ЦФТО	Себестоимость	Производительность труда	Обеспечить возможность для оптимального пропуска по инфраструктуре
			Участковая скорость	
			Расход электроэнергии	
			Себестоимость	
	Приоритет	Действующие KPI	Действующие KPI	Приоритет

Рис. 4. Ключевые задачи подразделений в разрезе снижения себестоимости перевозки

	Приоритет	Действующие KPI	Действующие KPI	Приоритет
ЦД	Обеспечить доставку по графику	Выполнение расписания движения грузовых поездов	Выполнение расписания движения грузовых поездов	Обеспечить продвижение поездо-потока тяговыми ресурсами
		Доля отправок в груженных вагонах с соблюдением сроков доставки	Доля отправок в груженных вагонах с соблюдением сроков доставки	
		Средняя скорость доставки		
ЦФТО	Обеспечить максимально возможную погрузку	Погрузка	Выполнение расписания движения грузовых поездов	Обеспечить возможность для оптимального пропуска по инфраструктуре
		Доля высокодоходных грузов в погрузке	Доля отправок в груженных вагонах с соблюдением сроков доставки	
		Доля отправок в груженных вагонах с соблюдением сроков доставки		
	Приоритет	Действующие KPI	Действующие KPI	Приоритет

Рис. 5. Ключевые задачи подразделений в разрезе обеспечения качества услуг

Для выявления наибольших противоречий, возникающих при взаимодействии между подразделениями производственного блока, выполнен анализ процессной модели и выявлены показатели такого взаимодействия.

Таким образом, в качестве сквозных ключевых показателей эффективности выбраны:

- сводный индекс удовлетворенности клиентов;
- процент выполнения графика движения поездов;
- коэффициент использования пропускной способности;
- выполнение плана ремонтно-путевых работ;
- выполнение наряда-заказа в стоимостном эквиваленте;
- выручка;
- себестоимость.

Взаимодействие подразделений ОАО «РЖД»

1 ЦФТО	→	Перевозка грузов: <ul style="list-style-type: none"> · в соответствии с месячным планом; · в рамках долгосрочных договоров на комплексное транспортное обслуживание; · с использованием специализированных расписаний в графике движения поездов 	←	ЦД
2 ЦДИ	→	Содержание потребного парка локомотивных бригад: <ul style="list-style-type: none"> · на плановые объемы хозяйственных работ; · для производства работ на вагоноремонтных предприятиях ОАО «РЖД» 	←	ЦТ
3 ЦД	→	Реализация план-графика предоставления «окон» для текущего обслуживания, ремонта и модернизации инфраструктуры. Обеспечение: <ul style="list-style-type: none"> · параметров нормативного графика движения поездов; · потребной пропускной способности линий и участков железных дорог; · технической надежности инфраструктуры. Выполнение технологических нормативов по техническому содержанию и обслуживанию подвижного состава	←	ЦДИ
4 ЦД	→	Содержание потребного парка локомотивов и локомотивных бригад грузового движения на плановые объемы перевозок и спецманевровое движение по дирекциям приписки. Обеспечение качественных показателей использования локомотивов. Выполнение пробегных норм локомотивных бригад. Соблюдение плановых параметров пробегов между ТО и ТР	←	ЦТ

Для того чтобы перечисленные показатели мотивировали подразделения на достижение целевых результатов, необходимо выполнить декомпозицию и частичное каскадирование показателей верхнего уровня до уровня линейных предприятий. Декомпозиция и пооперационная детализация процессов позволяют оценить качество и конкурентоспособность компании на рынке транспортно-логистических услуг. Ключевые задачи управления предполагают выбор и формализацию показателей эффективности, позволяющих не просто документировать бизнес-процессы, но и анализировать и определять их структуру, определять необходимые для их реализации структуру и оценивать взаимодействие с окружающей средой. Таким образом, возникает необходимость в моделировании бизнес-процессов.

Эффективность дирекции управления движением оценивается не только качеством внутренних бизнес-процессов, но в том числе качеством деятельности других подразделений и уровнем координации и взаимодействия между ними. Поэтому можно считать, что ключевые показатели эффективности дирекции управления движением носят интегрированный характер и в большей степени соответствуют стратегическим целям развития ОАО «РЖД», сформулированных в долгосрочной программе развития.

При формировании системы взаимосвязанных ключевых показателей эффективности основной выступают стратегические цели развития ОАО «РЖД» и организация мониторинга их достижения.

Управление компанией требует целостного подхода к качеству и выбору ключевых показателей эффективности. Моделирование бизнес-процессов должно базироваться на стратегической цели и ключевых задачах компании и учитывать такие данные, как организационная структура, продукция,

риски, правила, уровень квалификации персонала, состояние внешней среды и корпоративная культура. Системный и процессный подход позволяют одновременно обеспечить целостность стратегического управления, ориентированного на достижение глобальной цели и целевых результатов дирекции по управлению движением, и оценить влияние каждого бизнес-процесса или подпроцесса, выполняемых взаимосвязанными подразделениями, хозяйствами и другими дирекциями компании.

Список литературы

1 Долгосрочная программа развития акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtX-Aga2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 17.03.2023).

2 Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года (Основные положения) : утверждена советом директоров ОАО «РЖД» [протокол от 23 декабря 2013 года № 19]. Москва, 2013. – URL: https://ar2021.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_strategy.pdf (дата обращения: 17.03.2023).

3 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения: 17.03.2023).

4 Техничко-технологические модели управления перевозочным процессом / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Максимова, Е. А. Лаханкин // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 7. – С. 23–27. – ISSN 2227-8397.

5 **Зобнин, В. Л.** Единый сетевой технологический процесс железнодорожных перевозок / В. Л. Зобнин, В. В. Панин, Е. С. Прокофьева // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 3. – С. 8–10. – ISSN 0044-4448.

6 **Парменгер, Д.** Ключевые показатели эффективности. Разработка, внедрение и применение решающих показателей / Д. Парменгер ; пер. с англ. А. Платова. – Москва : ЗАО «Олимп-Бизнес», 2009. – 288 с. – ISBN 978-5-9693-0106-1.

7 **Прокофьева, Е. С.** Единые принципы организации эксплуатационной работы железнодорожных перевозок / Е. С. Прокофьева, В. В. Панин // Мир транспорта. – 2019. – № 7. – С. 186–198. – ISSN 1992-3252.

8 **Сирина, Н. Ф.** Единый сетевой технологический процесс как фактор повышения качества транспортного обслуживания / Н. Ф. Сирина, В. Л. Герус // Транспорт и логистика: актуальные проблемы страте-

References

1 Long-term Development Program of the Joint-Stock Company "Russian Railways" until 2025 : Decree of the Government of the Russian Federation No. 466-r dated March 19, 2019. – URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtX-Aga2RXSVoKu.pdf> (date of access: 03/17/2023).

2 Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Main provisions): approved by the Board of Directors of JSC "Russian Railways" [Protocol No. 19 dated December 23, 2013]. Moscow, 2013. – URL: https://ar2021.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_strategy.pdf (date of access: 03/17/2023).

3 Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035: Decree of the Government of the Russian Federation of November 27, 2021. No. 3363-R. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (date of access: 03/17/2023).

4 Technical and technological models of transportation process management / A. F. Borodin, V. V. Panin, E. S. Maksimova, E. A. Lakhankin // Railway transport. – 2021. – No. 7. – P. 23–27. – ISSN 2227-8397.

5 **Zobnin, V. L.** Unified network technological process of railway transportation / V. L. Zobnin, V. V. Panin, E. S. Prokofieva // Railway transport. – 2020. – No. 3. – P. 8–10. – ISSN 0044-4448

6 **Parmenter, D.** Key performance indicators. Development, implementation and application of decisive indicators / D. Parmenter ; Trans. A. Platova. – Moscow : Olymp-Business CJSC, 2009. – 288 p. – ISBN 978-5-9693-0106-1.

7 **Prokofieva, E. S.** Uniform principles of the organization of operational work of railway transportation / E. S. Prokofieva, V. V. Panin // The world of transport. – 2019. – No. 7. – P. 186–198. – ISSN 1992-3252.

8 **Sirina, N. F.** Unified network technological process as a factor of improving the quality of transport services / N. F. Sirina, V. L. Gerus // Transport and Logistics: actual problems of

гического развития и оперативного управления : сборник трудов конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 219–222. – ISBN 978-5-907295-60-5.

9 **Сорокина, А. В.** Как повысить результативность оценки деятельности железных дорог ОАО «РЖД» / А. В. Сорокина, О. Ю. Трофимова // Транспортное дело России. – 2017. – № 4. – С. 68–71. – ISSN 2072-8689.

10 **Терешина, Н. П.** Организационно-экономический анализ состояния и перспектив развития компании железнодорожного транспорта как объекта стратегического управления / Н. П. Терешина, А. В. Сорокина // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 2. – С. 67–73. – ISSN 2074-9325.

11 **Терешина, Н. П.** Повышение эффективности управления развитием корпорации на основе формализации стратегических инициатив / Н. П. Терешина, А. В. Сорокина // Транспортное дело России. 2014. – № 1. – С. 78–80. – ISSN 2072-8689.

12 **Давыдов, А. В.** Методы и модели оценки эффективности транспортных бизнес-процессов / А. В. Давыдов, И. В. Паршуков // Вестник СибГУПС. – 2021. – № 3(58). – С. 33–39. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_58_33.

strategic development and operational management: proceedings of the conference. – Rostov-on-Don: RSTU, 2019. – P. 219–222. – ISBN 978-5-907295-60-5.

9 **Sorokina, A. V.** How to increase the effectiveness of evaluating the activities of railways of JSC "Russian Railways" / A. V. Sorokina, O. Yu. Trofimova // Transport business of Russia. – 2017. – No. 4. – P. 68–71. – ISSN 2072-8689.

10 **Tereshina, N. P.** Organizational and economic analysis of the state and prospects of development of the railway transport company as an object of strategic management / N. P. Tereshina, A. V. Sorokina // Science and Technology of Transport. – 2016. – No. 2. – P. 67–73. – ISSN 2074-9325.

11 **Tereshina, N. P.** Improving the efficiency of corporate development management based on the formalization of strategic initiatives / N. P. Tereshina, A. V. Sorokina // Transport business of Russia. – 2014. – No. 1. – P. 78–80. – ISSN 2072-8689.

12 **Davydov, A. V.** Methods and models for evaluating the effectiveness of transport business processes / A. V. Davydov, I. V. Parshukov // Bulletin of SibGUPS. – 2021. – No. 3(58). – P. 33–39. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_58_33.

N. F. Sirina, V. L. Gerus

ANALYSIS OF THE INTERACTION OF KEY PERFORMANCE INDICATORS WITH THE TARGET RESULTS OF THE COMPANY'S ACTIVITIES

Abstract. The paper presents the results of the key performance indicators` study in the context of strategic development and setting the target results of the company's activities. The content of the system of balanced indicators and key performance indicators is revealed as well as the specifics of the above indicators in the field of transport and logistics activities. Based on the analysis of the existing KPIs, the problems of interaction between the divisions of JSC "Russian Railways" during the transportation process have been identified and new end-to-end KPIs have been formulated that allow eliminating bottlenecks in the management of the Unified Network Technological Process. The activity of the traffic management directorate is defined as resulting in the management of the effectiveness of the end-to-end process. The requirements for modeling the business processes of JSC "Russian Railways" based on KPI management have been formulated.

Keywords: railway transport development strategy; transportation process management methodologies; transportation process efficiency; balanced scorecard; key performance indicators; Unified network technological process.

For citation: Sirina, N. F. Analysis of the interaction of key performance indicators with the target results of the company's activities / N. F. Sirina, V. L. Gerus // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 57–65. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_57.

Сведения об авторах**Сирина Нина Фридриховна**

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Вагоны»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: NSirina@usrurt.ru

Герус Владимир Леонидович

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Управление эксплуатационной
работой»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: vlgerus10@gmail.com

Information about the authors**Sirina Nina Friedrichovna**

Ural State University of Railway Transport (UrGUPS),
Chair «Wagons»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: NSirina@usrurt.ru

Gerus Vladimir Leonidovich

Ural State University of Railway Transport (UrGUPS),
Chair «Operational Work Management»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: vlgerus10@gmail.com

Г. М. Третьяков, Е. Е. Москвичева., Ю. П. Пацев

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА МАРШРУТОВ РЕГУЛЯРНОГО КОНТРЕЙЛЕРНОГО СООБЩЕНИЯ

Аннотация. Предложены методические принципы выбора маршрутов для организации регулярного контрейлерного сообщения, учитывающие особенности перевозок генеральных грузов автотранспортом. Для выявления наиболее востребованных полигонов железных дорог, на которых целесообразна организация контрейлерного сообщения, была проанализирована сеть автомобильных дорог и маршруты следования автомобильного транспорта, максимально соответствующие железнодорожным линиям. На основе анализа статистических данных были определены маршруты передвижения автопоездов и регионы с наибольшей частотой их присутствия. Выявлены направления наиболее интенсивной загрузки федеральных автомобильных трасс автопоездами. Дана оценка технико-технологическим возможностям железнодорожной инфраструктуры, а также готовности терминально-логистических объектов к организации регулярного контрейлерного сообщения. В результате исследования были определены основные маршруты для организации регулярного контрейлерного сообщения с учётом специфики организации данных перевозок и взаимодействия с инфраструктурой автомобильного транспорта. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования системы организации контрейлерного сервиса на сети российских железных дорог, в том числе для определения его ключевых потребителей.

Ключевые слова: контрейлерная перевозка, контрейлерные поезда, контрейлерный терминал, автопоезд, контрейлерные технологии.

Для цитирования: Третьяков, Г. М. Методические принципы выбора маршрутов регулярного контрейлерного сообщения / Г. М. Третьяков, Е. Е. Москвичева, Ю. П. Пацев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 66–73. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_66.

Введение

Для любой страны мира основным элементом производственной и социальной сфер является транспорт. В России развитость транспортных коммуникаций с учетом большой площади имеет важное значение в объединении агломераций. Развитие транспортного комплекса определяет уровень экономического роста страны, повышает конкурентоспособность национальной экономики и качество жизни населения [1].

Добиться намеченных целей возможно за счет реализации контрейлерных технологий, что коррелирует с приоритетными направлениями развития транспортной отрасли, изложенными в Транспортной стратегии Российской Федерации в части увеличения объемов мультимодальных перевозок [2].

Определение генеральных направлений перевозки грузов с применением интермодальных технологий, позволяющих повысить уровень экономических, социальных, экологических показателей страны, является важным вектором развития транспортных систем [3, 4]. Планомерное развитие и долгосрочное функционирование контрейлерных перевозок невозможно без учета значительного количества факторов. Определяющим для организации такого вида перевозок является прогнозное значение потенциальных потребителей данной услуги и выбор основных маршрутов регулярного сообщения.

Основная часть

Для обоснования и выбора маршрутов, на которых наиболее целесообразно организовывать контрейлерное сообщение, предлагается решить следующие задачи:

- 1) изучить особенности организации перевозок автотранспортом генеральных грузов;
- 2) определить основные маршруты движения автотранспорта по федеральным трассам;
- 3) проанализировать направления движения грузового автотранспорта, выделить из них наиболее загруженные;
- 4) оценить возможность организации доставки груза по параллельным путям железной дороги;
- 5) выбрать наиболее перспективные маршруты для организации регулярного контрейлерного сообщения;

б) проанализировать техническую и технологическую возможность осуществления контрейлерных перевозок по выбранным направлениям;

7) проанализировать готовность инфраструктуры терминально-логистических объектов для организации контрейлерного сообщения на выбранных направлениях;

8) дать оценку соответствия выбранных маршрутов курсирования контрейлерных поездов федеральному проекту «Транспортно-логистические центры».

Формирование основной характеристики потенциального грузопотока, нацеленного на освоение железнодорожным транспортом, основано на изучении принципов организации перевозок генеральных грузов автомобильным транспортом [5, 6]. Организация перевозок таких грузов имеет некоторые особенности и предполагает несколько вариантов взаимодействия сторон – участников перевозочного процесса. Один из самых распространенных вариантов взаимодействия включает в себя заключение договора перевозки между автотранспортной компанией и промышленным или торговым предприятием на осуществление доставки груза непосредственно со склада отправителя на склад получателя.

Другой вариант взаимодействия отличается от предыдущего тем, что автотранспортная компания может иметь в собственности или в соответствии с договором аренды склады, где осуществляется консолидация и накопление партий грузов с последующей доставкой их на подобный склад в пункте назначения либо непосредственно на склад получателя в соответствии с договором перевозки [7–9]. Данная характеристика дает представление о местах зарождения и погашения основных грузопотоков.

С целью анализа и оценки перевозок грузов автомобильным транспортом было проведено исследование деятельности автотранспортных компаний, осуществляющих доставку груза по всей территории Российской Федерации. В процессе исследования были выявлены наиболее крупные компании, имеющие в своем распоряжении парк автотранспортных средств в количестве от 500 единиц и более.

Для выявления наиболее востребованных полигонов железных дорог, на которых целесообразна организация контрейлерного сообщения, была проанализирована сеть автомобильных дорог и маршруты следования автомобильного транспорта, максимально соответствующие железнодорожным линиям. Для этого были проанализированы статистические данные крупной автотранспортной компании за шесть месяцев работы: заявки грузоотправителей, комплекты перевозочных документов, путевые листы, а также данные, полученные с GPS-трекеров, установленных на автомобилях, и позволяющие отследить передвижение автотранспорта.

В результате обработки массивов информации были определены маршруты передвижения автотрасс и регионы с наибольшей частотой их присутствия. Регионы, участвующие в формировании логистических цепочек, сгруппированы по федеральным округам. Диаграмма частоты присутствия автотрасс в регионах по федеральным округам за два квартала 2022 года представлена на рис. 1.

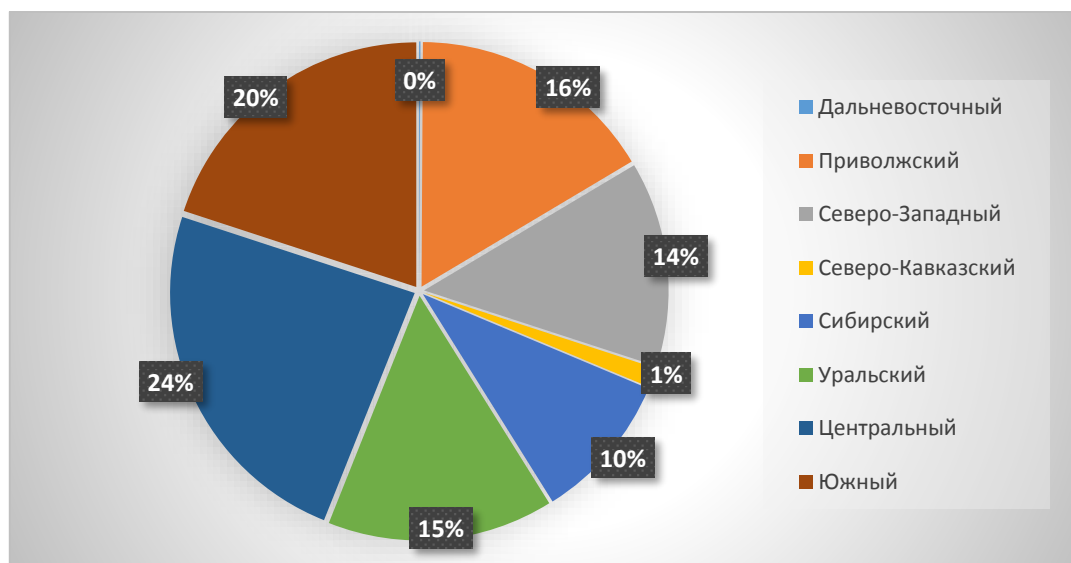


Рис. 1. Частота присутствия автопоездов в регионах по федеральным округам

Анализ представленной диаграммы показывает, что наиболее загруженными направлениями перевозки грузов автопоездами являются направления, связующие центральную часть страны с Северо-Западным, Южным регионами, а также Уралом. Направления наиболее интенсивной загрузки федеральных автомобильных трасс представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Направления наиболее интенсивной загрузки федеральных автомобильных трасс

Направление	Транзитные пункты
Московский регион – Южный федеральный округ	Воронеж, Волгоград, Астрахань, Ростов-на-Дону, Краснодар, Новороссийск
Московский регион – Приволжский федеральный округ	Нижний Новгород, Казань, Саратов, Самара
Московский регион – Уральский и Сибирский федеральные округа	Екатеринбург, Челябинск, Омск, Новосибирск
Московский регион – Северо-Западный федеральный округ	Санкт-Петербург, Архангельск, Петрозаводск

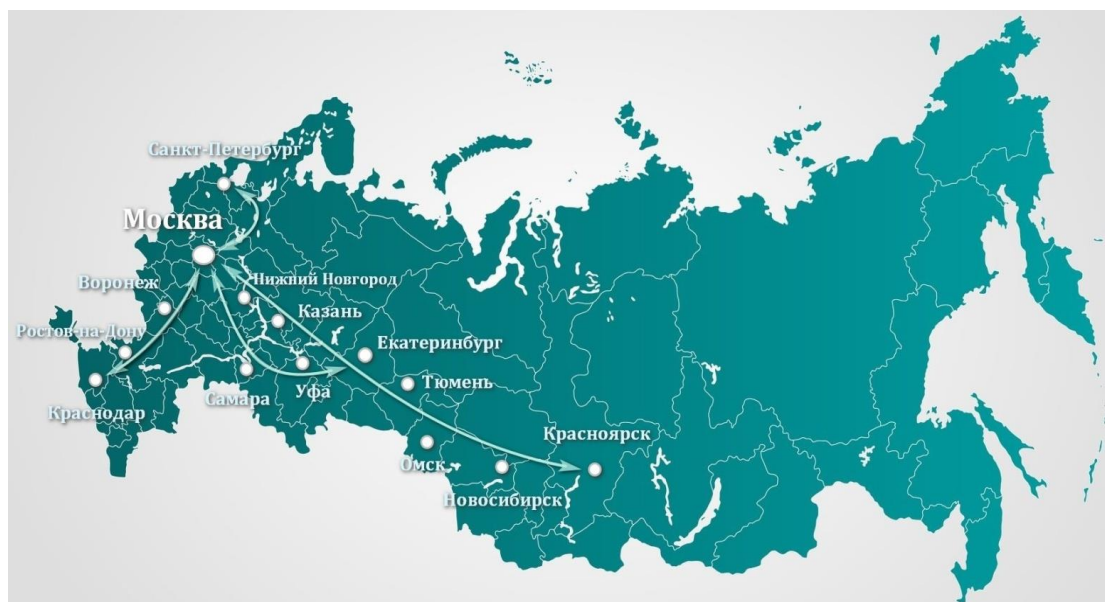


Рис. 2. Основные направления движения автопоездов

Проведенное исследование основных направлений перевозки грузов автотранспортом позволяет определить характеристики грузопотока для освоения железнодорожным транспортом наиболее перспективных полигонов курсирования контрейлерных поездов.

Важным аспектом определения условий формирования и пропуска контрейлерных поездов является готовность инфраструктуры железнодорожного транспорта с точки зрения технических и технологических возможностей организации такого вида перевозок [10–14]. При этом необходимо учитывать типы специализированного подвижного состава, используемого для перевозки контрейлеров, так как основными ограничениями являются габаритная характеристика инфраструктуры железнодорожного транспорта и техническая оснащенность терминально-логистических объектов [15–18].

Рассмотрим первое условие – ограничение габаритной характеристики объектов железнодорожной инфраструктуры. При организации несопровождаемой перевозки использование контрейлерной платформы колодезного типа модели 13-6987 позволяет размещать трейлер в очертании основного габарита погрузки, что снимает какие-либо ограничения при проектировании маршрутов движения вагонов с трейлерами в составе поезда. Специализированная платформа 13-9961, используемая для организации сопровождаемой контрейлерной перевозки, имеет высоту пола от головок рельсов 1100 мм и при размещении автопоезда (трейлера) на такой платформе его верхняя угловая часть в точке, максимально удаленной от вертикальной оси, выступает на 680 мм за основной габарит погрузки. В таком случае груз относится к сверхгабаритным. Для перевозки такого вида грузов на пространстве

1520 мм, применяют особые условия, установленные ДЧ-1835 «Инструкция по перевозке негабаритных и тяжеловесных грузов на железных дорогах государств – участников СНГ, Латвийской Республики, Литовской Республики, Эстонской Республики» [19]. Согласно данной инструкции, организация перевозки сверхнегабаритных грузов сопряжена с проведением определенных процедур. Требуется согласование возможности, способа и условий перевозки с администрациями железных дорог, разработка документации, чертежей погрузки, определение способов размещения и крепления груза. В результате должен быть сформирован поезд с контрольной рамой и вагонами прикрытия, а также обеспечено сопровождение представителей причастных служб. Перемещаться такой поезд будет с отдельным локомотивом с ограничением скорости. Данные процедуры приведут к увеличению времени следования контрейлерного поезда и соответственно повышению дополнительных эксплуатационных расходов. Инструкция ДЧ-1835 устанавливает особые условия для разовых перевозок, а организация контрейлерного сообщения предполагает регулярный характер.

Специалистами ОАО «ВНИИЖДТ» были проведены исследования и найдены решения по устранению сдерживающего фактора организации контрейлерных перевозок в виде соблюдения особых условий движения контрейлерных поездов. Сотрудниками научно-исследовательского института был проведен ряд испытаний, в результате которых ученые пришли к выводу, что следует исключить необходимость применения особых условий. В результате было предложено ввести в действие разработанный норматив – контрейлерный габарит погрузки. При размещении на платформе автопоездов, автоприцепов, автомобилей, полуприцепов и съемных автомобильных кузовов с соблюдением контрейлерного габарита погрузки, допускается пропуск контрейлерных поездов без применения особых условий [20].

На основании результатов исследования Министерством транспорта РФ был утвержден габарит контрейлерных перевозок на открытом подвижном составе, представленный в проекте новой редакции Технических условий размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах.

На заседании Правительственной комиссии по транспорту (Красноярск, 2016 г.), определены маршруты курсирования контрейлерных поездов: Москва – Новороссийск – Москва, Москва – Екатеринбург – Москва. Впоследствии последний маршрут продлили до Новосибирска.

В настоящем исследовании были определены основные маршруты курсирования контрейлерных поездов с учетом инфраструктурных возможностей использования специализированных контрейлерных платформ различных типов (для возможности организации как сопровождаемой, так и несопровождаемой контрейлерной перевозки), а также наиболее загруженные участки федеральных автомобильных трасс, соответствующие маршрутам железнодорожных путей сообщения. Возможность организации сопровождаемой контрейлерной перевозки обеспечивает расширение перечня транспортно-логистических услуг, предоставляемых железнодорожным транспортом, и наиболее полно отвечает принципам клиентоориентированности. В качестве основных маршрутов выбраны следующие направления:

- 1 Москва – Нижний Новгород – Казань – Екатеринбург – Новосибирск;
- 2 Москва – Воронеж – Ростов-на-Дону – Краснодар – Новороссийск;
- 3 Москва – Самара – Уфа – Челябинск – Екатеринбург;
- 4 Санкт Петербург – Москва – Волгоград – Астрахань.

Маршрут Санкт Петербург – Москва – Волгоград – Астрахань был выбран, а маршрут Москва – Санкт-Петербург – Калининград исключен в связи с кардинальным перестроением направлений перевозок с портов Балтийского бассейна к портам Азово-Черноморского бассейна.

Вторым условием является обеспеченность терминально-логистических объектов требуемым техническим оснащением, позволяющим выполнять погрузочно-разгрузочные работы с автопоездами (трейлерами).

В соответствии с Комплексным планом модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года, включающим в себя проект «Транспортно-логистические центры», сформирована опорная сеть узловых грузовых мультимодальных транспортно-логистических центров (ТЛЦ). В Центральном федеральном округе четыре ТЛЦ, по три ТЛЦ в Северо-Западном, Приволжском и Южном федеральных округах, по два – в Дальневосточном, Уральском и Сибирском федеральных округах. Все они включены в расписание регулярных интермодальных и скоростных грузовых поездов. В соответствии со структурно-планировочными требованиями, ТЛЦ, выделенные в рамках Федерального проекта «ТЛЦ», имеют техническую и технологическую возможность обеспечения контрейлерных перевозок [3].

В табл. 2 представлены основные зоны притяжения ТЛЦ по выбранным направлениям организации контрейлерных поездов.

Таблица 2

**Готовность терминально-логистической инфраструктуры
к организации регулярного контейнерного сообщения на выбранных маршрутах**

Маршрут	ФО	Регион	ТЛЦ
Москва – Нижний Новгород – Казань – Екатеринбург – Новосибирск	Центральный	Московская область	Белый Раст, Восточный, Ховрино, Ворсино
	Приволжский	Нижегородская область, Республика Татарстан	Доскино, Свияжск
	Уральский	Челябинская область, Свердловская область	Седельниково, Уральский
	Сибирский	Новосибирская область	Сибирский, Клещиха
Москва – Воронеж – Ростов-на-Дону – Краснодар – Новороссийск	Центральный	Московская область	Белый Раст, Восточный, Ховрино, Ворсино
	Южный	Ростовская область, Краснодарский край	Донской, Таманский, Пашковский
Москва – Самара – Уфа – Челябинск – Екатеринбург	Центральный	Московская область	Белый Раст, Восточный, Ховрино, Ворсино
	Приволжский	Самарская область, Республика Башкортостан	Самарский
	Уральский	Челябинская область, Свердловская область	Уральский, Седельниково
Санкт Петербург – Москва – Волгоград – Астрахань	Северо-Западный	Ленинградская область,	Бронка, Шушары
	Центральный	Московская область	Белый Раст, Восточный, Ховрино, Ворсино
	Южный	Астраханская область	Порт Оля

Выводы

Таким образом, в исследовании определены основные маршруты для организации регулярного контейнерного сообщения с учётом специфики организации данных перевозок и взаимодействия с инфраструктурой автомобильного транспорта, а также с выделением опорной сети терминально-логистических объектов. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования системной организации контейнерного сервиса на сети российских железных дорог, в том числе для определения его ключевых потребителей.

Список литературы

1 Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (дата обращения: 10.08.2023).

References

1 Transport strategy of the Russian Federal until 2030 with a forecast for the period up to 2035 : approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r. – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (date of access: 08/10/2023).

2 Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2018 г. № 2101-р. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/16926> (дата обращения: 17.08.2023).

3 Концепция создания терминально-логистических центров на территории Российской Федерации. – Москва, 2012. – 79 с. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/10127> (дата обращения: 21.08.2023).

4 Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 год (с изменениями на 13 октября 2022 года) : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 года N 466-р. – URL: <https://base.garant.ru/72200764/> (дата обращения: 23.08.2023).

5 Методы логистики как фактор эффективности управления / Л. Б. Миротин, В. В. Багинова, Л. С. Федоров [и др.] // Конкурентоспособность в глобальном мире : экономика, наука, технологии. – 2017. – № 2–3(31). – С. 91–98. – EDN YROHRP.

6 **Пацев, Ю. П.** Разработка экономико-математической модели для оценки целесообразности организации контейнерных поездов / Ю. П. Пацев // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 2 (86). – С. 66–73. – EDN SASVZE.

7 **Апатцев, В. И.** Обоснование новых форм транспортно-экспедиционного обслуживания грузовладельцев / В. И. Апатцев, И. М. Басыров // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 2. – С. 44–51. – EDN YSPHWD.

8 **Апатцев, В. И.** К вопросу проектирования транспортно-логистических систем / В. И. Апатцев, С. Ю. Елисеев // Наука и техника транспорта. – 2013. – № 1. – С. 47–52. – EDN QBMVCR.

9 **Резер, С. М.** Логистические центры как организационная основа новых форм взаимодействия / С. М. Резер // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 6. – С. 44–47. – ISSN 0044-4448.

10 **Резер, С. М.** Оптимизация модели формирования и функционирования контейнерно-транспортной системы страны / С. М. Резер, О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2016. – № 7. – С. 3–7. – EDN WFSODR.

11 **Москвичев, О. В.** Обзор российского и зарубежного опыта методических разработок в области развития контейнерных перевозок /

2 Comprehensive plan for the modernization and expansion of the main infrastructure for the period up to 2024 : approved by the order of the Government of the Russian Federation dated September 30, 2018 No. 2101-r. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/16926> (date of access: 08/17/2023).

3 The concept of creating terminal and logistics centers on the territory of the Russian Federation. – Moscow, 2012. – 79 p. – URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/10127> (date of access: 08/21/2023).

4 Long-term development program of the open joint-stock company «Russian Railways» until 2025 (as amended as of October 13, 2022) : approved by the order of the Government of the Russian Federation of March 19, 2019 N 466-r. – URL: <https://base.garant.ru/72200764/> (date of access: 08/23/2023).

5 Methods of logistics as a factor in management efficiency / L. B. Mirotin, V. V. Baginova, L. S. Fedorov [et al.] // Competitiveness in the global world : economics, science, technology. – 2017. – No. 2–3(31). – P. 91–98. – EDN YROHRP.

6 **Patsev, Yu. P.** Development of an economic and mathematical model for assessing the feasibility of organizing piggyback trains / Yu. P. Patsev // Bulletin of Transport of the Volga Region. – 2021. – No. 2 (86). – P. 66–73. – EDN SASVZE.

7 **Apattsev, V. I.** Substantiation of new forms of freight forwarding services for cargo owners / V. I. Apattsev, I. M. Basyrov // Science and technology of transport. – 2017. – No. 2. – P. 44–51. – EDN YSPHWD.

8 **Apattsev, V. I.** On the issue of designing transport and logistics systems / V. I. Apattsev, S. Yu. Eliseev // Science and technology of transport. – 2013. – No. 1. – P. 47–52. – EDN QBMVCR

9 **Rezer, S. M.** Logistics centers as an organizational basis for new forms of interaction / S. M. Rezer // Zheleznodorozhny transport. – 2007. – No. 6. – P. 44–47. – ISSN 0044-4448.

10 **Rezer, S. M.** Optimization of the model of formation and functioning of the container transport system of the country / S. M. Rezer, O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva // Transport: science, technology, management. Scientific information collection. – 2016. – No. 7. – P. 3–7. – EDN WFSODR.

11 **Moskvichev, O. V.** Review of Russian and foreign experience of methodological developments in the field of container transportation development /

О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева, Д. В. Васильев // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 1(79). – С. 77–86. – EDN EADDOO.

12 **Кочнева, Д. И.** Повышение эффективности организации работ на контейнерном терминале / Д. И. Кочнева, В. М. Сай // Транспорт Урала. – 2011. – № 4(31). – С. 52–57. – EDN OOMTUZ.

13 **Багинова, В. В.** Особенности развития контейнерных перевозок в России / В. В. Багинова, Д. В. Кузьмин // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2013. – Т. 3. – № 2. – С. 049–052. – EDN ROXXWF.

14 **Мамаев, Э. А.** Формирование и развитие отечественных контейнерных технологий / Э. А. Мамаев, М. Ю. Скорченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1(73). – С. 87–93. – EDN QSCUKF.

15 **Кузьмин, Д. В.** Организация работы инфраструктуры контейнерных перевозок / Д. В. Кузьмин, В. В. Багинова. – Москва : КНОРУС, 2018. – 122 с. – ISBN 978-5-4365-2584-6. – EDN LWCZSQ.

16 **Шапкин, А. С.** Выбор технико-технологических параметров системы контейнерных перевозок на железнодорожных направлениях сети: специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шапкин Андрей Сергеевич. – Москва, 2005. – 24 с. – EDN NIHZQP.

17 **Куренков, П. В.** Нормативно-правовое регулирование в области развития контейнерных перевозок / П. В. Куренков, А. Ф. Котляренко, М. В. Кизимиров // Рынок транспортных услуг (проблемы повышения эффективности). – 2011. – № 4. – С. 223–230. – EDN YNRCYX.

18 **Цыганов, А. В.** Система параметров подвижного состава интермодальной контейнерной технологии / А. В. Цыганов, Н. А. Осинцев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2020. – Т. 17. – № 2(72). – С. 262–272. – DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-2-262-272.

19 ДЧ-1835. Инструкция по перевозке негабаритных и тяжеловесных грузов на железных дорогах государств – участников СНГ, Латвийской Республики, Литовской Республики, Эстонской Республики / под редакцией Л. М. Мошек. – Москва : Желдоркнига, 2001. – 192 с. – ISBN 5-94156-006-0.

20 Контейнерный габарит погрузки, проблемы и процесс внедрения / Ю. М. Лазаренко, Д. Н. Аршинцев, А. В. Заверталюк [и др.] // Вестник научно-исследовательского института

O. V. Moskvichev, E. E. Moskvicheva, D. V. Vasiliev // Bulletin of transport of the Volga region. – 2020. – No. 1(79). – P. 77–86. – EDN EADDOO.

12 **Kochneva, D. I.** Improving the efficiency of the organization of work at the container terminal / D. I. Kochneva, V. M. Say // Transport of the Urals. – 2011. – No. 4(31). – P. 52–57. – EDN OOMTUZ.

13 **Baginova, V. V.** Peculiarities of development of piggyback transportation in Russia / V. V. Baginova, D. V. Kuzmin // Modern problems of the transport complex of Russia. – 2013. – Vol. 3. – No. 2. – P. 049–052. – EDN ROXXWF.

14 **Mamaev, E. A.** Formation and development of domestic piggyback technologies / E. A. Mamaev, M. Yu. Skorchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 1(73). – P. 87–93. – EDN QSCUKF.

15 **Kuzmin, D. V.** Organization of piggyback transportation infrastructure / D. V. Kuzmin, V. V. Baginova. – Moscow : KNORUS, 2018. – 122 p. – ISBN 978-5-4365-2584-6. – EDN LWCZSQ.

16 **Shapkin, A. S.** Choice of technical and technological parameters of the piggyback transportation system on the railway lines of the network: specialty 05.22.08 «Management of transportation processes»: abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Shapkin Andrey Sergeevich. – Moscow, 2005. – 24 p. – EDN NIHZQP.

17 **Kurenkov, P. V.** Regulatory and legal regulation in the field of development of piggyback transportation / P. V. Kurenkov, A. F. Kotlyarenko, M. V. Kizimirov // Market of transport services (problems of increasing efficiency). – 2011. – No. 4. – P. 223–230. – EDN YNRCYX.

18 **Tsyganov, A. V.** System of rolling stock parameters of intermodal piggyback technology / A. V. Tsyganov, N. A. Osintsev // Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University. – 2020. – T. 17. – No. 2(72). – P. 262–272. – DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-2-262-272.

19 DCH-1835. Instructions for the transportation of oversized and heavy cargo on the railways of the CIS member states, the Republic of Latvia, the Republic of Lithuania, the Republic of Estonia / ed. L. M. Moshek. – Moscow : Zheldorkniga, 2001. – 192 p. – ISBN 5-94156-006-0.

20 Conrailer loading gauge, problems and implementation process / Yu. M. Lazarenko, D. N. Arshintsev, A. V. Zavertalyuk [et al.] // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway

железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76.
– № 1. – С. 31–37. – ISSN 2223-9731.

Transport. – 2017. – Vol. 76. – No. 1. – P. 31–37. –
ISSN 2223-9731.

G. M. Tretyakov, E. E. Moskvicheva., Yu. P. Patsev

METHODOLOGICAL PRINCIPLES FOR SELECTING ROUTES FOR REGULAR CONTRAILER SERVICES

Abstract. Methodological principles for choosing routes for organizing regular contrailer services are proposed using the peculiarities of transporting general cargo by road. To identify the most popular railway sites where it is advisable to organize contrailer services, the network of highways and vehicle routes that best correspond to the railway lines were analyzed. Based on the analysis of statistical data, the routes of road trains and the regions with the highest frequency of their presence were determined. The directions of the most intensive loading of federal highways by road trains have been identified. An assessment is made of the technical and technological capabilities of the railway infrastructure, as well as the readiness of terminal and logistics facilities to organize regular contrailer services. As a result, the main routes for organizing regular contrailer services were identified, to provide the specifics of organizing these transportations and interaction with the road transport infrastructure. The results obtained can be used to substantiate the systematic organization of contrailer services on the Russian railway network, including its key consumers.

Keywords: contrailer services, contrailer trains, contrailer terminal, road train, contrailer technologies.

For citation: Tretyakov, G. M. Methodological principles for selecting routes for regular contrailer services / G. M. Tretyakov, E. E. Moskvicheva, Yu. P. Patsev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 66–73. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_66.

Сведения об авторах

Третьяков Геннадий Михайлович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: moskvichevalena@yandex.ru

Москвичева Елена Евгеньевна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: moskvichevalena@yandex.ru

Пацев Юрий Павлович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы»,
старший преподаватель,
e-mail: patsev@list.ru

Information about authors

Tretyakov Gennady Mikhailovich

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Technologies of Cargo and Commercial Work, Stations and Junctions»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: moskvichevalena@yandex.ru

Moskvicheva Elena Evgenevna

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Technologies of Cargo and Commercial Work, Stations and Junctions»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: moskvichevalena@yandex.ru

Patsev Yuriy Pavlovich

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Technologies of Cargo and Commercial Work, Stations and Junctions»,
Senior Lecturer,
e-mail: patsev@list.ru

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

УДК 621.37/.39.001.5 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_74

*И. О. Нечес, Н. Д. Пирогова***АНАЛИЗ ПРОХОЖДЕНИЯ ИМПУЛЬСНО-МАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ
ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА**

Аннотация. Выполнен анализ прохождения сигнала со сложной двоичной амплитудной манипуляцией через нелинейный частотно-селективный усилитель. Получены выражения для спектра амплитудно-манипулированного сигнала. Записаны формулы для основных гармоник выходного сигнала в виде отрезков функциональных рядов Вольтерра. Проведено компьютерное моделирование схемы входного усилительного устройства приемника радиостанции Motorola GP300 с помощью методов численного интегрирования и функциональных рядов Вольтерра. Получен спектр и временная функция выходного сигнала при различных параметрах частот и амплитуд манипулированного сигнала. Оценена вероятность ошибки в зависимости от частоты огибающей амплитудно-манипулированного сигнала. Выполнен анализ коэффициента усиления и исследовано влияние амплитуды сигнала на степень искажения информации при прохождении через усилитель.

Ключевые слова: амплитудно-манипулированный сигнал, спектр сигнала, функциональные ряды Вольтерра, нелинейный частотно-селективный усилитель, вероятность ошибок, амплитудная характеристика, коэффициент усиления, компьютерное моделирование.

Для цитирования: Нечес, И. О. Анализ прохождения импульсно-манипулированных сигналов через нелинейные частотно-селективные устройства / И. О. Нечес, Н. Д. Пирогова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 74–83. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_74.

Введение

В настоящее время в телекоммуникационных системах широко используются различные виды импульсно-манипулированных сигналов. Применение импульсных сигналов обеспечивает большую эффективность радиопередачи, а также способствует повышению помехоустойчивости связи, характерной для цифровой обработки сигналов. Кроме того, использование импульсных сигналов позволяет повысить разрешающую способность радиолокационных систем. В технике связи широкое распространение получила амплитудная манипуляция, которая требует минимальной ширины полосы пропускания канала связи. Амплитудная манипуляция (АМп) нашла применение в оптических каналах связи, радиотелеграфии и в системах передачи дискретных сообщений. Устройства для реализации амплитудной манипуляции просты и недороги. Используются формы АМп-сигнала при передаче нескольких символов, каждому из которых соответствует индивидуальная амплитуда несущей частоты при постоянной длительности интервалов посылки. Естественно, что при передаче данных частотный диапазон канала ограничивается значимой частью спектра, ширина которого устанавливается по допустимой степени искажения приемных сигналов. Степень искажения сигналов существенно зависит от длительности посылок [1].

В литературе хорошо освещены вопросы применения манипуляции On-Off Keying с амплитудой, которая принимает значение A при единичном значении информационного сигнала и 0 – при нулевом значении. Вопросы прохождения сложных импульсно-манипулированных сигналов, когда применяются произвольные амплитуды, рассматриваются значительно реже. Такая амплитудная манипуляция подразумевает, что для передачи «0» и «1» применяются разные уровни несущего сигнала по напряжению. Например, передаче «0» будет соответствовать 5 В, а «1» – 1 В. При этом частота и фаза несущего сигнала остаются постоянными. Такой вид модуляции называется двоичной АМп или BASK (Binary Amplitude Shift Keying) [2]. В данной работе будет выполнен анализ прохождения сигнала со сложной двоичной АМп через нелинейные частотно-селективные устройства. Данная задача является

актуальной, так как полоса пропускания цепи, частоты несущей и огибающей АМп-сигнала, а также его амплитуда являются определяющими в оценке искажения передачи дискретных сообщений.

Основная часть

АМп-сигнал представляет собой последовательность радиоимпульсов с прямоугольной огибающей. Пусть модулирующий сигнал ВASK имеет вид

$$V(t) = \begin{cases} V_1(t) = U_1, & 0 \leq t < \frac{\tau_n}{2} \\ V_2(t) = U_2, & \frac{\tau_n}{2} \leq t < \tau_n \\ V_2(t) = 0, & t \geq \tau_n, \end{cases}$$

где U_1 – нормированная амплитуда высокого уровня (уровня «1»), равная доле от амплитуды несущего колебания (часто принимают равной 1); U_2 – нормированная амплитуда низкого уровня (уровня «0»), равная обычно 0,2–0,3 от амплитуды несущего колебания (см. пример анализа); τ_n – длительность импульса.

Найдём спектральную плотность модулирующего сигнала $V(t)$:

$$V(j\omega) = U_1 \int_0^{\frac{\tau_n}{2}} e^{-j\omega t} dt + U_2 \int_{\frac{\tau_n}{2}}^{\tau_n} e^{-j\omega t} dt.$$

В результате несложных преобразований получим

$$V(j\omega) = \frac{1}{\omega} \left((U_1 - U_2) \sin \frac{\omega \tau_n}{2} + U_2 \sin \omega \tau_n \right) + j \frac{1}{\omega} \left(-U_1 + (U_1 - U_2) \cos \frac{\omega \tau_n}{2} + U_2 \cos \omega \tau_n \right).$$

Модуль спектральной плотности модулирующей функции

$$|V(j\omega)| = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left((U_1 - U_2) \sin \frac{\omega \tau_n}{2} + U_2 \sin \omega \tau_n \right)^2 + \left(-U_1 + (U_1 - U_2) \cos \frac{\omega \tau_n}{2} + U_2 \cos \omega \tau_n \right)^2}.$$

Фаза спектральной плотности модулирующей функции

$$\varphi(\omega) = \arg(V(j\omega)) = \arctg \frac{-U_1 + (U_1 - U_2) \cos \frac{\omega \tau_n}{2} + U_2 \cos \omega \tau_n}{(U_1 - U_2) \sin \frac{\omega \tau_n}{2} + U_2 \sin \omega \tau_n}.$$

Представим модулирующий сигнал $V(t)$ в виде ряда Фурье:

$$V(t) = C_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\Omega t + \varphi_n),$$

где Ω , φ_n – амплитуда и круговая частота модулирующего сигнала, n – номер гармоники.

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{\tau_n}{2}} U_1 dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{\tau_n}{2}}^{\tau_n} U_2 dt = \frac{\tau_n}{2T} (U_1 + U_2),$$

$$C_n = \frac{1}{Tn\Omega} \sqrt{\left((U_1 - U_2) \sin \frac{n\Omega\tau_n}{2} + U_2 \sin n\Omega\tau_n \right)^2 + \left(-U_1 + (U_1 - U_2) \cos \frac{n\Omega\tau_n}{2} + U_2 \cos n\Omega\tau_n \right)^2},$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{-U_1 + (U_1 - U_2) \cos \frac{n\Omega\tau_n}{2} + U_2 \cos n\Omega\tau_n}{(U_1 - U_2) \sin \frac{n\Omega\tau_n}{2} + U_2 \sin n\Omega\tau_n},$$

где T – период модулирующего сигнала.

АМп-сигнал BASK имеет вид

$$S(t) = U_n V(t) \cos(\omega_n t + \varphi_0), \quad (1)$$

где U_n , ω_n , φ_0 – амплитуда, круговая частота и фаза несущего колебания.

Данный сигнал также может быть представлен в виде ряда Фурье:

$$S(t) = U_n \left(C_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\Omega t + \varphi_n) \right) \cos(\omega_n t + \varphi_0) =$$

$$= U_n C_0 \cos(\omega_n t + \varphi_0) + U_n \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left[\cos((\omega_n + n\Omega)t + \varphi_0 + \varphi_n) + \cos((\omega_n - n\Omega)t + \varphi_0 - \varphi_n) \right]. \quad (2)$$

В настоящее время для анализа нелинейных радиотехнических цепей широко используются методы на основе функциональных рядов Вольтерра (ФРВ), позволяющие установить аналитическую зависимость между входным и выходным сигналом и получить выражения для расчета различных нелинейных эффектов в этих цепях [3, 4].

Комплексную амплитуду гармоники несущей на выходе нелинейного усилительного устройства при воздействии сигнала с двоичной АМп (2) можно записать в виде отрезка функционального ряда Вольтерра:

$$\dot{Y}_n(\omega_n) = H_1(\omega_n) \dot{U}_n C_0 + \frac{3}{4} H_3(2\omega_n, -\omega_n) |\dot{U}_n C_0|^2 \dot{U}_n C_0 + \frac{3}{2} H_3(\omega_n, \omega_n - \Omega, -\omega_n + \Omega) \times$$

$$\times |\dot{U}_n \dot{C}_{-1}|^2 \dot{U}_n C_0 + \frac{3}{2} H_3(\omega_n, \omega_n + \Omega, -\omega_n - \Omega) |\dot{U}_n \dot{C}_1|^2 \dot{U}_n C_0 + \frac{5}{8} H_5(3\omega_n, -2\omega_n) |\dot{U}_n C_0|^4 \dot{U}_n C_0 +$$

$$+ \frac{15}{4} H_5(2\omega_n, -\omega_n, \omega_n - \Omega, -\omega_n + \Omega) |\dot{U}_n C_0|^2 |\dot{U}_n \dot{C}_{-1}|^2 \dot{U}_n C_0 +$$

$$+ \frac{15}{4} H_5(2\omega_n, -\omega_n, \omega_n + \Omega, -\omega_n - \Omega) |\dot{U}_n C_0|^2 |\dot{U}_n \dot{C}_1|^2 \dot{U}_n C_0 + \dots, \quad (3)$$

где $\dot{U}_n = U_n \exp j\varphi_n$; $\dot{C}_n = \frac{C_n}{2} \exp j\varphi_n$ – коэффициент комплексного ряда Фурье; $H_n(\omega_1, \dots, \omega_n)$ – изображение ядра Вольтерра в частотной области n -го порядка, комплексная величина, определить которую можно в соответствии с методом [4].

Запишем комплексную амплитуду гармоники с частотой, равной суммарной частоте несущей и огибающей на выходе нелинейного усилительного устройства в виде отрезка ФРВ:

$$\dot{Y}(\omega_n + \Omega) = H_1(\omega_n + \Omega) \dot{U}_n \dot{C}_1 + \frac{3}{4} H_3(2(\omega_n + \Omega), -\omega_n - \Omega) |\dot{U}_n \dot{C}_1|^2 \dot{U}_n \dot{C}_1 + \frac{3}{2} H_3(\omega_n, \omega_n + \Omega, -\omega_n) \times$$

$$\times |\dot{U}_n C_0|^2 \dot{U}_n \dot{C}_1 + \frac{3}{2} H_3(\omega_n - \Omega, \omega_n + \Omega, -\omega_n + \Omega) |\dot{U}_n \dot{C}_{-1}|^2 \dot{U}_n \dot{C}_1 + \frac{5}{8} H_5(3(\omega_n + \Omega), -2(\omega_n + \Omega)) \times$$

$$\times |\dot{U}_H \dot{C}_1|^4 \dot{U}_H \dot{C}_1 + \frac{15}{4} H_5 (2(\omega_H + \Omega), -\omega_H - \Omega, -\omega_H, \omega_H) |\dot{U}_H C_0|^2 |\dot{U}_H \dot{C}_1|^2 \dot{U}_H \dot{C}_1 + \dots \quad (4)$$

Аналогично рассчитываются другие комбинационные составляющие, формирующие выходной сигнал, количество которых рассчитывается в зависимости от требуемой точности восстановления отклика. Отклик нелинейного устройства при воздействии АМп-сигнала может быть представлен в виде ФРВ:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k!}{2^{k-1}} H_k (\omega_H \dots \omega_H + n\Omega) \prod_{r=1}^k \dot{X}_r \exp \left(\sum_{r=1}^k j\omega_r t \right), \quad (5)$$

где $H_k (\omega_H \dots \omega_H + n\Omega)$ – ядро Вольтерра в частотной области k -го порядка, вычисленное для комбинационной гармоники в спектре АМп-сигнала; $n = -N, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, N$ – число учитываемых гармоник в спектре; $\dot{X}_r = \dot{U}_H C_n$.

В качестве проверки полученных соотношений выполним компьютерное моделирование схемы входного устройства (рис. 1) приемника портативной радиостанции Motorola GP300, широко используемой на железнодорожном транспорте [5]. Радиостанция работает в диапазоне частот 136–162 МГц, имеет от 2 до 16 каналов (в зависимости от модификации), обладает чувствительностью 0,32 мВ, избирательностью 70 дБ и выходной мощностью 0,5 Вт. Входное устройство состоит из первого полосового фильтра, усилителя радиочастоты на транзисторе Motorola MMBR571 и второго полосового фильтра. Фильтр обеспечивает согласование выходного сопротивления усилителя радиочастоты с одной стороны и 50-омного входа следующего каскада – с другой. Компьютерный анализ данной схемы при гармонических полезных и мешающих сигналах был выполнен в работе [6] и показал хорошее совпадение с паспортными техническими характеристиками.

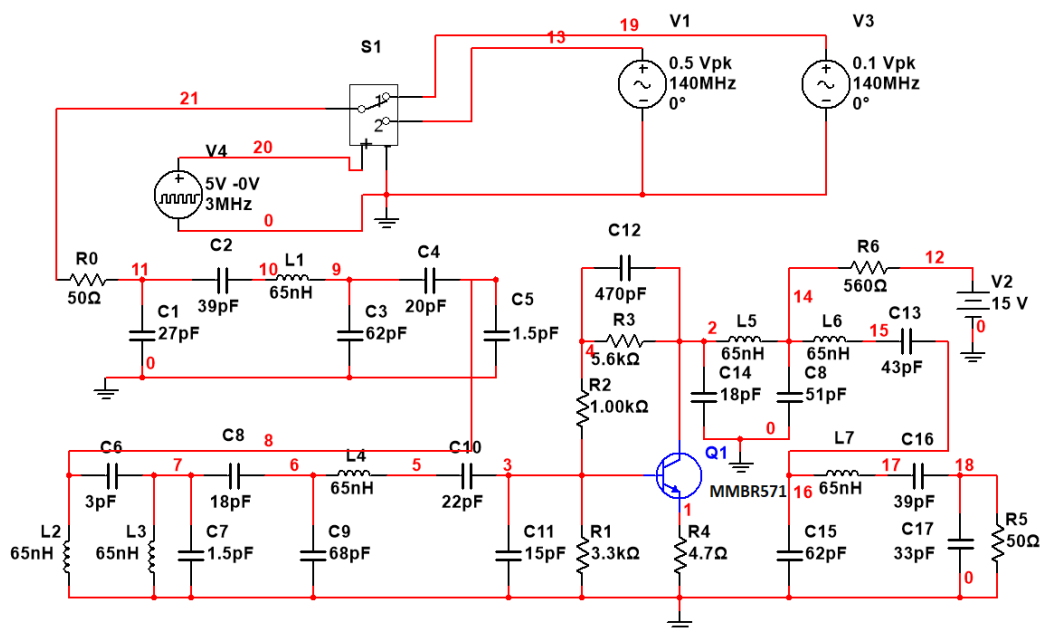


Рис. 1. Схема усилителя радиочастоты приемника Motorola GP300 с генератором АМп-сигнала в среде Multisim

Для моделирования генератора сложного АМп-сигнала BASK в среде Multisim [7] была разработана схема, построенная на основе электронного переключателя S1, управляемого напряжением. Для управления данным переключателем используется генератор прямоугольных импульсов V4 с амплитудой 5 В (пороговое напряжение для переключения S1) и частотой 3 МГц, равной частоте огибающей АМп-сигнала. С данной частотой переключатель S1 подключает на вход схемы приемника поочередно генераторы V1 и V3. Оба этих генератора формируют гармоническое напряжение с частотой несущей АМп-сигнала, равной 140 МГц. Генератор V1 выдает напряжение амплитудой 0,5 В (соответствующее

уровню единицы), а генератор V3 – напряжение амплитудой 0,1 В (соответствующее уровню нуля). Таким образом, на вход приемника поступает гармоническое напряжение с частотой несущей 140 МГц, амплитудой $U_n \cdot U_1 = 0,5 \cdot 1 = 0,5$ В и $U_n \cdot U_2 = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1$ В, меняющейся с частотой 3 МГц. Это позволяет сформировать на входе приемника сложный АМп-сигнал (1).

Моделирование схемы выполним с использованием демонстрационной версии программы Multisim [7] и последующей конвертацией файла из формата SPICE во внутренний формат входного файла программы моделирования аналоговых схем MARC [4]. Программа MARC реализует процедуру расчета комплексных амплитуд гармоник отклика на элементах схемы в виде функциональных рядов (3), (4). В результате работы блока определяется набор производных специального вида или ядер Вольтерра в частотной области, требуемых для вычисления напряжений искомым гармоник. После определения ядер Вольтерра можно вычислить отклик в виде ряда Фурье согласно выражению (5).

Кроме того, анализ переходных процессов в программе Multisim позволяет моделировать показания осциллографа при воздействии заданных сигналов. Это обеспечивает возможность получения временной картины отклика для заданного сигнала.

На рис. 2 показаны спектры входного (верхний ряд) и выходного (нижний ряд) АМп-сигналов усилителя с частотой огибающей 3 МГц и с частотой несущей АМп-сигнала, равной 140 МГц. Из спектральных диаграмм видно хорошее совпадение полученных графиков с теоретическими положениями для спектров АМп-сигналов [8]. Видно, что боковые спектральные составляющие отстают от несущей на частоты, кратные частоте, огибающей 3 МГц.

При этом можно отметить хорошее совпадение результатов расчета спектра методом ФРВ и путем численного интегрирования и последующего анализа Фурье. Некоторое уменьшение на выходе усилителя амплитуд боковых составляющих ниже несущей по сравнению с амплитудами составляющих, расположенных выше несущей (нижний ряд на рис. 2), объясняется тем, что центральная частота настройки усилителя составляет 150 МГц, т.е. присутствует расстройка частот сигнала и настройки контуров усилителя.

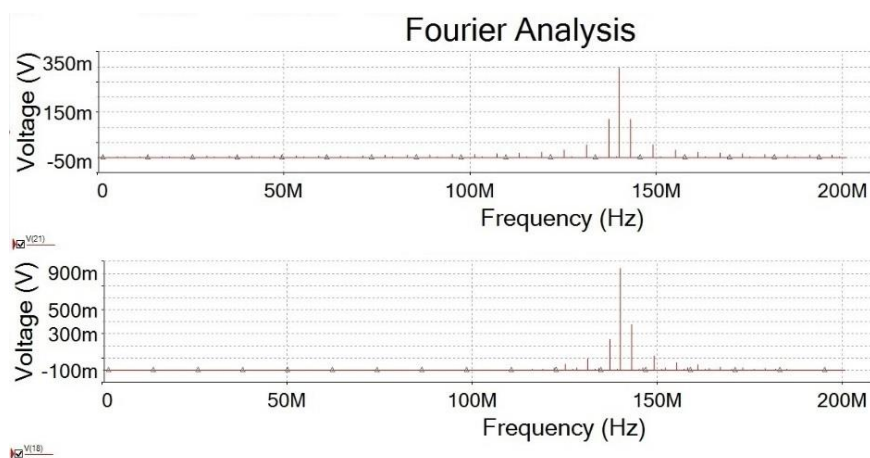


Рис. 2. Спектры сигналов на входе (вверху) и выходе (снизу) усилителя радиочастоты в программе Multisim при воздействии АМп-колебаний

На рис. 3 показаны входной (верхний ряд) и выходной (нижний ряд) АМп-сигналы усилителя с частотой огибающей 3 МГц (левый столбец), 10 МГц (средний столбец) и 20 МГц (правый столбец) в зависимости от времени. Амплитуда уровня 1 составляет 500 мВ, а уровня 0 – 100 мВ. Как видно из рис. 2, с увеличением частоты огибающей инерционность схемы существенно влияет на качество АМП-сигнала и возникающие ошибки в различимости уровней 0 и 1. Так, если при частоте огибающей 3 МГц (левый столбец) на выходе усилителя четко различаются уровни 0 и 1 (нижний рисунок слева), то при частоте огибающей 20 МГц (правый столбец) уровни 0 и 1 очень близки по значению (нижний рисунок справа), что значительно повышает вероятность ошибок передачи дискретных сообщений. Это объясняется тем, что время установления огибающей при частоте 20 МГц превышает длительность импульса, что и вызывает повышение ошибки определения уровней 0 и 1. В этом заключается проявление межсимвольных искажений или межсимвольной интерференции (intersymbol interference ISI), когда переходной процесс от предшествующего импульса не заканчивается к приходу следующего.

Импульсы накладываются друг на друга, что и вызывает ошибку определения уровней 0 и 1. Таким образом, помимо известных факторов, влияющих на межсимвольные искажения, таких как ограниченная полоса пропускания устройства и высокая скорость передачи, необходимо учитывать и модулирующую частоту или период огибающей импульсов при АМп.

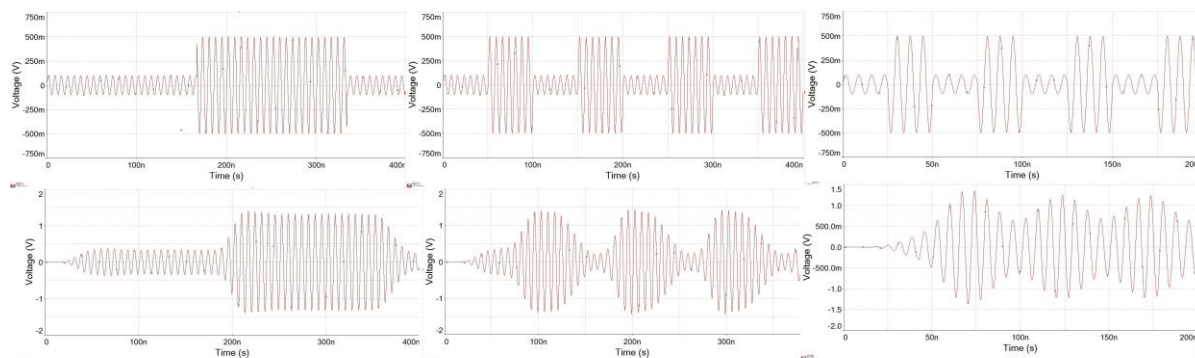


Рис. 3. Сигнал на входе (сверху) и выходе (снизу) усилителя радиочастоты в программе Multisim при воздействии АМп-сигнала с различной частотой огибающей

Для количественной оценки межсимвольных искажений определим вероятность ошибки по формуле [8]

$$P_{\text{ош}} = \frac{\Delta\tau^2}{3\lambda_E T^2} \left[1 + \ln \left(\frac{3\lambda_E T^2}{4\pi\Delta\tau^2} + 1 \right) \right],$$

где $\Delta\tau$ – время наложения импульсов огибающей, определяемое из рис. 3, и равное 42,5 нс; λ_E – параметр, зависящий от метода манипуляции: для когерентного приема $\lambda_E = 2,7 \div 3$; для некогерентного –

$$\lambda_E = 2; T = \frac{2\pi}{\Omega} = \frac{1}{F}.$$

По последней формуле была рассчитана вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ в зависимости от частоты, огибающей F , график представлен на рис. 4, а. Видна практически линейная обратная зависимость между этими величинами. На рис. 4, б показана связь между вероятностью ошибки и соотношением сигнал/шум при различных видах кодирования информации [9]. Таким образом, задавшись либо определенным соотношением сигнал/шум, либо допустимой вероятностью ошибок, можно получить максимально допустимую частоту огибающей АМП-сигнала, а следовательно, и скорость передачи информации через рассматриваемое приемно-усилительное устройство.

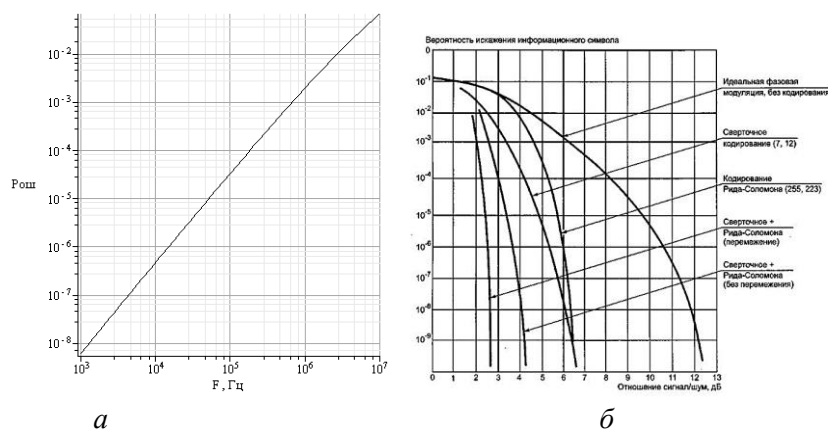


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки:
а – от частоты, огибающей F ; б – от соотношения сигнал/шум

Далее рассмотрим влияние амплитуды воздействия на качество передачи АМп-сигнала. На рис. 5 показаны входной (верхний ряд) и выходной (нижний ряд) АМп-сигналы усилителя с частотой огибающей 3 МГц и различными амплитудами уровня 1 и 0. Так, в левом столбце представлены временные диаграммы сигнала с уровнем 1 (амплитудой 1 В), с уровнем 0 (амплитудой 200 мВ). А в правом столбце представлены временные диаграммы сигнала с уровнем 1 (амплитудой 2 В), с уровнем 0 (амплитудой 400 мВ). Как видно из рис. 5, при воздействии АМп-сигнала с амплитудой единицы 1,0 В (левый столбец) происходит четкое разделение уровней высокого и низкого сигналов. Однако при АМп-сигнале с уровнем 1 (амплитудой 2 В) (правый столбец на рис. 3) наблюдается практическое равенство амплитуд 0 и 1, что означает искажение информации.

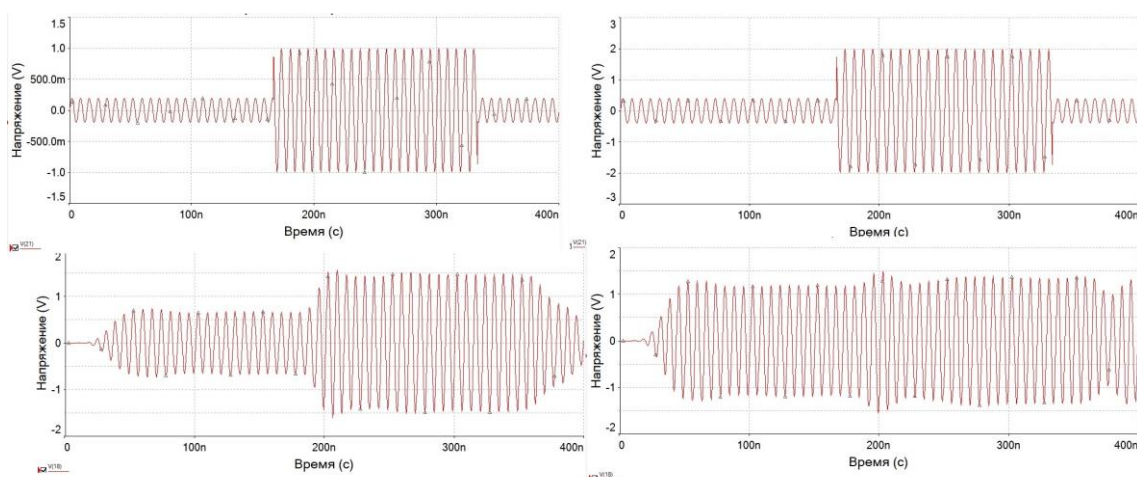


Рис. 5. Сигнал на входе (вверху) и выходе (снизу) усилителя радиочастоты в программе Multisim при воздействии АМп-сигнала с различной амплитудой уровня нуля и единицы

Для объяснения данного нелинейного явления целесообразно рассмотреть динамическую амплитудную характеристику усилителя, полученную на частоте несущего колебания, т. е. зависимость $U_{н\text{ вых}}$ от $U_{н\text{ вх}}$. Комплексная амплитуда выходного напряжения на частоте несущей, записанная в виде отрезка ФРВ, имеет вид

$$\dot{U}_{н\text{ вых}} = \dot{Y}_n(\omega_n) = H_1(\omega_n)\dot{U}_n + \frac{3}{4}H_3(2\omega_n, -\omega_n)|\dot{U}_n|^2\dot{U}_n + \frac{5}{8}H_5(3\omega_n, -2\omega_n)|\dot{U}_n|^4\dot{U}_n + \dots$$

Взяв модуль от $\dot{U}_{н\text{ вых}}$, можно получить амплитудную характеристику, т. е. зависимость от изменения напряжения U_n этой же частоты на входе. Результаты расчета динамической амплитудной характеристики для частоты несущей 140 МГц, показаны на рис. 6. На рис. 7 показан коэффициент усиления, рассчитанный как отношение модуля амплитуды выходного напряжения с частотой несущей $U_{н\text{ вых}}$ ко входному U_n .

Из рис. 6 видно ограничение амплитудной характеристики усилителя при входном напряжении 500 мВ и стабилизация ее на уровне 1000 мВ. На рис. 7 видно существенное возрастание ошибок при больших уровнях входного сигнала. Так, при сигнале с уровнем 1 (амплитудой 2000 мВ) (правый столбец на рис. 5) наблюдается резкое падение коэффициента усиления по сравнению с уровнем 0 (амплитудой 400 мВ). При 400 мВ коэффициент усиления равен 3, а при 2000 мВ он падает до 0,7. Так как выходное напряжение определяется произведением входного напряжения на коэффициент усиления, это объясняет стирание граней между высоким и низким уровнем входного сигнала на выходе усилителя.

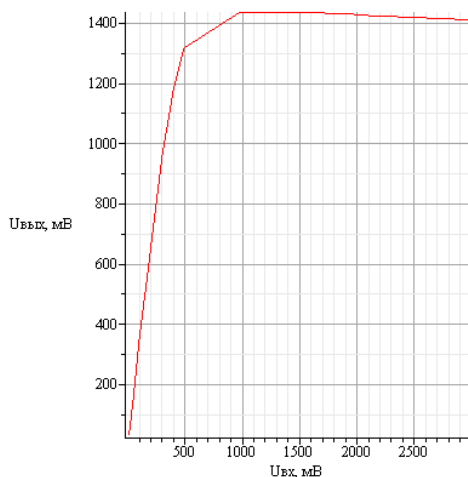


Рис. 6. Динамическая амплитудная характеристика

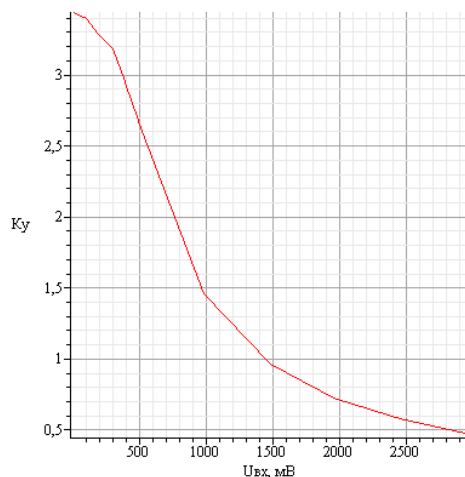


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления K_u от амплитуды несущего колебания

Выводы

Таким образом, полученные в работе выражения позволяют рассчитать спектральные характеристики отклика при воздействии сложного АМп-сигнала BASK. Отклик нелинейного устройства с АМп-сигналом был получен как в виде ФРВ (5), так и с помощью анализа переходных процессов методом численного интегрирования. Отмечено хорошее совпадение результатов при расчете обоими методами. Однако гармоники с малыми амплитудами с большей точностью можно рассчитать методом ФРВ, так как сказывается числовой шум, свойственный методам численного интегрирования. Для контроля вычислительной погрешности методов ФРВ необходимо учитывать их сходимость и погрешность усечения ряда [10]. Отметим также, что при использовании ФРВ и полученных выражений (3)–(5) имеется возможность построить модель схемы при заданных воздействиях, что открывает перспективы ее применения при функциональном моделировании телекоммуникационных систем с помощью подхода [11].

Выполненное моделирование позволяет определить допустимые частотные и амплитудные характеристики сложного АМп-сигнала BASK для обеспечения заданной вероятности ошибки при прохождении через нелинейные частотно-селективные цепи.

Список литературы

- 1 Digital front-end in wireless communications and broadcasting : circuits and signalprocessing /edited by Fa-Long Luo. – Cambridge : Cambridge University Press, 2011. – 763 p. – ISBN 978-1-107-00213-5.
- 2 Performance Comparison of Various Digital Modulation Schemes based on Bit Error Rate under AWGN Channel // N. Sharma, K. Bhatt, D. Jain, M. T. Thermalil // Conference : 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). – ResearchGate GmbH, 2021. – DOI 10.1109/ICCMC51019.2021.9418396.
- 3 Maas, S. A. Nonlinear microwave and RF circuits / S. A. Maas. – London : Artech House, 2003. – 582 p. – ISBN 1-58053-484-8.
- 4 Нечес, И. О. Методы анализа нелинейных радиотехнических устройств с применением аппарата функциональных рядов : монография / И. О. Нечес, Н. Д. Пирогова. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2013. – 284 с. – ISBN 978-5-88814-345-2.

References

- 1 Digital front-end in wireless communications and broadcasting: circuits and signal processing /edited by Fa-Long Luo. – Cambridge : Cambridge University Press, 2011. – 763 p. – ISBN 978-1-107-00213-5.
- 2 Performance Comparison of Various Digital Modulation Schemes based on Bit Error Rate under AWGN Channel // N. Sharma, K. Bhatt, D. Jain, M. T. Thermalil // Conference : 2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). – ResearchGate GmbH, 2021. – DOI 10.1109/ICCMC51019.2021.9418396.
- 3 Maas, S. A. Nonlinear microwave and RF circuits / S. A. Maas. – London : Artech House, 2003. – 582 p. – ISBN 1-58053-484-8.
- 4 Neches, I. O. Methods for analysis of nonlinear radio devices using the apparatus of functional series: monograph / I. O. Neches, N. D. Pirogova. – Rostov on Don : RSTU, 2013. – 284 p. – ISBN 978-5-88814-345-2.

- 5 Motorola GP300 manual / 2007–2016. – URL: <http://smanuals.ru/manuals/radiostation/motorola-radiostation/motorola-gp300.html#> (дата обращения: 20.04.2023).
- 6 **Нечес, И. О.** Компьютерное моделирование нелинейных искажений в телекоммуникационных системах / И. О. Нечес, Н. Д. Пирогова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 2. – С. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2017_2_145.
- 7 **Херниттер, М. Е.** Multisim : Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств / М. Е. Херниттер ; перевод с английского А. И. Осипова. – Москва : Издательский дом ДМК-пресс, 2006. – 488 с. – ISBN 5-9706-0026-1.
- 8 Теория электрической связи / К. К. Васильев, В. А. Глушков, А. В. Дормидонтов, А. Г. Нестеренко ; под общей редакцией К. К. Васильева. – Ульяновск : УЛГТУ, 2008. – 452 с. – ISBN 978-5-9795-0203-8.
- 9 **Прокис, Д.** Цифровая связь / Д. Прокис ; перевод с английского под редакцией Д. Д. Кловского. – Москва : Радио и связь, 2000. – 800 с. – ISBN 5-256-01434-X.
- 10 **Нечес, И. О.** Вычислительная погрешность методов анализа, основанных на аппарате функциональных рядов / И. О. Нечес, Н. Д. Пирогова // Телекоммуникационные технологии на транспорте России : сборник докладов Пятой юбилейной Международной научно-практической конференции «ТелекомТранс-2007». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2007. – С. 180–184. – ISBN 978-5-88814-188-5.
- 11 **Пирогова, Н. Д.** Определение передаточных функций нелинейных систем по передаточным функциям составляющих блоков / Н. Д. Пирогова // Радиотехника. – 2009. – № 10. – С. 51–59. – DOI 10.3103/S073527271305004X.
- 5 Motorola GP300 manual / 2007–2016. – URL: <http://smanuals.ru/manuals/radiostation/motorola-radiostation/motorola-gp300.html#> (date of access: 04/20/2023).
- 6 **Neches, I. O.** Computer modeling of nonlinear distortions in telecommunication systems / I. O. Neches, N. D. Pirogova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2017. – No. 2. – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2017_2_145.
- 7 **Hernitter, M. E.** Multisim : A modern system for computer simulation and analysis of circuits of electronic devices / M. E. Hernitter; Transl. With the English. A. I. Osipov. – Moscow : Publishing house DMC-press, 2006. – 488 p. – ISBN 5-9706-0026-1.
- 8 Theory of electrical communication / K. K. Vasiliev, V. A. Glushkov, A. V. Dormidontov, A. G. Nesterenko; under the general editorship of K. K. Vasiliev. – Ulyanovsk : UIGTU, 2008. – 452 p. – ISBN 978-5-9795-0203-8.
- 9 **Prokis, J.** Digital communication / J. Prokis ; transl. from English ed. D. D. Klovsky. – Moscow : Radio and communications, 2000. – 800 p. – ISBN 5-256-01434-X.
- 10 **Neches, I. O.** Computational error of analysis methods based on the apparatus of functional series / I. O. Neches, N. D. Pirogova // Telecommunication technologies in transport in Russia : collection of dokl. The Fifth Anniversary International Scientific and Practical Conference «TelecomTrans-2007». – Rostov-on-Don : RSTU, 2007. – P. 180–184. – ISBN 978-5-88814-188-5.
- 11 **Pirogova, N. D.** Definition of transfer functions of nonlinear system on transfer functions of making blocks / N. D. Pirogova // J. Radioengineering. – 2009. – No. 10. – P. 51–59. – DOI 10.3103/S073527271305004X.

I. O. Neches, N. D. Pirogova

ANALYSIS OF THE PASSAGE OF PULSE-MANIPULATED SIGNALS THROUGH NONLINEAR FREQUENCY-SELECTIVE DEVICES

Abstract. In this paper, the analysis of the signal transmission with complex binary amplitude manipulation through a nonlinear frequency-selective amplifier is performed. It was obtained the expressions for the spectrum of the amplitude-manipulated signal. Formulas were proposed for the main harmonics of the output signal in the form of segments of Volterra functional series. A computer simulation of the input amplifier circuit of the receiver of the MOTOROLA GP300 radio station was carried out using numerical integration methods and Volterra functional series. The spectrum and time function of the output signal are obtained for various parameters of frequencies and amplitudes of the manipulated signal. The probability of error is estimated depending on the frequency of the envelope of the amplitude-manipulated signal. The gain factor is analyzed and the

effect of the signal amplitude on the degree of distortion of information when passing through the amplifier is investigated.

Keywords: amplitude-manipulated signal, signal spectrum, Volterra functional series, error probability, amplitude characteristic, gain factor, computer simulation.

For citation: Neches, I. O. Analysis of the passage of pulse-manipulated signals through nonlinear frequency-selective devices / I. O. Neches, N. D. Pirogova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 74–83. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_74.

Сведения об авторах

Нечес Игорь Олегович

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

Пирогова Наталья Дмитриевна

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

Information about the authors

Neches Igor Olegovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Communication on Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: neches-io@yandex.ru

Pirogova Natalya Dmitrievna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Communication on Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: nd-pirogova@yandex.ru

К. М. Чудотворова, А. В. Федоров

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЯЮЩЕГО ЦИФРОВОГО АВТОМАТА ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРАХ

Аннотация. В настоящее время в нефтегазовой отрасли широко внедряются современные средства управления технологическими процессами, системы противоаварийной защиты, образующие вместе с технологическим оборудованием автоматизированные технологические комплексы (АТК) и позволяющие в значительной степени снизить риски возникновения аварийных ситуаций.

Развитие технологического процесса на нефтеперерабатывающих предприятиях повышает требования к быстрдействию, надежности и универсальности автоматизированных систем противоаварийной защиты.

В связи с этим возникают три основных направления исследования данной проблематики:

- во-первых, получение, обработка и выдача информации о режиме работы автоматизированной системы противоаварийной защиты (АСПЗ);
- во-вторых, управление алгоритмом функционирования противоаварийной защиты (ПАЗ) с помощью команд, задаваемых АСПЗ;
- в-третьих, диагностирование ПАЗ во время технологического процесса.

Сложность разработки систем безопасности обусловлена ростом технологических процессов. Сегодня при проектировании и разработке автоматизированных систем противопожарной защиты необходимо внедрять искусственный интеллект, чтобы системы функционировали по назначению. Целью данного исследования является создание основы математической модели автомата управления противоаварийной защитой технологической установки полимеризации.

Ключевые слова: модель, управление, автомат Мура, цифровой автомат, вершина графа, противоаварийная защита, технологическая установка, полимеризация.

Для цитирования: Чудотворова, К. М. Разработка методики моделирования структуры управляющего цифрового автомата противоаварийной защиты технологической установки полимеризации на микроконтроллерах / К. М. Чудотворова, А. В. Федоров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 84–91. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_84.

Введение

В современном мире автоматизация процессов получила широкое распространение. Применение цифровых автоматов позволяет автоматизировать процессы на предприятиях и повышать их эффективность и точность. Одним из наиболее важных направлений автоматизации является обеспечение безопасности технологических установок. Для этой цели используется различное оборудование, включая цифровые автоматы.

В данной статье рассматривается разработка методики моделирования структуры управляющего цифрового автомата противоаварийной защиты технологической установки полимеризации на микроконтроллерах.

Основная часть

Процесс полимеризации – один из важнейших процессов на промышленных производствах. Небольшое отклонение от установленного режима может привести к консервации оборудования, а в некоторых случаях и к авариям. Поэтому важна задача разработки алгоритмов, позволяющих обеспечить стабильность процесса полимеризации.

Использование цифровых устройств для управления процессами полимеризации имеет ряд преимуществ. Они позволяют контролировать процесс на всех этапах, от момента подготовки реакционной смеси до момента окончания процесса полимеризации.

Также благодаря применению цифровых автоматов (ЦА) в технологическом процессе полимеризации можно существенно повысить качество продукции и сократить количество брака. Например, с помощью ЦА можно контролировать температуру на различных этапах полимеризации и в случае ее изменения автоматически менять режим работы оборудования. Это позволяет избежать перегрева, перепадов температур и других нежелательных явлений.

Еще одно применение ЦА в технологическом процессе полимеризации – это контроль за давлением в реакторе. С помощью датчиков и специальных программ ЦА могут быстро реагировать на изменения давления и корректировать его. Это позволяет снизить уровень брака, связанного с перепадами давления и механическими повреждениями оборудования.

Не менее важным аспектом применения цифровых автоматов в технологическом процессе полимеризации является возможность автоматического контроля за временем процесса. Это позволяет установить оптимальный режим работы и экономически обоснованный срок производства. В результате удастся повысить эффективность производства и сократить затраты на производство.

Таким образом, применение цифровых автоматов в технологическом процессе полимеризации позволяет повысить качество продукции, снизить количество брака и сократить затраты на производство. Естественно, для того чтобы успешно осуществлять процесс полимеризации, нужно уметь правильно настроить и программировать ЦА. Важным фактором является также квалификация персонала, который будет работать с оборудованием.

В данном исследовании предлагается новый метод синтеза автоматизированных систем защиты, основанный на преобразовании предоставленного граф-схемного алгоритма (ГСА) (рис. 1, *a*) в соответствии со следующими рекомендациями:

1 Если ГСА содержит прямые связи, то между ними ставится пустой оператор, т. е. оператор, не соответствующий выдаче управляющей команды управляющим устройством (рис. 1, *b*).

2 Пустой оператор также ставится перед некоторым оператором j , если ряд других операторов передают ему управление.

Семантика A_i и j не будет иметь значения для синтеза САВ, если ГСА построен корректно.

Для перехода от модифицированного ГСА к графу переходов используется известный метод, но после применения пунктов 1, 2 переходов по $a(t)$ или $a(t+1)$ с учетом значений различных логических условий не будет, сохраняются только переходы по j или j ($j = 1, 2, \dots, q$). Здесь имеет место безусловное преобразование. На рис. 2 и 3 представлены графы переходов для исходной и модифицированной (рис. 4) ГСА.

Как можно заметить, рассматривая графы, целесообразно задать количество логических условий j или значение = 1, соответствующее состоянию $a(t)$ после изменения на каждом переходе $a(t)$ $a(t+1)$.

В этой ситуации аналитическая нотация модифицированного автомата будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} a(t+1) &= F_1^h(a(t), \beta, \alpha_j); \\ A(t) &= F_2(a(t)); \\ J &= F_3(a(t)). \end{aligned} \quad (1)$$

В данном случае J обозначает соответствующий номер условия j при условии $a(t)$, а F_1^h – свежий набор булевых операций, зависящих от кода $a(t)$, логических значений одной переменной и безусловного перехода. После ввода кода J мультиплексор типов по коду Z может выбрать соответствующее значение для j .

При добавлении M пустых операторов число состояний в графе переходов увеличивается, но значение m остается прежним, если $N + M \geq 2m$, и увеличивается на «1», если условие не выполняется. N различных состояний составляют автомат Мура.

ГСА проходит путь в h раз медленнее, так как пропуск такта с пустым оператором равен пропуску одного. В данном случае h равно $(N_1 + M_1) / N_1$, где N_1 и M_1 – общее количество пустых и активных операторов (i) на выделенном ГСА пути с наибольшим значением. В реальных задачах h составляет 1,25.

Для реализации уравнения (1) в SSP используется специальная структурная схема (рис. 5). Объем памяти нового ПСП составляет $V_n = m \cdot 2m + 1$. Новый автомат наследует функциональную подсистему автомата Мура.

Представленный на рис. 5 ПСП может быть создан и без схемы $F3$, если следовать следующему правилу: если $a(t)$ не соответствует $= 1$, то перенумеровать все j так, чтобы каждый $a(t)$ принадлежал j , номер которого совпадает с номером состояния $a(t)$.

Исследование показывает, что стоимость элементов схемы $F3$ и мультиплексора сопоставима со стоимостью элементов $F1n$.

Соотношение $L = V/Vn$ используется для измерения эффективности метода без учета $F3$ и мультиплексора.

Для базовых, средних и сложных автоматов расчетное уменьшение объема ПЗУ представлено следующим образом: $m = 4, q = 8, L = 128$; $m = 5, q = 12, L = 2048$; $m = 6, q = 16, L = 32768$.

Преимущество этого варианта реализации нового автомата состоит также в том, что он позволяет отказаться от схемы $F3$ и подавать выходы y_1, y_2, \dots, y_m непосредственно на адресные входы мультиплексора, что избавляет А-подсистему PAS от необходимости вырабатывать импульс синхронизации для опущенной схемы $F3$.

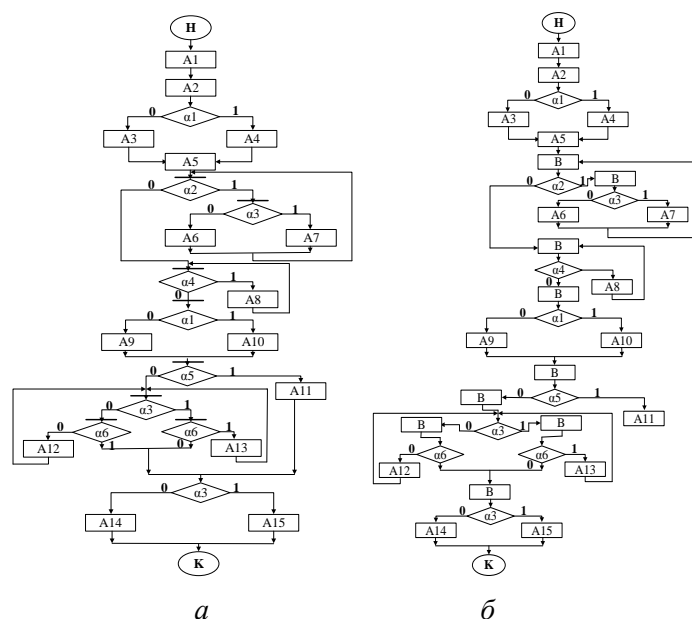


Рис. 1. Граф-схема алгоритма сложения чисел с плавающей запятой: *а* – по классической теории автоматов; *б* – по новой методике синтеза

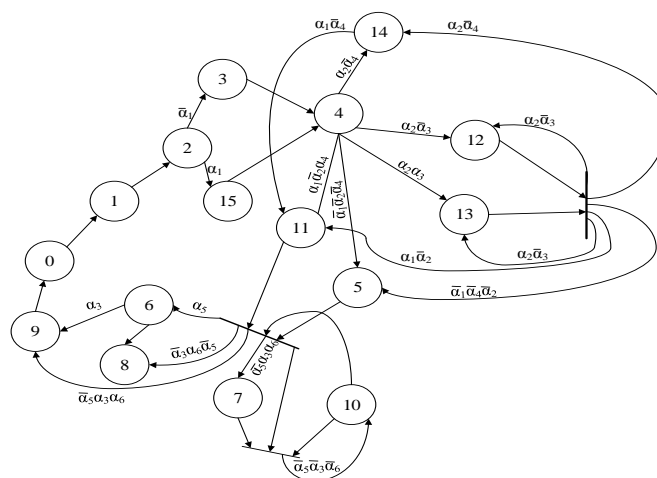


Рис. 2. Граф автомата Мура

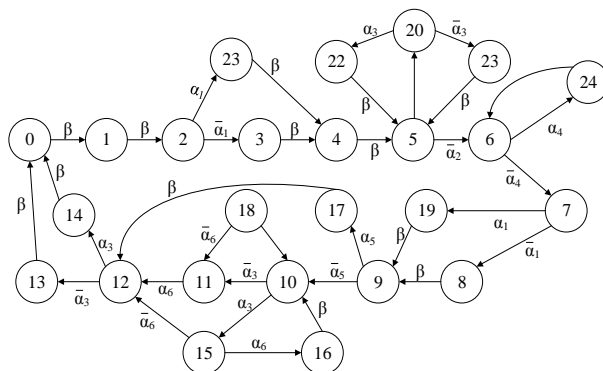


Рис. 3. Граф разработанного автомата

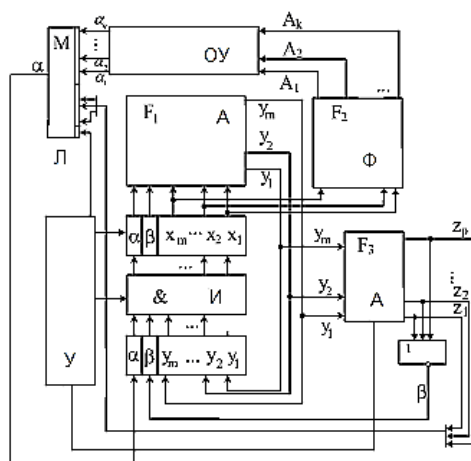


Рис. 4. Структурная схема модели противоаварийного автомата защиты технологического процесса полимеризации:

М – мультиплексор; β – признак безусловного перехода;

ОУ – объект управления (операционное устройство);

F_3 – комбинационная схема определения адреса $\{Z\}$ переменной $a_j \in \{ a \}$

Моделирование структуры управляющего цифрового автомата позволяет рассмотреть его функциональное назначение и графически представить его составляющие.

В качестве примера может быть рассмотрена установка полимеризации, состоящая из трех основных блоков: замеса, полимеризации и отделения готового продукта (рис. 5).

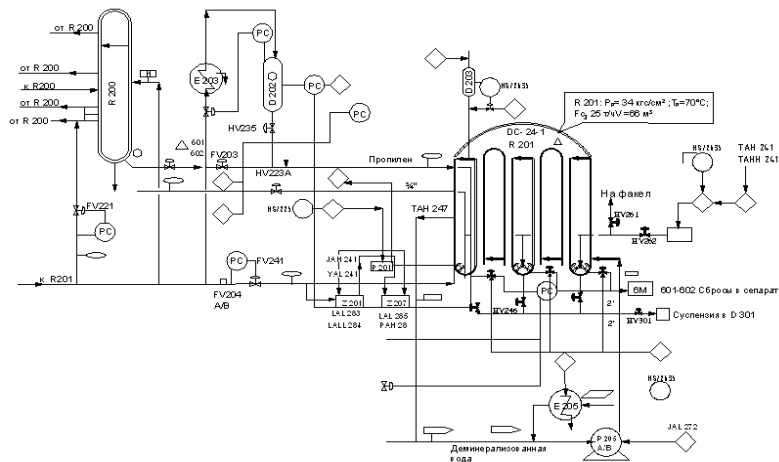


Рис. 5. Структура установки полимеризации

Управляющий цифровой автомат должен контролировать температуру, давление и концентрацию компонентов реакционной смеси на всех этапах процесса полимеризации. При этом необходимо учитывать следующие требования:

- автомат должен обеспечивать точность задания параметров и их поддержания на требуемом уровне на всем протяжении процесса полимеризации;
- необходимо рассматривать различные аварийные ситуации, которые могут возникнуть в процессе работы установки;
- автомат должен предоставлять возможность быстро переключаться между режимами работы для обеспечения максимальной производительности;
- каждый этап процесса должен контролироваться отдельно и рассматриваться в связи с другими этапами.

Рассмотрим структуру управляющего цифрового автомата. Будем считать, что автомат осуществляет управление на основе уровня сигнала. На вход управляющего цифрового автомата подаются сигналы датчиков температуры, давления и концентрации компонентов реакционной смеси. В зависимости от получаемого сигнала, автомат выполняет заранее заданные действия. Это может быть изменение уровня нагрева или охлаждения, изменение давления, изменение концентрации компонентов и другие действия, необходимые для поддержания стабильности процесса полимеризации.

Для разработки методики моделирования структуры управляющего цифрового автомата на микроконтроллерах следует рассмотреть следующие шаги:

- 1 Определить функциональное назначение управляющего цифрового автомата.
- 2 Выделить основные блоки, из которых состоит установка полимеризации.
- 3 Разработать алгоритмы, которые должен выполнять управляющий цифровой автомат на каждом этапе процесса полимеризации.
- 4 Создать структуру управляющего цифрового автомата на основе разработанных алгоритмов.
- 5 Разработать физическую структуру цифрового устройства на основе микроконтроллеров и другого необходимого оборудования.
- 6 Протестировать разработанную методику на установке полимеризации.

Результатом разработки методики моделирования структуры управляющего цифрового автомата (ЦА) на микроконтроллерах является создание цифрового автомата противоаварийной защиты, предназначенного для управления процессом полимеризации. Созданное устройство обеспечивает:

- стабильность параметров процесса полимеризации;
- обеспечение безопасности работы оборудования;
- минимизацию затрат на обслуживание и ремонт.

Применение разработанного ЦА способствует повышению эффективности процессов на предприятиях, снижению рисков аварий и повышению безопасности обслуживающего персонала.

Разработанная структурная схема цифрового автомата противоаварийной защиты приведена на рис. 6.

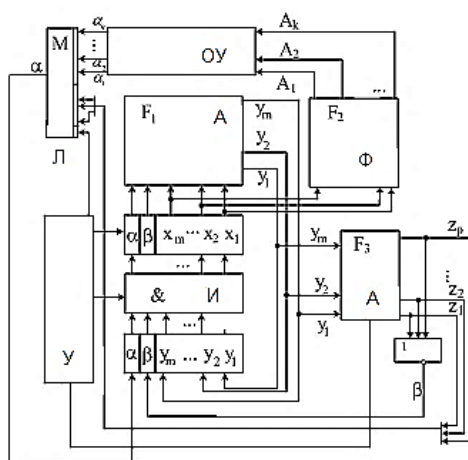


Рис. 6. Структурная схема нового автомата:

А – адресный блок, И – информационный блок, Л – логический блок, Ф – функциональный блок, ОУ – объект управления, М – мультиплексор, СС – схема синхронизации, p – признак безусловного перехода, F_3 – комбинационная схема определения адреса $\{Z\}$ переменной $a_j \in \{a\}$

При реализации F_1 объем ПЗУ определится в виде $V_H = m \cdot 2^{m+2}$, тогда для того же примера получим:

1 ($m = 4, q = 8$), $V_{H1} = 4 \cdot 2^6 = 256$ бит;

2 ($m = 5, q = 12$), $V_{H2} = 5 \cdot 2^7 = 640$ бит;

3 ($m = 6, q = 16$), $V = 6 \cdot 2^8 = 6 \cdot 256 = 1536$ бит.

В классической структуре для 1, 2, 3 имели $V_1 = 16$ кбит, $V_2 = 640$ кбит, $V_3 = 24$ Мбит; выигрыш (L) в объеме ПЗУ для каждого из вариантов составит $L_1 = 64, L_2 = 1024, L_3 = 16$ тыс.

Мультиплексор (М) для выбора конкретного $a_j \in \{a\}$ по заданному номеру j в виде кода $Z_1 Z_2 \dots Z_p$ является несложным устройством [1].

Выводы

Таким образом, разработка методики моделирования структуры управляющего цифрового автомата противоаварийной защиты технологической установки полимеризации на микроконтроллерах позволяет повысить эффективность работы промышленности и обеспечить безопасность технологических процессов.

Список литературы

1 Моделирование автоматизированных интегрированных систем безопасности объектов / Н. Г. Топольский, А. В. Фирсов, А. Т. Рвачев [и др.] // Труды XV Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – 2007. – Т. 2. – С. 79–83. – ISBN 978-5-91450-241-3.

2 Применение систем поддержки принятия решений руководителями оперативных подразделений при тушении пожаров в крупных городах / И. М. Тетерин, Н. Г. Топольский, В. М. Климовцов [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 4. – С. 20–26. – ISSN 2071-7342.

3 **Разанов, М. Р.** К вопросу анализа риска на объектах топливноэнергетического комплекса / М. Р. Разанов, Н. Г. Топольский // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – № 2. – С. 29–33. – ISSN 0869-7493.

4 К вопросу автоматизации информационной поддержки действий должностных лиц на пожаре / Е. А. Мешалкин, А. Г. Крылов, В. Т. Олейников, [и др.] // Вестник АГТУ. – 2013. – № 2. – С. 144–151. – ISSN 2072-9502.

5 **Членов, А. Н.** Новые возможности управления противопожарной защитой объектов / А. Н. Членов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2013. – № 3. – С. 48–53. – ISSN 2071-9116.

6 **Sibbet, D.** Visual Meetings / D. Sibbet // How Graphics, Sticky Notes & Idea Mapping Can Transform Group Productivity. – Москва : Альпина Паблишер, 2013. – 280 с. – ISBN 978-5-9614-4393-6.

7 Neural networks for computer-aided diagnosis in medicine : a review / D. Lin, A. V. Vasilakos, Y. Tang

References

1 Modeling of the automated integrated systems of object security / N. G. Topolsky, A. V. Firsov, A. T. Rvachev [et al.] // Proceedings of the XV International Conference "Problems of Safety Management of Complex Systems". – 2007. – Vol. 2. – P. 79–83. – ISBN 978-5-91450-241-3.

2 Application of the decision support systems by the heads of the operational respiratory units at fire extinguishing in the big cities / I. M. Teterin, N. G. Topolskiy, V. M. Klimovtsov [et al.] // Technosphere safety technologies. – 2008. – No. 4. – P. 20–26. – ISSN 2071-7342.

3 **Razanov, M. R.** To the question of the risk analysis at the objects of the fuel and energy complex / M. R. Razanov, N. G. Topolskiy // Pozharovzryvobezopasnost. – 2007. – No. 2. – P. 29–33. – ISSN 0869-7493.

4 On the issue of automation of information support for the actions of officials in a fire / E. A. Meshalkin, A. G. Krylov, V. T. Oleinikov, [et al.] // Bulletin of ASTU. – 2013. – No. 2. – P. 144–151. – ISSN 2072-9502.

5 **Chlenov, A. N.** New possibilities of management of fire protection of objects / A. N. Chlenov // Fires and emergencies: prevention, elimination. – 2013. – No. 3. – P. 48–53. – ISSN 2071-9116.

6 **Sibbet, D.** Visual Meetings / D. Sibbet // How Graphics, Sticky Notes & Idea Mapping Can Transform Group Productivity. – Moscow : Alpina Publisher, 2013. – 280 с. – ISBN 978-5-9614-4393-6.

7 Neural networks for computer-aided diagnosis in medicine : a review / D. Lin,

// – Neurocomputing. – 216. – Vol. 216. P. 700–708. – DOI 10.1016/j.neucom.2016.08.039.

8 Object detection based on HOG features : Faces and dual – eyes augmented reality / Y. Hbali, M. Sadgal, A. El Fazziki // Computer and Information Technology (WCCIT) 2013 World Congress. – 2013. – P. 1–4.

9 Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля: ГОСТ 12.3.047-2012. – Взамен ГОСТ Р 12.3.047-98; введ. 2012–12–27. – Москва : Стандартинформ, 2014.

10. Литвинцев, К. Ю. Расчетно-аналитический программный комплекс «Сигма ПБ» по моделированию развития пожара и эвакуации // Пожарная безопасность. – 2016. – № 4. – С. 51–59. – ISSN 2411-3778.

A. V. Vasilakos, Y. Tang // – Neurocomputing. – 216. – Vol. 216. P. 700–708. – DOI 10.1016/j.neucom.2016.08.039.

8 Object detection based on HOG features : Faces and dual – eyes augmented reality / Y. Hbali, M. Sadgal, A. El Fazziki // Computer and Information Technology (WCCIT) 2013 World Congress. – 2013. – P. 1–4.

9 Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control: GOST 12.3.047-2012. – Replaced by GOST R 12.3.047-98; introduced. 2012-12-27. – Moscow : Standardinform, 2014.

10. Litvintsev, K. Yu. Calculation and analytical software system "Sigma PB" for modeling the development of fire and evacuation // Fire safety. – 2016. – No. 4. – P. 51–59. – ISSN 2411-3778.

K. M. Chudotvorova, A. V. Fedorov

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR SIMULATING THE STRUCTURE OF A CONTROL DIGITAL AUTOMATIC EMERGENCY PROTECTION OF TECHNOLOGICAL INSTALLATION FOR POLYMERIZATION ON MICROCONTROLLERS

Abstract. At present, modern process control tools and emergency protection systems are being widely introduced in the oil and gas industry, which together with process equipment form automated technological complexes (ATC) and can significantly reduce the risks of emergency situations.

The development of technological process at oil refineries increases the requirements for speed, reliability and versatility of automated emergency protection systems.

In this connection three main directions of research of the given problems arise:

– first, obtaining, processing and issuing information about the mode of operation of the automated emergency protection system (AAPS);

– secondly, control of the algorithm of functioning. Secondly, control of the algorithm of emergency protection system functioning with the help of commands given by the ASEPPP;

– thirdly, diagnostics of the emergency protection system during the technological process.

The complexity of safety systems development is due to the growth of technological processes. Today, in the design and development of automated fire protection systems, it is necessary to implement artificial intelligence in order for the systems to function as intended. The purpose of this research is to create the basis of mathematical model of automatic control model of emergency protection control machine of polymerization process plant.

Keywords: model, control, Moore automaton, digital automaton, graph top, emergency protection, technological installation, polymerization.

For citation: Chudotvorova, K. M. Development of a method for simulating the structure of a control digital automatic emergency protection of technological installation for polymerization on microcontrollers / K. M. Chudotvorova, A. V. Fedorov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 84–91. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_84.

Сведения об авторах**Чудотворова Ксения Михайловна**

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
кафедра «Электротехника автоматизированных систем и связи»,
аспирант,
e-mail: ksenifire@bk.ru

Федоров Андрей Владимирович

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
кафедра «Автоматика»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ksenifire@bk.ru

Information about the authors**Chudotvorova Ksenia Mikhailovna**

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations in Russia,
Chair «Electrical Engineering of Automated Systems and Communications»,
Postgraduate Student,
e-mail: ksenifire@bk.ru

Fedorov Andrey Vladimirovich

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations in Russia,
Chair «Automatic»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ksenifire@bk.ru

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 658.5, 621.331

DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_92

*А. Н. Митрофанов, Ю. И. Жарков, С. А. Окладов***ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ**

Аннотация. Представлен подход к построению цифровых двойников бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов на полигонах железных дорог. Подход основан на матричной структуре представления бизнес-процессов грузовых перевозок и их обеспечения со стороны центральных дирекций ОАО «РЖД». В качестве формы построения цифровых двойников (моделей) предложено использовать функционалы, а в качестве параметров цифровой модели – показатели, имеющие наибольший уровень корреляционной взаимосвязи с фактическим показателем энергообеспечения тяги поездов. В качестве показателей бизнес-процессов рассматривались: расход электроэнергии на тягу поездов; удельный расход электроэнергии на тягу поездов; небаланс электроэнергии; работа в электротяге; участковая скорость; средний вес грузового поезда и другие.

Ключевые слова: бизнес-процессы, энергообеспечение тяги поездов, расход электроэнергии, цифровые двойники, корреляционный анализ, методы идентификации.

Для цитирования: Митрофанов, А. Н. Подход к построению моделей цифровых двойников бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов / А. Н. Митрофанов, Ю. И. Жарков, С. А. Окладов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 92–102. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_92.

Введение

Задачи оценки и повышения эффективности бизнес-процессов ОАО «РЖД» относятся к приоритетным направлениям инновационного развития холдинга на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года [1].

Однако, несмотря на установленные в данном документе приоритеты использования информационных технологий, на территориальных филиалах ОАО «РЖД» оценка эффективности в основном строится на базе полуэмпирических технологий. Анализ и решение производится представителями функциональных дирекций при региональных операционных комиссиях (ОКР) на сопоставления фактических показателей с плановыми показателями деятельности и без использования системного аналитического анализа деятельности дирекций с использованием моделей цифровых двойников хозяйств и подразделений.

Проводя анализ текущего состояния уровня цифровизации процедур и технологий перевозочного процесса и состояния технологий хозяйств, обеспечивающих грузовые перевозки, на региональных центрах корпоративного управления (РЦКУ) территориальных филиалов ОАО «РЖД», следует отметить, что цифровые показатели и автоматизированные системы по видам деятельности хозяйств насчитывают более 3000 видов и эксплуатируются достаточно давно: АСОУП, Этран, ИОММ, ГИД-Урал, АСУ-Т, АСУ-Э, КАСАНТ и др.

Для принятия решений оперативного управления с использованием цифровых двойников бизнес-процессов необходимо из значительного множества используемых показателей деятельности по различным хозяйствам и дирекциям выделить основные – «ключевые» показатели эффективности (КПЭ).

В рамках научных направлений: «Идентификация энергоэффективных технологий на железнодорожном транспорте», в СамГУПС [3–7], и «Автоматизированные системы электроснабжения», в РГУПС [8–12], разработано методологическое обоснование подбора показателей грузовых перевозок и обеспечивающих данные перевозки хозяйств для установления их связей и взаимовлияния с бизнес-процессами энергообеспечения тяги поездов на направлениях тяжеловесного движения. Проведенное исследование, а также работы в области теории идентификации [13, 14] позволили предложить подходы к формам построения цифровых двойников, к выбору показателей, которые могут быть использованы для построения моделей цифровых двойников, позволяющих моделировать режимы процессов энергообеспечения тяги поездов и их автоматизации.

Методы и средства

Обоснование выбора КПЭ бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов на полигонах тяжеловесного движения основано на построении обобщенных совместных схем функционирования бизнес-процессов грузовых перевозок и энергообеспечения тяги поездов на полигонах железных дорог. Теоретическое обоснование формирования потенциально возможных КПЭ бизнес-процессов перевозок грузовых поездов и энергообеспечения тяги поездов предложено осуществлять на основании представления перевозочного процесса в виде матричной структуры [2]. Данное представление взаимодействия структур развивалось в рамках работ по идентификации и автоматизации процессов энергообеспечения тяги поездов и организации её защит. В качестве векторов матрицы (рис. 1) авторами статьи предложено использовать структурные единицы территориальных филиалов ОАО «РЖД», включенных в направление тяжеловесного движения, и структурные подразделения центральных дирекций ОАО «РЖД», обеспечивающих грузовые перевозки на данных филиалах. В графическом представлении горизонтальные векторы данной матрицы (рис. 1) представляют собой «основные бизнес-процессы» грузовых перевозок по полигонам железных дорог, которые возложены на Региональные Центры Корпоративного Управления: РЦКУ (1), РЦКУ (2), ..., РЦКУ(N-1), РЦКУ(N).

Вертикальными векторами в матрице обозначены «обеспечивающие бизнес-процессы», реализуемые центральными дирекциями и хозяйствами ОАО «РЖД»: дирекция фирменного транспортного обслуживания (ЦДФТО); дирекция инфраструктуры (ЦДИ) со службами пути (П), вагонов (В), сигнализации и связи (Ш); дирекция тяги (ЦДТ); дирекция управления движением поездов (ЦДУД); дирекция энергообеспечения (ЦДЭ – Трансэнерго) и других [4].

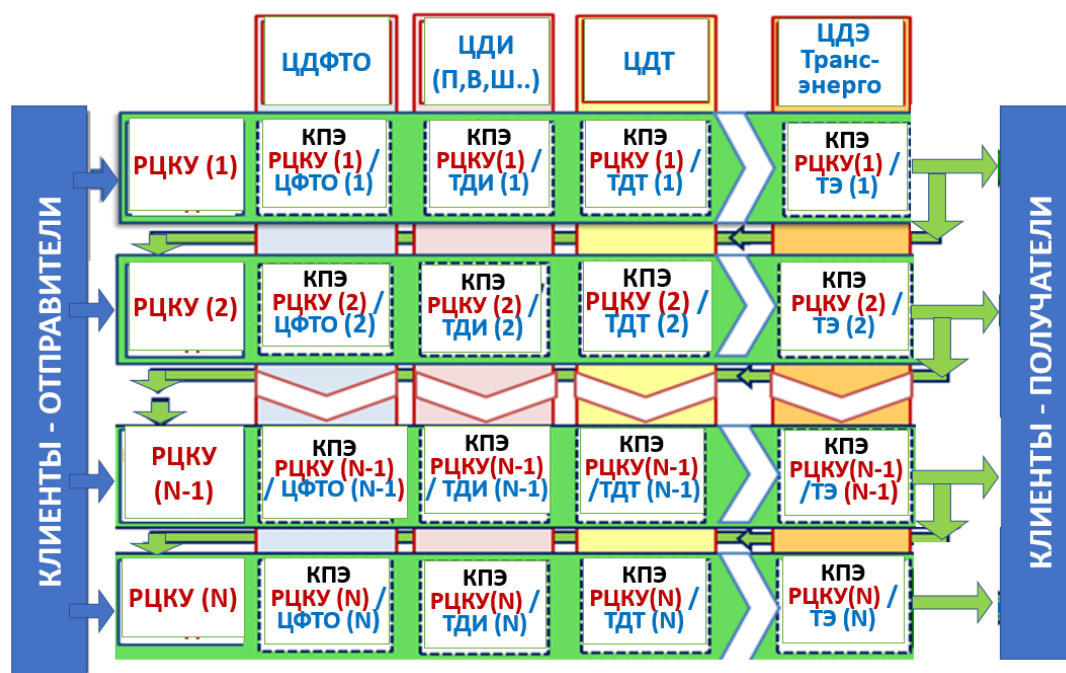


Рис. 1. Пример матричной структуры организации бизнес-процессов грузовых перевозок и деятельности по хозяйствам и дирекциям по территориальным филиалам ОАО «РЖД»

Исходя из представленной матричной структуры обосновывается и структура показателей взаимодействия «основных» и «обеспечивающих» бизнес-процессов (КПЭ). Так взаимосвязь между показателями грузовых перевозок по представленным N территориальным полигонам железных дорог (РЦКУ (1),..., РЦКУ (N) и показателями деятельности территориальных хозяйств на данных полигонах, например, ЦФТО, ТДИ, ТДТ,...,ТЭ, в общем виде будет определяться матрицей показателей условных взаимосвязей типа:

$$\begin{aligned} & \text{КПЭ (РЦКУ (1)/ЦФТО (1), \dots, КПЭ(РКЦУ (1)/ТЭ (1),} \\ & \quad \quad \quad \dots \\ & \text{КПЭ (РЦКУ (N)/ЦФТО (N), \dots, КПЭ(РКЦУ (N)/ТЭ(N).} \end{aligned}$$

Содержательный смысл каждой из данных условных взаимосвязей будет характеризовать влияние на грузовые перевозки на конкретном полигоне железной дороги определенной Территориальной дирекции. Несмотря на достаточную условность подобного представления взаимосвязей, этот подход позволяет получать закономерности взаимосвязи КПЭ перевозочного процесса и КПЭ дирекций в количественном виде и так же сопоставлять данные показатели по территориальным полигонам. На полигонах железных дорог уже есть примеры использования подобных условных взаимосвязей, например, в подразделениях локомотивного хозяйства показатель «Удельный расход электроэнергии на тягу поездов» определяется как отношение показателя «Расход электроэнергии на тягу поездов» к показателю «Работа в электротяге».

Поскольку очевидно, что осуществление грузовых перевозок на полигоне возможно лишь при совместном их обеспечении со стороны многих Центральных дирекций, то зависимость показателей грузовых перевозок от показателей деятельности обеспечивающих его хозяйств будет описываться уже не одиночной взаимосвязью, а некоторой многофакторной зависимостью, то есть представлять собой некоторый функционал F .

Для любого i -го исследуемого полигона в составе направления движения тяжеловесных поездов с центром управления и принятия решений в РЦКУ(i) выражение, описывающее вектор показателей грузового движения $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$, будет иметь вид:

$$Y_{\text{РЦКУ}(i)}^* = F_{\text{РЦКУ}(i)}(X_{\text{ТЦФТО}(i)}, X_{\text{ТДИ}(i)}, X_{\text{ТТЭ}(i)}, X_{\text{ТДТ}(i)}, \dots, X_{\text{ТДУД}(i)}) + \xi_{\text{РЦКУ}(i)}, \quad (1)$$

где $Y_{\text{РЦКУ}(i)}^*$ – вектор расчетных показателей цифровой модели (цифровой двойник) вектора фактических показателей грузового движения $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$ на территориальном РЦКУ(i);

$X_{\text{ТЦФТО}(i)}$, $X_{\text{ТДИ}(i)}$, $X_{\text{ТТЭ}(i)}$, $X_{\text{ТДТ}(i)}$, \dots , $X_{\text{ТДУД}(i)}$ – векторы наблюдаемых фактических показателей территориальных хозяйств Центральные дирекций, обеспечивающих грузовое движение на РЦКУ(i). Здесь $X_{\text{ТТЭ}(i)}$ – вектор показателей i -го территориального хозяйства дирекции Трансэнерго филиала ОАО «РЖД»;

$F_{\text{РЦКУ}(i)}$ – вектор функционалов взаимосвязи между векторами наблюдаемых фактических показателей $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$ и показателей территориальных хозяйств Центральные дирекций на РЦКУ(i). Для вычисления вектора расчетных показателей $Y_{\text{РЦКУ}(i)}^*$ по выражению (1) на первом этапе надо найти вектор функционалов – $F_{\text{РЦКУ}(i)}$. Решение данной задачи известно, оно лежит в области параметрической идентификации [6, 7] и в данной статье подробно не рассматривается;

$\xi_{\text{РЦКУ}(i)}$ – вектор стохастической составляющей влияния на качество цифровой модели из-за неучтенных факторов на i -м исследуемом полигоне. Это связано с тем, что фактические показатели грузового движения $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$ представляются оценочными показателями цифровой модели $Y_{\text{РЦКУ}(i)}^*$ только с определенной погрешностью. Причем погрешности по различным показателям вектора $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$ могут быть различными. Очевидно, что и по различным РЦКУ абсолютные значения показателей и погрешности их оценивания также будут различными.

Векторы показателей бизнес-процессов грузовых перевозок коридоров и направлений тяжеловесного движения $Y_{(1 \div N)}$, в которые интегрированы все от 1 до N полигонов территориальных филиалов, целесообразно получать также методами идентификации. Однако идентификация $Y_{(1 \div N)}$ по оценкам показателей отдельных полигонов $Y_{\text{РЦКУ}(1)}^*$, $Y_{\text{РЦКУ}(2)}^*$, \dots , $Y_{\text{РЦКУ}(i)}^*$, \dots , $Y_{\text{РЦКУ}(N)}^*$ может привести к значительным погрешностям. Более точное оценивание $Y_{(1 \div N)}$ может быть получено с использованием объемных и обобщенных по коридору (направлению) фактических показателей территориальных хозяйств Центральные дирекций, которые не содержат вычисляемых операций (типа «Удельный расход электроэнергии на тягу поездов»). При этом выражение, описывающее вектор показателей грузового движения по коридору (направлению) $Y_{(1 \div N)}$, будет иметь вид:

$$Y_{(1 \div N)}^* = F_{(1 \div N)}(X_{\text{ТЦФТО}(1 \div N)}, X_{\text{ТДИ}(1 \div N)}, X_{\text{ТТЭ}(1 \div N)}, X_{\text{ТДТ}(1 \div N)}, \dots, X_{\text{ТДУД}(1 \div N)}) + \xi_{(1 \div N)}, \quad (2)$$

где $Y_{(1 \div N)}^*$ – вектор расчетных показателей цифровой модели (цифровой двойник) вектора фактических показателей грузового движения $Y_{(1 \div N)}$ по коридору (направлению);

$X_{\text{ЦФТО}(1 \div N)}, X_{\text{ТДИ}(1 \div N)}, X_{\text{ТТЭ}(1 \div N)}, X_{\text{ТДТ}(1 \div N)}, \dots, X_{\text{ТДУД}(1 \div N)}$ – векторы наблюдаемых фактических от 1 до N показателей территориальных хозяйств Центральные дирекций. Здесь $X_{\text{ТТЭ}(1 \div N)}$ – вектор показателей от 1 до N хозяйств дирекции Трансэнерго;

$F_{(1 \div N)}$ – вектор функционалов взаимосвязи между векторами наблюдаемых фактических показателей $Y_{(1 \div N)}$ и показателей всех от 1 до N территориальных хозяйств Центральные дирекций;

$\xi_{(1 \div N)}$ – вектор стохастической составляющей влияния на качество цифровой модели из-за неучтенных факторов по коридору (направлению).

Исходя из физического единения деятельности бизнес-процессов грузовых перевозок и хозяйств Центральные дирекций, обеспечивающих данные перевозки, представленный выше идентификационный подход может быть использован и для оценивания показателей бизнес-процессов данных хозяйств. Так очевидно, что при увеличении на полигоне железной дороги объема грузооборота потребуются, например, увеличение рабочего парка электровозов, грузовых вагонов, а также увеличение объемов потребления электроэнергии, расходуемой на тягу поездов и ряд других мероприятий. Таким образом, при известных значениях показателей грузооборота, значений других названных показателей и вычисленных методами идентификации функционалов, определяющих их взаимосвязь, можно определять и потребное значение «Расхода электроэнергии на тягу поездов». В целом формализованное выражение для оценки вектора показателей i -го территориального хозяйства дирекции Трансэнерго $X_{\text{ТТЭ}(i)}$ будет иметь следующий вид:

$$X_{\text{ТТЭ}(i)}^* = F_{\text{ТТЭ}(i)} (Y_{\text{РЦКУ}(i)}, X_{\text{ЦФТО}(i)}, X_{\text{ЦДИ}(i)}, X_{\text{ЦДТ}(i)}, \dots, X_{\text{ЦДУД}(i)}) + \xi_{\text{ТТЭ}(i)}, \quad (3)$$

где $X_{\text{ТТЭ}(i)}^*$ – вектор расчетных показателей цифровой модели (цифровой двойник) вектора фактических показателей $X_{\text{ТТЭ}(i)}$ для i -го территориального хозяйства дирекции Трансэнерго;

$F_{\text{ТТЭ}(i)}$ – вектор функционалов взаимосвязи между векторами наблюдаемых фактических показателей $X_{\text{ТТЭ}(i)}$, показателей $X_{\text{ЦФТО}(i)}, X_{\text{ЦДИ}(i)}, X_{\text{ЦДТ}(i)}, \dots, X_{\text{ЦДУД}(i)}$ других территориальных хозяйств Центральные дирекций и фактических показателей грузового движения $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$ на i -м территориальном полигоне;

$\xi_{\text{ТТЭ}(i)}$ – вектор стохастической составляющей влияния на качество цифровой модели из-за неучтенных факторов на i -м территориальном полигоне.

Выражение (3) по отношению к выражению (1) является обратным. Для повышения устойчивости решений обратных уравнений, как правило, используются методы их регуляризации, например, метод регуляризации по А. Н. Тихонову.

С учетом доводов, приведенных при формировании выражения (2), могут быть определены векторы расчетных показателей любых цифровых моделей (цифровых двойников) для Центральные дирекций в целом по коридору (направлению). Так вектор показателей для дирекции Трансэнерго по коридору (направлению) в целом $X_{\text{ТТЭ}(1 \div N)}$ может быть определен из выражения:

$$X_{\text{ТТЭ}(1 \div N)}^* = F_{\text{ТТЭ}(1 \div N)} \left(Y_{\text{РЦКУ}(1 \div N)}, X_{\text{ЦФТО}(1 \div N)}, X_{\text{ЦДИ}(1 \div N)}, X_{\text{ЦДТ}(1 \div N)}, \dots, X_{\text{ЦДУД}(1 \div N)} \right) + \xi_{\text{ТТЭ}(1 \div N)}, \quad (4)$$

где $X_{\text{ТТЭ}(1 \div N)}^*$ – вектор расчетных показателей цифровой модели (цифровой двойник) вектора фактических показателей $X_{\text{ТТЭ}(1 \div N)}$ для дирекции Трансэнерго по коридору (направлению) в целом;

$F_{(1 \div N)}$ – вектор функционалов взаимосвязи между векторами наблюдаемых фактических показателей $Y_{(1 \div N)}$ и показателей всех от 1 до N территориальных хозяйств Центральные дирекций;

$\xi_{(1 \div N)}$ – вектор стохастической составляющей влияния на качество цифровой модели из-за неучтенных факторов по коридору (направлению).

К целевым значениям для КПЭ бизнес-процессов грузовых перевозок на электротяге для РЦКУ, как правило, относят 5 (пять) следующих показателей: «Погрузка грузов», «Грузооборот, всего», «Средний вес поезда, брутто грузового движения», «Средняя участковая скорость грузового поезда», «Среднесуточная производительность локомотива рабочего парка в грузовом движении». В качестве КПЭ бизнес-процессов, как правило, устанавливается один показатель – «Удельный расход электроэнергии на тягу поездов», который является показателем использования расхода электроэнергии на тягу поездов электроподвижным составом (ЭПС), отнесенной к единице измерения выполняемой ЭПС тонно-километровой работы – 10 тыс. ткм брутто.

В данный состав КПЭ ОАО «РЖД» не был включен ряд важных показателей деятельности хозяйства «Электрификации и электроснабжения» дирекции Трансэнерго, таких как объемные показатели расхода электроэнергии на тягу поездов и потери электроэнергии, которые сопровождают процесс транспортировки электроэнергии от тяговых подстанций до токоприемников ЭПС. Потери электроэнергии в системе показателей дирекции Трансэнерго определяются как разница или небаланс показаний счетчиков расхода электроэнергии на тяговых подстанциях (ТП) и показаний счетчиков расхода электроэнергии на ЭПС. Оценку уровня небаланса (потерь) следует проводить в процентном отношении именно к объемным показателям расхода электроэнергии на тягу поездов по показаниям счетчиков ТП.

Обоснованность включения названных показателей в список контролируемых КПЭ бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов определяется следующим:

1 Планирование расхода электроэнергии на тягу на филиалах ОАО «РЖД» осуществляется именно в объемных показателях и может составлять около 2,5–3 млрд кВтч/год на один территориальный филиал направления тяжеловесного движения (рис. 1), что требует финансовых расходов до 12 млрд рублей/год. Ошибка в планировании на 1 % может привести к ошибке в 120 млн рублей.

2 Небалансы тягового электропотребления зависят от наличия как технологически обоснованных потерь электроэнергии при её транспортировке, так и от коммерчески необоснованных потерь электроэнергии и могут по одному филиалу ОАО «РЖД» на участках постоянного тока достигать значений 20 %. Это означает, что в подобных филиалах ОАО «РЖД» будет наблюдаться неэффективное использование пятой части тягового электропотребления, то есть около 2,5 млрд рублей/год. Отсутствие контроля за данным КПЭ и увеличение показателя небаланса на 1 % может привести к необоснованным финансовым затратам до 120 млн рублей/год.

На основании вышеизложенного предложено использовать расширенный список КПЭ бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Содержание и обозначение ключевых показателей эффективности Трансэнерго

	Наименование КПЭ бизнес-процессов	Единица измерения	Сокращенное обозначение КПЭ
1	Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП	кВтч	(Расход Вт тп)
2	Удельный расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП	кВтч/10тыс ткм бр	(Уд Расход Wуд тп)
3	Небаланс электроэнергии (ТП – ЭПС) / ТП	%	(Wнеб)

На основании теоретических изысканий для оценки влияния на энергообеспечение тяги поездов было предложено использовать расширенный список из четырнадцати бизнес-процессов – КПЭ грузовых перевозок и КПЭ хозяйств по их обеспечению. В табл. 2 представлены примеры КПЭ из оценки деятельности РЦКУ; в табл. 3 – КПЭ деятельности локомотивного хозяйства; в таблице 4 – КПЭ деятельности вагонного хозяйства ЦДИ.

Таблица 2

Содержание и обозначение ключевых показателей эффективности РЦКУ бизнес-процессов грузовых перевозок

	Наименование КПЭ бизнес-процессов	Единица измерения	Сокращенное обозначение КПЭ
1	Погрузка	тонны	(Погрузка)
2	Грузооборот тарифный	ткм нетто	(ГруОбТар Grt)
3	Средняя участковая скорость грузового поезда	км/час	(V уч. – скорость)
4	Средний вес грузового поезда	тонны	(Q – ср. вес поезда)

Проведенный анализ подтвердил наличие влияния КПЭ бизнес-процессов грузовых перевозок и бизнес-процессов других хозяйств на КПЭ бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов и позволил выявить «приоритетные» КПЭ. К «приоритетным» КПЭ могут быть отнесены такие показатели, которые из множества исследуемых КПЭ (табл. 2–4) будут наиболее сильно влиять на изменение КПЭ бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов. Выявление подобных КПЭ основано на построении парных коэффициентов корреляции (R) между анализируемым КПЭ из группы бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов и КПЭ бизнес-процессов грузовых перевозок и других обеспечивающих хозяйств.

Таблица 3

**Содержание и обозначение ключевых показателей эффективности
локомотивного хозяйства ЦДТ**

	Наименование КПЭ бизнес-процессов	Единица измерения	Сокращенное обозначение КПЭ
5	Работа в электротяге	ткм брутто	(Работа Аэ)
6	Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ЭПС	кВтч	(Расход Wэпс)
7	Рабочий парк электровозов в грузовом движении	ед	(Раб. Парк Эл-зов)
8	Среднесуточный пробег электровоза рабочего парка	км	(S–Средн. Сут.Проб.Эл-за)
9	Производительность электровоза рабочего парка	ткм брутто	(Произв. Эл-за Pr)

Таблица 4

**Содержание и обозначение ключевых показателей эффективности вагонного хозяйства
ЦДИ (В)**

	Наименование КПЭ бизнес-процессов	Единица измерения	Сокращенное обозначение КПЭ
10	Простой вагона на 1-й технической станции	час	(Прост. ваг/1 ст.)
11	Оборот грузового вагона	сутки	(Оборот гр. Ваг.)
12	Производительность вагона	ткм нетто	(Произв. Ваг.)
13	Рабочий парк грузовых вагонов	ваг	(Раб. Парк. Гр. Ваг.)
14	Статическая нагрузка	тонн/ваг	(Стат. нагр.)

На рис. 2 представлен пример построения гистограммы коэффициентов корреляции R между КПЭ «Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП» (Расход W_t тп) и другими КПЭ из подпроцесса «Производство и безопасность», обозначенных в табл. 1–4.

Так, среди КПЭ по оценке энергообеспечения (табл. 1) «приоритетным» КПЭ будет «Небаланс электроэнергии», поскольку $R = 0,39$. Однако данная взаимосвязь определяется как «слабая», исходя из принадлежности её к критериальному диапазону $0,3 < R < 0,5$. Взаимосвязь КПЭ Расход W_t тп с КПЭ «Удельный расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП» (Уд Расход $W_{уд}$ тп) отсутствует, поскольку $R = 0,14$.

Среди КПЭ, отнесенных к показателям РЦКУ по грузовым перевозкам (табл. 2), «приоритетным» КПЭ будет «Грузооборот тарифный» (ГруОбТар Grt), поскольку его $R = 0,68$. Данная взаимосвязь определяется как «средняя», исходя из принадлежности её к критериальному диапазону $0,5 < R < 0,7$.

Среди КПЭ, отнесенных к показателям локомотивного хозяйства ЦДТ (табл. 3), «приоритетным» КПЭ будет «Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ЭПС» (Расход $W_{элс}$) – $R = 0,92$, а также КПЭ «Работа в электротяге» (Работа $A_{э}$) – $R = 0,88$. Данные взаимосвязи определяются как «сильные», исходя из принадлежности их к критериальному диапазону $0,7 < R < 1,0$.

Среди КПЭ, отнесенных к показателям вагонного хозяйства (табл. 4) «приоритетным» КПЭ будет «Производительность вагона» (Произв. Ваг.), поскольку его коэффициент корреляции с «Расход $W_{тп}$ » наибольший в группе $R = 0,34$.

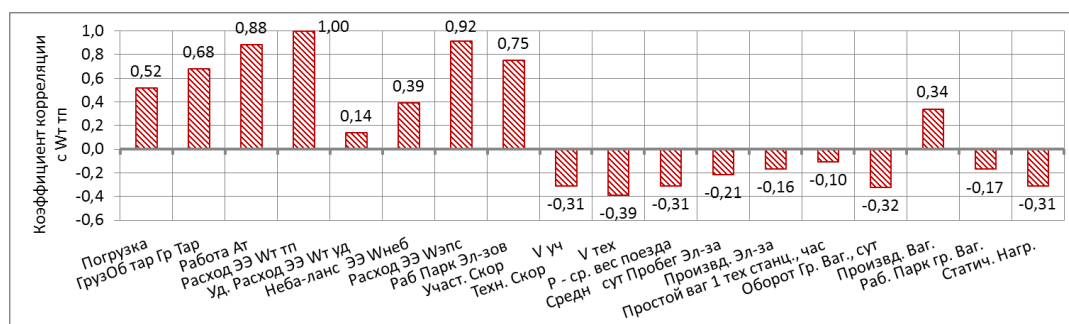


Рис. 2. Пример гистограммы коэффициентов корреляции КПЭ «Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП» с бизнес-процессами грузовых перевозок

Использование выявленных представленным образом «приоритетных» КПЭ в структуре цифровых двойников предложенной формы позволит выполнять операции оценивания граничных значений или прогнозирования количественных значений КПЭ энергообеспеченности тяги поездов на предстоящий период [3, 6].

Для повышения информативности выявления «приоритетных» КПЭ относительно сразу всех КПЭ энергообеспечения тяги поездов, предложено использовать кластерные методы анализа. На рис. 3 представлены в виде дендрограммы результаты обработки КПЭ семнадцати бизнес-процессов из приведенного выше списка КПЭ.

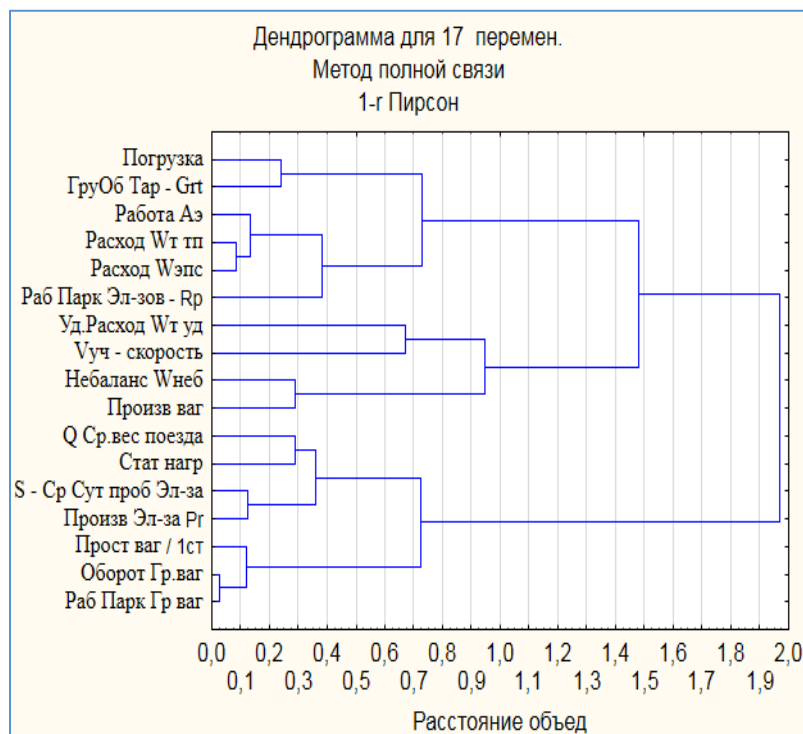


Рис. 3. Дендрограммы результатов обработки КПЭ семнадцати бизнес-процессов

В дендрограмме степень близости КПЭ изображается в виде одиночных «уровней взаимосвязи» или их групп – кластеров, отстоящих от нулевой оси абсцисс «Расстояние объединений» на расстояния, пропорциональные разнице между единицей и коэффициентом корреляции R по Пирсону, то есть согласно метрике $(1 - R \text{ Пирсон})$. При этом, если «уровень взаимосвязи» КПЭ или их кластеров находится по оси

«Расстояние объединений» на уровне 0, то это соответствует полной положительной взаимосвязи между КПЭ, то есть $R = 1$. Если «уровень к взаимосвязи» КПЭ по оси равен 1, то это соответствует полному отсутствию взаимосвязи между КПЭ, то есть $R = 0$. Если «уровень взаимосвязи» КПЭ по оси равен 2, то это соответствует полной отрицательной взаимосвязи между КПЭ, то есть $R = -1$.

Так на рис. 3 ранее выявленная взаимосвязь между КПЭ «Расход W_t тп» и КПЭ «Расход $W_{эпс}$ », которая находится на уровне $R = 0,92$, отображается «уровнем взаимосвязи», значительно приближенной к нулевой оси «Расстояние объединений». Следующей по силе наблюдается взаимосвязь КПЭ «Расход W_t тп» с КПЭ «Работа $A_{э}$ » – $R = 0,88$ и с КПЭ «ГруОбТар Grt », – около $R = 0,7$.

На дендограмме КПЭ «Небаланс $W_{неб}$ » наиболее взаимосвязан с КПЭ «Производительность вагона». Уровень их связи по оси «Расстояние объединений» составляет 0,3, что соответствует $R = 0,7$. Из дендограммы установлено, что показатель «Уд. Расход W_t уд» наиболее сильно взаимосвязан с КПЭ «Участковая скорость» ($V_{уч}$ – скорость). Уровень их связи по оси «Расстояние объединений» составляет 0,65, что соответствует $R = 0,35$.

Выводы

1 В условиях широкого использования на железнодорожном транспорте цифровых технологий принятие решений об эффективности бизнес-процессов грузовых перевозок и энергообеспечения тяги поездов должно осуществляться с использованием моделей цифровых двойников анализируемых бизнес-процессов.

2 Исходя из матричного представления характера грузовых перевозок по направлениям тяжеловесного движения, предложено осуществлять формирование моделей цифровых двойников бизнес-процессов, в том числе и бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов на основании использования формата функционалов. Параметрическая оценка функционалов осуществляется методами идентификации.

3 Обоснование выбора ключевых показателей деятельности бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов на полигонах тяжеловесного движения, которые целесообразно использовать при построении цифровых двойников должно быть основано на анализе физической обоснованности и корреляционной взаимосвязи бизнес-процессов. КПЭ бизнес-процессов грузовых перевозок и других территориальных и обеспечивающих хозяйств, имеющие наиболее тесные взаимосвязи с КПЭ энергообеспечения тяги поездов – «приоритетные КПЭ», имеют большее предпочтение для включения их в «цифровую модель» исследуемого бизнес-процесса.

Список литературы

1 Распоряжение правительства от 19 марта 2019 года №466-р «Об утверждении долгосрочной Программы развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года». – URL: <http://d-russia.ru/utverzhdyon-plan-perehoda-rzhd-na-tsifrovuyu-zheleznuyu-dorogu.html> (дата обращения: 20.05.2023).

2 Якунин, В. Новая матрица управления холдингом / В. Якунин // РЖД-Партнер. – 2013. – № 3. – С. 12–15. – URL: <http://www.rzd-partner.ru/publications/rzd-partner/247/novaia-matritsa-upravleniia-kholdingom/> (дата обращения: 01.09.2023).

3 Митрофанов, А. Н. Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов: монография / А. Н. Митрофанов; М-во трансп. Российской Федерации, Федеральное агентство ж.-д. трансп., ГОУ ВПО СамГАПС. – Самара : СамГАПС, 2005. – 174 с. – ISBN 5-98941-020-4.

4 Усиление системы тягового электроснабжения при проведении поездов повышенной массы и длины : монография / А. Н. Митрофанов,

References

1 Government Decree dated March 19, 2019 No. 466-r “On Approval of the Long-Term Development Program of JSC Russian Railways until 2025”. – URL: <http://d-russia.ru/utverzhdyon-plan-perehoda-rzhd-na-tsifrovuyu-zheleznuyu-dorogu.html> (date of access: 05/20/2023).

2 Yakunin, V. New holding management matrix / V. Yakunin // RZD-Partner. – 2013. – No. 3. – P. 12–15. – URL: <http://www.rzd-partner.ru/publications/rzd-partner/247/novaia-matritsa-upravleniia-kholdingom/> (date of access: 09/01/2023).

3 Mitrofanov, A. N. Modeling of processes of forecasting and control of electric power consumption of train traction: monograph / A. N. Mitrofanov; M-in transp. Russian Federation, Federal Agency for railway transp., GOU VPO SamGAPS. – Samara : SamGAPS, 2005. – 174 p. – ISBN 5-98941-020-4.

4 Strengthening the system of traction power supply when carrying trains of increased mass and length : monograph / A. N. Mitrofanov, M. A. Garanin, E.

М. А. Гаранин, Е. В. Добрынин [и др.]; М-во трансп. Российской Федерации, Федеральное агентство ж.-д. трансп., ГОУ ВПО СамГАПС. – Самара : СамГАПС, 2006. – 156 с. – ISBN 5-98941-040-9.

5 Моделирование процессов электропотребления тяги поездов по участкам смежных железных дорог : монография / Е. В. Добрынин, А. Н. Митрофанов, О. В. Табаков; ФГБОУ ВО СамГУПС. – Самара : СамГУПС, 2011. – 88 с. – ISBN 978-5-98941-150-4.

6 Методика идентификации граничных эксплуатационных показателей пропускания тяжеловесных поездов по условиям электроснабжения / А. Н. Митрофанов, К. К. Утарбаев, С. А. Митрофанов, Н. С. Козлова // Вестник транспорта Поволжья. – № 2(80). Самара, 2020. – С. 27–35. – EDN WDYDUR.

7 Прогнозирование показателей энергообеспеченности перевозочного процесса на базе многофакторных моделей / А. Н. Митрофанов, Г. М. Третьяков, С. В. Копейкин // Электротехника. – № 3. – Москва : СамГУПС, 2017. – С. 12–17. – EDN XWVTVN.

8 Автоматизация диагностирования систем релейной защиты и автоматики электроустановок: монография / Ю. И. Жарков, В. Г. Лысенко, Е. А. Стороженко. – Москва : Маршрут, 2005. – 175 с. – ISBN 5-89035-253-9.

9 Цифровые технологии в автоматизированных системах электроснабжения железных дорог / Н. А. Попова, Ю. И. Жарков, О. В. Кубкина [и др.] // Транспорт : наука, образование, производство (Транспорт – 2019) : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. Том 4. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 110–114. – EDN TOAIAL.

10 **Жарков, Ю. И.** Система мониторинга, прогнозирования, раннего обнаружения и профилактики опасных внешних воздействий и дефектов в системах электроснабжения (проблемы и концепция) / Ю. И. Жарков, Е. П. Фигурнов // Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте : Тезисы докладов Третьего Международного симпозиума Eltrans'2005, Санкт-Петербург, 15–17 ноября 2005 года / Редакционная коллегия : д.т.н. В. В. Сапожников, д.т.н. А. Т. Бурков, д.т.н. А. В. Плакс, начальник службы технической политики Октябрьской ж.д. В. Н. Егоров. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2005. – С. 75. – EDN WKBKIN.

V. Dobrynin [et al.]; M-in transp. Russian Federation, Federal Agency for railway transp., GOU VPO SamGAPS. – Samara : SamGAPS, 2006. – 156 p. – ISBN 5-98941-040-9.

5 Modeling of train traction power consumption processes for sections of adjacent railways: monograph / E. V. Dobrynin, A. N. Mitrofanov, O. V. Tabakov; FGBOU VO SamGUPS. – Samara : SamGUPS, 2011. – 88 p. – ISBN 978-5-98941-150-4.

6 The methodology for identifying the boundary operational indicators of the passage of heavy trains according to the conditions of power supply / A. N. Mitrofanov, K. K. Utarbaev, S. A. Mitrofanov / Bulletin of Transport of the Volga Region. – No. 2(80). – Samara, 2020. – P. 27–35. – EDN WDYDUR.

7 Forecasting indicators of the energy supply of the transportation process on the basis of multifactorial models / A. N. Mitrofanov, G. M. Tretyakov, S. V. Kopeykin // Electrical engineering. – No. 3. – Moscow : SamGUPS, 2017. – P. 12–17. – EDN XWVTVN.

8 Automation of diagnosing systems of relay protection and automation of electrical installations : monograph / Yu. I. Zharkov, V. G. Lysenko, E. A. Storozhenko. – Moscow : Route, 2005. – 175 p. – ISBN 5-89035-253-9.

9 Digital technologies in automated railway power supply systems / N. A. Popova, Yu. I. Zharkov, O. V. Kubkina [et al.] // Transport : science, education, production (Transport – 2019) : collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019. V. 4. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – P. 110–114. – EDN TOAIAL.

10 **Zharkov, Yu. I.** System of monitoring, forecasting, early detection and prevention of dangerous external influences and defects in power supply systems (problems and concept) / Yu. I. Zharkov, E. P. Figurnov // Electrification and development of energy-saving infrastructure and electric rolling stock on railway transport: Abstracts of the Third International Symposium Eltrans'2005, St. Petersburg, November 15–17, 2005 / Editorial Board : Dr.Sc. V. V. Sapozhnikov, Doctor of Technical Sciences A. T. Burkov, Doctor of Technical Sciences A. V. Plaks, Head of the Technical Policy Service of the Oktyabrskaya Railway V. H. Egorov. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I Petersburg State University of Communications, 2005. – P. 75. – EDN WKBKIN.

11 Комплексное решение прикладных технологических задач автоматизации тягового электро-снабжения / Ю. И. Жарков, О. В. Кубкина, В. Г. Лысенко, Н. А. Попова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 130–139. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_130.

12 Предиктивный анализ работы технических средств электрифицированных железных дорог в целях повышения их надежности / П. А. Бодров, Ю. И. Жарков, А. Л. Ганашек // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(56). – С. 4–6. – EDN PEXXUJ.

13 Дисперсионная идентификация / Н. С. Райбман, В. В. Капитоненко, Ф. А. Овсепян, П. М. Варлаки; под редакцией Н. С. Райбмана. – Москва : Наука. Гл. ред. физико-математической литературы, 1981. – 336 с.

14 Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния / П. Эйкхофф, В. А. Лотоцкий, А. С. Мандель; под редакцией Н. С. Райбмана. – Москва : Мир, 1975. – 686 с.

11 Complex solution of applied technological problems of automation of traction power supply / Yu. I. Zharkov, O. V. Kubkina, V. G. Lysenko, N. A. Popova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1(81). – P. 130–139. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_130.

12 Predictive analysis of the work of technical means of electrified railways in order to improve their reliability / P. A. Bodrov, P. A. Bodrov, Yu. I. Zharkov, A. L. Ganashek // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 3(56). – P. 4–6. – EDN PEXXUJ.

13 Dispersion identification / N. S. Raibman, V. V. Kapitonenko, F. A. Ovsepyan, P. M. Varlaki; edited by N. S. Raibman. – Moscow : Science. Ch. ed. Physics and Mathematics Literature, 1981. – 336 p.

14 Fundamentals of Identification of Control Systems. Estimation of parameters and state / P. Eickhoff, V. A. Lototsky, A. S. Mandel; edited by N. S. Raibman. – Moscow : Mir, 1975. – 686 p.

A. N. Mitrofanov, Yu. I. Zharkov, S. A. Okladov

APPROACH TO BUILDING DIGITAL TWIN MODELS OF BUSINESS PROCESSES OF ENERGY SUPPLY FOR TRAIN TRACTION

Abstract. The paper presents an approach to building digital twins of business processes for energy supply of train traction at railway ranges. The approach is based on a matrix structure for representing the business processes of freight transportation and their provision by the central directorates of Russian Railways. It is proposed to use functionals as a form of constructing digital twins (models), and as parameters of the digital model are indicators that have the highest level of correlation with the actual indicator of energy supply for train traction. The following indicators of business processes were considered as electricity consumption for traction of trains; specific energy consumption for traction of trains; power imbalance; work in electric traction; local speed; average weight of a freight train and others.

Keywords: business-processes, energy supply for train traction, electricity consumption, digital twins, correlation analysis, identification methods.

For citation: Mitrofanov, A. N. Approach to building digital twin models of business processes of energy supply for train traction / A. N. Mitrofanov, Yu. I. Zharkov, S. A. Okladov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 92–102. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_92.

Сведения об авторах

Митрофанов Александр Николаевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», доктор технических наук, профессор, e-mail: almit77@mail.ru

Information about the authors

Mitrofanov Alexander Nikolaevich

Samara State Transport University (SSTU), Chair «Power Supply of Railway Transport», Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: almit77@mail.ru

Жарков Юрий Иванович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматизированные системы
электрообеспечения»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: zharkov43@gmail.com

Окладов Сергей Анатольевич

Самарский государственный университет путей
сообщения (СамГУПС),
кафедра «Электрообеспечение железнодорожного
транспорта»,
старший преподаватель,
e-mail: okladov@samgups.ru

Zharkov Yury Ivanovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Automated Power Supply Systems»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: zharkov43@gmail.com

Okladov Sergey Anatolievich

Samara state transport university (SSTU),
Chair «Power Supply of Railway Transport»,
Senior Lecturer,
e-mail: okladov@samgups.ru

А. Д. Петрушин, В. В. Ляхов, А. И. Меликов

ОПТИМАЛЬНЫЕ ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Аннотация. Статья посвящена исследованию режимов оптимального торможения асинхронным электроприводом с использованием принципа максимума. Критерием оптимизации выбран минимум квадрата питающего электродвигатель напряжения. Управляющими воздействиями являлись частота и амплитуда питающего напряжения. При расчетах использовалась математическая модель обобщенной электрической машины. Определено, что для случаев, когда требуется сокращение времени торможения асинхронного электропривода в соответствии с условиями работы электрооборудования, необходимо учитывать, что сокращение времени торможения приведет к увеличению электрических потерь в обмотках асинхронного двигателя и росту амплитудных значений тока и электромагнитного момента. Увеличение времени торможения позволит уменьшить электрические потери. Зависимость электрических потерь в обмотках асинхронного двигателя от времени оптимального торможения не линейна, следовательно, время торможения целесообразно выбирать на пологом участке этой зависимости.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, оптимизация, процесс торможения, потери в обмотках электродвигателя, электрическая энергия, энергоэффективность, принцип максимума, технологическое оборудование.

Для цитирования: Петрушин, А. Д. Оптимальные тормозные режимы работы асинхронного электропривода / А. Д. Петрушин, В. В. Ляхов, А. И. Меликов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 103–110. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_103.

Введение

Выбор типа электродвигателя для автоматизации технологических процессов представляет важную задачу, направленную на достижение высокого уровня производительности технологического оборудования. Системы электропривода с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором (АД) стали популярным выбором в различных промышленных сферах применения благодаря ряду их положительных качеств, в том числе и совместимости с системами автоматизации. Основными достоинствами АД являются их высокая энергоэффективность и надежность. В конструкции АД не используются дорогие постоянные магниты и нет каких-либо скользящих контактов как у синхронных машин или машин постоянного тока [1–2].

К настоящему времени накоплен большой опыт интеграции асинхронного электропривода (АЭП) в системы автоматизации технологических процессов. АЭП могут взаимодействовать с другими системами автоматизации по широко используемым протоколам связи. Такая совместимость позволяет эффективно управлять всем процессом производства [3–4].

Существует достаточно много промышленных предприятий, в производственных процессах которых автоматическое регулирование технологического параметра предполагает частое включение, отключение или переход электродвигателя с одной частоты вращения на другую. Это роботизированное изготовление узлов и деталей в машиностроении, автоматическое регулирование давления насосных агрегатов, автоматизация стана горячей прокатки металла и ряд других операций.

Повышение производительности труда и объема выпускаемой продукции может быть обеспечено за счет увеличения скорости протекания процессов. Часто процессы торможения электродвигателей относятся к непроизводительной части технологического цикла и снижают производительность оборудования. Остановить вращение АД за короткое время можно только учитывая некоторые ограничения. Основное ограничение связано с интенсивным выделением электрических потерь при торможении, которые нагревают проводники обмотки, что может привести к быстрому старению изоляции и ее повреждению. Также имеются ограничения по механической прочности узлов трансмиссии, обеспечивающей передачу механической энергии с вала АД к рабочему механизму. При быстром торможении АД следует принимать во внимание и энергоэффективность процесса торможения, то есть необходимость организовать процесс таким образом, чтобы энергия, накопленная во вращающемся роторе, в большей своей части вернулась в

источник питания. При использовании алгоритмов оптимизации в процессе управления АЭП можно обеспечить максимальную энергоэффективность процесса торможения АД.

Использование алгоритмов оптимизации в АЭП также имеет ряд ограничений. Поскольку управлять АЭП необходимо в режиме реального времени, то алгоритм не должен быть слишком сложным, чтобы дать возможность микропроцессорной системе успеть его реализовать за время торможения. С другой стороны, при сокращении времени торможения ощутимым становится влияние быстро протекающих электромагнитных переходных процессов, а их учет требует значительного увеличения количества решаемых дифференциальных уравнений и, соответственно, сложность реализации алгоритма многократно возрастает [5–7].

Основная часть

К настоящему времени качество работы силовых полупроводниковых приборов и промышленных микропроцессоров выросло настолько, что стало возможным на их основе реализовать достаточно сложные алгоритмы управления АЭП с учетом электромагнитных переходных процессов [8]. В данной статье предложен алгоритм реализации оптимальных тормозных режимов АЭП, который представляет из себя двухточечную задачу оптимального управления при минимизации функционала Φ .

$$\Phi = \int_0^T \gamma^2 dt \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где γ – относительное напряжение питания; t – текущее значение времени, T – период времени, в течение которого происходит торможение АЭП.

Такой алгоритм, как показали расчеты, позволяет существенно сократить электрические потери в АД. Для решения поставленной задачи оптимизации был использован принцип максимума Л.С. Понтрягина на базе математической модели обобщенной электрической машины [9]. Математическая модель описывает электромеханические и электромагнитные переходные процессы в АД и является жесткой, так как постоянные времени электромеханическая и электромагнитная отличаются более чем на порядок. При жестких математических моделях выбирают специальные алгоритмы решения дифференциальных уравнений с автоматическим выбором шага интегрирования, что в свою очередь требует значительных вычислительных ресурсов и быстродействия от технических средств реализации алгоритма.

Математическая модель обобщенной электрической машины представляет собой четыре дифференциальных уравнения для проекций токов статора и ротора на неподвижные относительно статора координатные оси α , β и одно уравнения движения [9]:

$$\begin{aligned} \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= \frac{L_r(u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) + M(u_{r\alpha} + R_r i_{r\alpha}) + Mp\omega(L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta})}{L_s L_r - M^2}, \\ \frac{di_{r\alpha}}{dt} &= \frac{-L_s(u_{r\alpha} + R_r i_{r\alpha}) + M(R_s i_{s\alpha} - u_{s\alpha}) - L_s p\omega(L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta})}{L_s L_r - M^2}, \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} &= \frac{L_r(u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) + M(u_{r\beta} + R_r i_{r\beta}) - Mp\omega(L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha})}{L_s L_r - M^2}, \\ \frac{di_{r\beta}}{dt} &= \frac{-L_s(u_{r\beta} + R_r i_{r\beta}) + M(R_s i_{s\beta} - u_{s\beta}) + L_s p\omega(L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha})}{L_s L_r - M^2}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{pM(i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) - M_c}{J}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}$ – проекции токов статора и ротора на координатные оси α и β ; $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ – проекции питающих напряжений на обмотках статора и ротора на координатные оси α и β ; L_s, L_r, M – индуктивности статора и ротора и взаимная индуктивность между статором и ротором; R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора; ω – угловая частота вращения; p – число пар полюсов АД; M_c – статический момент сопротивления на валу асинхронного двигателя.

Для удобства анализа и представлений результатов вычислений расчеты выполнялись в относительных единицах. Была принята следующая система базисных величин. $I_G = I_n \sqrt{2}$ – базисный ток.

$U_6 = U_n \sqrt{2}$ – базисное напряжение. $Z_6 = U_n / I_n$ – базисное сопротивление. $P_6 = 1,5 U_6 I_6$ – базисная мощность. $\omega_6 = 2 \pi f_n$ – базисная угловая частота вращения. $t_6 = 1 / \omega_6$ – базисное время.

Электромагнитный момент вычислялся из выражения

$$M_3 = M(i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (3)$$

Согласно алгоритму принципа максимума определена функция Гамильтона H

$$H = \gamma^2 \Psi_0 + i'_{s\alpha} \Psi_1 + i'_{r\alpha} \Psi_2 + i'_{s\beta} \Psi_3 + i'_{r\beta} \Psi_4 + v' \Psi_5. \quad (4)$$

В качестве управляющих воздействий приняты относительная частота α и относительная амплитуда питающего напряжения γ . Их оптимальные значения α^* и γ^* определялись из следующих выражений:

$$\frac{\partial H}{\partial f} = 0, \text{ откуда получаем } f^* = \frac{1}{t} \arctg \frac{\Psi_3 c - \Psi_4 d}{\Psi_1 c - \Psi_2 d}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \gamma} = 0, \text{ откуда получаем } \gamma^* = \frac{U_n}{2} [(\Psi_1 - \Psi_2 d) \cos(ft) + (\Psi_3 c - \Psi_4 d) \sin(ft)]. \quad (6)$$

Производные вспомогательных функций $\Psi_1 - \Psi_5$ в уравнении (4) определялись из выражений

$$\begin{aligned} \Psi'_1 &= \Psi_1 c R_s - \Psi_2 d R_s + \Psi_3 \omega d M - \Psi_4 \omega b M + \alpha \Psi_5 M i_{r\beta}; \\ \Psi'_2 &= -\Psi_1 d R_r + \Psi_2 b R_r + \Psi_3 \omega d L_r - \Psi_4 \omega b L_r - \alpha \Psi_5 M i_{s\beta}; \\ \Psi'_3 &= -\Psi_1 \omega d M + \Psi_2 \omega b M + \Psi_3 c R_s - \Psi_4 d R_s - \alpha \Psi_5 M i_{r\alpha}; \\ \Psi'_4 &= -\Psi_1 \omega d L_r + \Psi_2 \omega b L_r - \Psi_3 d R_r + \Psi_4 b R_r + \alpha \Psi_5 M i_{s\alpha}; \\ \Psi'_5 &= (\Psi_3 d - \Psi_4 b)(L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha}) - (\Psi_1 d - \Psi_2 b)(L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta}), \end{aligned} \quad (7)$$

где в уравнениях (5), (6) и (7) введены следующие обозначения:

$$a = \frac{p}{J}; \quad b = \frac{L_s}{L_s L_r - M^2}; \quad c = \frac{L_r}{L_s L_r - M^2}; \quad d = \frac{M}{L_s L_r - M^2}.$$

В уравнениях (7) требуется определить начальные значения вспомогательных функций $\Psi_1 - \Psi_5$ из условия, чтобы в конце переходного процесса торможения была получена нулевая частота вращения ротора АД. Для определения начальных значений вспомогательных функций был использован метод Ньютона – Рафсона [10].

Согласно методу Ньютона – Рафсона выражения для определения начальных условий вспомогательных функций $\Psi_1 - \Psi_5$ имеют следующий вид:

$$\Psi^{j+1}(0) = \Psi^j(0) - [K^j]^{-1} [y^{j+1}(T) - y^j(T)], \quad (8)$$

где $\Psi^{j+1}(0)$ – вектор-столбец начальных условий вспомогательных функций на последующей итерации; $\Psi^j(0)$ – вектор-столбец начальных условий вспомогательных функций на предыдущей итерации; $y^{j+1}(T)$ – вектор-столбец значений токов и частоты вращения $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}, \omega$ в конце переходного процесса на последующей итерации; $y^j(T)$ – вектор-столбец значений токов и частоты вращения $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}, \omega$ в конце переходного процесса на предыдущей итерации. В начале реализации метода Ньютона – Рафсона в дифференциальных уравнениях (7) начальные условия вспомогательных функций выбраны произвольными.

Для проведения расчетов оптимального торможения АД требуются начальные значения токов статора и ротора, которые были получены после расчета режима пуска для АД со следующими параметрами:

$$R_s = 0,067; \quad R_r = 0,06; \quad M = 2,35; \quad L_s = 2,42; \quad L_r = 2,47. \quad (9)$$

После окончания расчета режима пуска, значения токов статора и ротора были следующие:

$$i_a = -1,366; \quad i_b = 0,361; \quad i_c = 1,005. \quad (10)$$

Фазные токи i_a, i_b, i_c получены из проекций токов $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta}$ по следующим формулам [9]:

$$i_a = i_{s\alpha}; \quad i_b = -\frac{1}{2}i_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}; \quad i_c = -\frac{1}{2}i_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}. \quad (11)$$

Электрические потери в статоре и роторе за период торможения были рассчитаны по уравнению

$$\Delta P_{\text{э}} = \int_0^T i_{s\alpha}^2 R_s dt + \int_0^T i_{s\beta}^2 R_s dt + \int_0^T i_{r\alpha}^2 R_r dt + \int_0^T i_{r\beta}^2 R_r dt. \quad (12)$$

В зависимости от желаемого времени торможения меняются амплитудные значения токов и потери, выделяемые в обмотках статора и ротора. Для определения зависимости электрических потерь в статоре и роторе от времени оптимального торможения был выполнен ряд расчетов оптимального торможения, начиная от $T = 2$ о.е. до $T = 12$ о.е., результаты приведены на рис. 1.

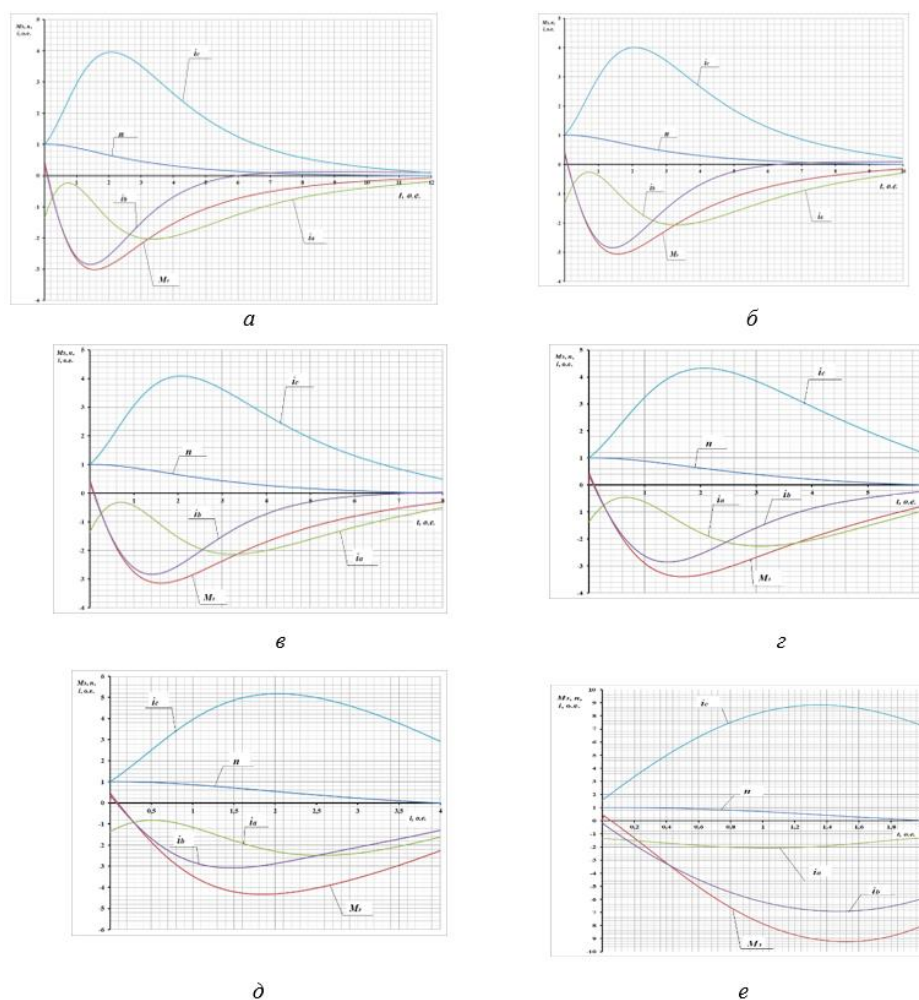


Рис. 1. Оптимальное торможение АД при разной интенсивности

Как видно из графиков *a–e*, сокращение времени оптимального торможения приводит к постепенному приближению параметров АД к ограничениям. На графике *a* при времени торможения 12 о.е. амплитуда тока фазы *C* (наибольшая из токов фаз АД) не превышает значения 4 о.е. (четырёх значений номинального тока), а электромагнитный момент не превышает 3 о.е. На графике *д* при времени торможения 4 о.е. амплитуда тока фазы *C* возрастает до 5,2 о.е., электромагнитный момент до 4.4 о.е., что в большинстве случаев работы технологического оборудования является нежелательным. Дальнейшее

сокращение времени оптимального торможения приводит к недопустимым амплитудным значениям тока и электромагнитного момента, что видно из графика *e*.

На рис. 2 приведен график зависимости электрических потерь в обмотках АД от времени оптимального торможения. Начиная от времени торможения 4 о.е. и далее до 12 о.е. потери изменяются незначительно. При необходимости сокращения времени торможения целесообразно выбирать значения близкие к 4 о.е., так как при меньшем времени существенно возрастают амплитудные значения токов и электромагнитного момента.

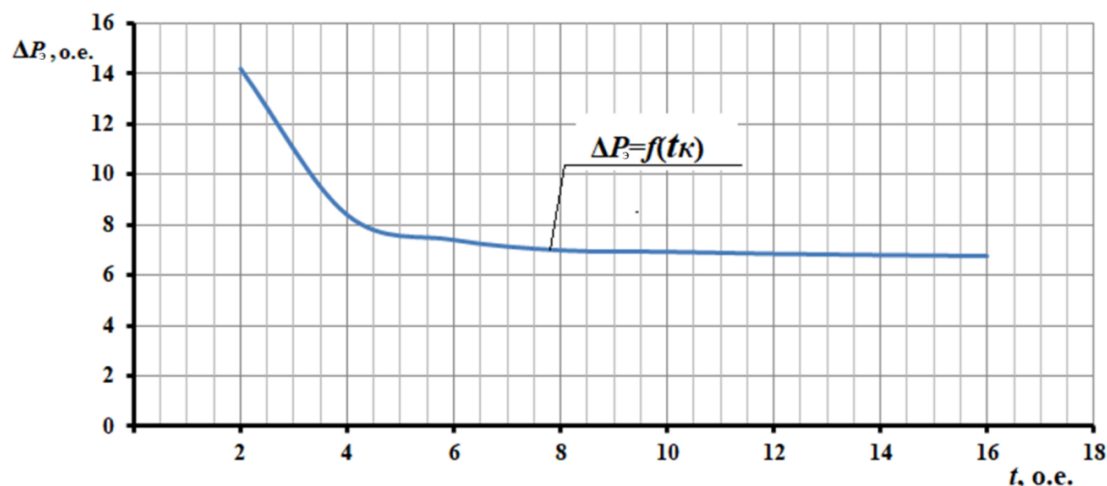


Рис. 2. Электрические потери в обмотках статора и ротора АД

В таблице приведены данные в относительных единицах по расчету электрических потерь в обмотках статора и ротора АД при оптимальном торможении. Электрические потери были рассчитаны по уравнению (12). Также в таблице приведены значения амплитуды тока фазы С (A_c), так как амплитуда тока в этой фазе наибольшая по сравнению с фазами А и В.

Параметры оптимального торможения

	Амплитуда тока фазы С, A_c , о.е.	Электрические потери в статоре, $\Delta P_{\text{с}}$, о.е.	Электрические потери в роторе, $\Delta P_{\text{р}}$, о.е.	Суммарные электрические потери, ΔP_3 , о.е.	Время торможения, t , о.е.
1	8,84	7,97	6,23	14,2	2
2	5,17	4,66	3,75	8,41	4
3	4,33	4,05	3,37	7,42	6
4	4,09	3,85	3,25	7,1	8
5	4,01	3,76	3,19	6,95	10
6	3,96	3,8	3,17	6,87	12

Как следует из данных таблицы, сокращение времени оптимального торможения с 12 о.е. до 4 о.е. приводит к увеличению электрических потерь АД примерно на 18 %. Несмотря на сокращение времени выделения потерь в обмотках АД в 3 раза (с 12 о.е. до 4 о.е.), электрические потери нарастают столь интенсивно, что результирующие электрические потери за время торможения 4 о.е. оказываются больше, чем за период торможения 12 о.е. В этом случае возникает опасность перегрева слоев изоляции непосредственно прилегающих к медным проводам статорной обмотки АД, так как отвод тепла представляет собой достаточно инерционный процесс и выделившаяся энергия в медных проводниках нагревает их быстрее, чем тепло отводится через слои изоляции и конструктивные элементы АД в окружающую среду.

В АД к основным потерям относят помимо электрических потерь и потери в стали, вызванные гистерезисом и вихревыми токами. Часто потери в стали рассчитывают по приближенным эмпирическим соотношениям, считая, что они пропорциональны частоте вращения в степени от 1,3 до 1,5. При корректно спроектированном АД в номинальном режиме электрические потери и магнитные потери

близки к друг другу. Но в переходных режимах это соотношение резко меняется в сторону электрических потерь из-за роста тока выше номинального. Из графиков $a-e$, изображенных на рис. 1, видно, что токи АД существенно выше номинальных, достигая в амплитудных величинах близко к четырехкратному значению. Учитывая, что электрические потери пропорциональны квадрату тока (12), в переходном процессе торможения эти потери значительно превосходят потери в стали. На нагрев слоев изоляции, примыкающих к медным проводникам, электрические потери имеют решающее значение. При выполнении более точных расчетов теплового состояния АД с учетом потерь в стали можно воспользоваться известными соотношениями. Особенности приведенного в данной статье алгоритма управления АД учитываются в этих соотношениях по частотным характеристикам.

Выводы

Задача оптимального торможения АЭП, решаемая с помощью уравнений (2)–(7) является двухточечной, то есть имеет две известные точки – время начала и окончания переходного процесса. В случаях, когда требуется сокращение времени торможения в соответствии с условиями работы электрооборудования, необходимо учитывать, что сокращение времени торможения приведет к увеличению электрических потерь в обмотках АД до максимального быстродействия, при котором наступают ограничения по амплитудным значениям тока и электромагнитного момента. Увеличение времени торможения приведет к уменьшению электрических потерь. Зависимость электрических потерь в обмотках АД от времени оптимального торможения не линейна (рис. 2), следовательно, время торможения целесообразно выбирать на пологом участке этой зависимости.

Предложенный алгоритм оптимального управления может быть использован для совершенствования АЭП, которые работают в частых переходных режимах с интенсивным торможением. Это АЭП электропоездов, электромобилей, робототехнических комплексов в машиностроении, разного рода манипуляторов с электрическим приводом, металлообрабатывающего оборудования и ряда других применений.

Список литературы

- 1 **Белов, М. П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2004. – 574 с. – ISBN 978-5-7695-4497-2.
- 2 **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Профессия, 2007. – 752 с. – ISBN 5-93913-035-6.
- 3 **Евсиков, А. А.** Автоматизированный электропривод с частотным управлением : учебное пособие / А. А. Евсиков, В. А. Коковин, А. П. Леонов. – Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2020. – 121 с. – ISBN 978-5-89847-592-5.
- 4 **Хатламаджиян, А. Е.** Применение современных цифровых технологий и технических средств для повышения безопасности и эффективности перевозочного процесса подвижного состава / А. Е. Хатламаджиян, И. А. Яицков, И. А. Степин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1(50). – С. 107–110. – ISSN 1818-5509.
- 5 **Шрейнер, Р. Т.** Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, Ю. А. Дмитренко. – Кишинев : Штиинца, 1982. – 224 с.
- 6 **Самосейко, В. Ф.** Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник

References

- 1 **Belov, M. P.** Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes: textbook for universities / M. P. Belov, V. A. Novikov, L. N. Rassudov. – 2nd ed., erased. – Moscow: Academy, 2004. – 574 p. – ISBN 978-5-7695-4497-2.
- 2 **Besekersky, V. A.** Theory of automatic control systems / V. A. Besekersky, E. P. Popov. – Ed. 4th, repr. and added. – Saint Petersburg : Profession, 2007. – 752 p. – ISBN 5-93913-035-6.
- 3 **Evsikov, A. A.** Automated electric drive with frequency control : textbook / A. A. Evsikov, V. A. Kokovin, A. P. Leonov. – Dubna : State University “Dubna”, 2020. – 121 p. – ISBN 978-5-89847-592-5.
- 4 **Khatlamadzhiyan, A. E.** The use of modern digital technologies and technical means to improve the safety and efficiency of the transportation process of rolling stock / A. E. Khatlamadzhiyan, I. A. Yaitskov, I. A. Stepin // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 1(50). – P. 107–110. – ISSN 1818-5509.
- 5 **Schreiner, R. T.** Optimal frequency control of asynchronous electric drives / R. T. Schreiner, Yu. A. Dmitrenko. – Chisinau : Stiintza, 1982. – 224 p.
- 6 **Samoseiko, V. F.** Optimal control of an asynchronous motor by the criterion of energy losses /

Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 775–788. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

7 **Фираго, Б. И.** К вопросу векторного управления асинхронными двигателями / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 5. – С. 5–16. – ISSN 1029-7448.

8 Оптимальное частотное управление асинхронными тяговыми электродвигателями электропоезда / А. Д. Петрушин, Т. С. Титова, В. В. Никитин, А. С. Мазнев // Электротехника. – 2021. – № 10. – С. 10–14. – ISSN 0013-5860.

9 **Копылов, И. П.** Математическое моделирование асинхронных машин : учебник для вузов / И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, Ф. Я. Беспалов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2001. – 327 с. – ISBN 5-06-003861-0.

10 **Hofer, E.** Numerische Methoden der Optimierung / E. Hofer, R. R. Lunderstadt // Oidenbourg Verlag Munchen Wien, 1975. – 192 p.

V. F. Samoseiko, V. O. Guskov // Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 775–788. – DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

7 **Firago, B. I.** On the issue of vector control of asynchronous motors / B. I. Firago, D. S. Vasiliev // Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2015. – No. 5. – P. 5–16. – ISSN 1029-7448.

8 Optimal frequency control of asynchronous traction electric motors of an electric train / A. D. Petrushin, T. S. Titova, V. V. Nikitin, A. S. Maznev // Electrical Engineering. – 2021. – No. 10. – P. 10–14. – ISSN 0013-5860.

9 **Kopylov, I. P.** Mathematical modeling of asynchronous machines. Studies. for universities. / I. P. Kopylov, F. A. Mammadov, F. Ya. Bepalov. – 3rd ed., repr. and added. – Moscow : Higher School, 2001. – 327 p. – ISBN 5-06-003861-0.

10 **Hofer, E.** Numerische Methoden der Optimierung / E. Hofer, R. R. Lunderstadt // Oidenbourg Verlag Munchen Wien, 1975. – 192 p.

A. D. Petrushin, V. V. Lyakhov, A. I. Melikov

OPTIMAL BRAKING MODES OF OPERATION OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

Abstract. The paper is devoted to the study of optimal braking modes by asynchronous electric drive using the maximum principle. The optimization criterion is the minimum square of the voltage supplying the electric motor. The controlling influences were the frequency and amplitude of the supply voltage. A mathematical model of a generalized electric machine was used in the calculations. It is determined that for cases when it is necessary to reduce the braking time of an asynchronous electric drive in accordance with the operating conditions of electrical equipment, it is necessary to take into account that reducing the braking time will lead to an increase in electrical losses in the windings of an asynchronous motor and an increase in the amplitude values of current and electromagnetic torque. Increasing the braking time will reduce electrical losses. The dependence of electrical losses in the windings of an asynchronous motor on the optimal braking time is not linear, therefore, it is advisable to choose the braking time on a flat section of this dependence.

Keywords: asynchronous electric drive, optimization, braking process, losses in the motor windings, electrical energy, energy efficiency, maximum principle, technological equipment.

For citation: Petrushin, A. D. Optimal braking modes of operation of asynchronous electric drive / A. D. Petrushin, V. V. Lyakhov, A. I. Melikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 103–110. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_103.

Сведения об авторах

Петрушин Александр Дмитриевич
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail : alex331685@yandex.ru

Ляхов Виктор Владимирович
ООО «ТМХ – Электротех»,

Information about the authors

Petrushin Alexander Dmitrievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and Cars Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail : alex331685@yandex.ru

Lyakhov Viktor Vladimirovich
TMH – Electrotech LLC,

Начальник бюро пуска наладки
и внедрения оборудования с ЧПУ
отдела главного технолога,
e-mail : Lyahovvv@nevz.com

Меликов Алимурад Иламинович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»,
аспирант,
e-mail: alimurad2015@yandex.ru

Head of the Bureau of Commissioning
and Implementation of CNC Equipment
of the Department of the Chief Technologist,
e-mail: Lyahovvv@nevz.com

Melikov Alimurad Paminovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and Cars Facilities»,
Postgraduate Student,
e-mail: alimurad2015@yandex.ru

В. С. Чаплыгин

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА РАБОТНИКОВ ХОЗЯЙСТВА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. Психологические аспекты безопасности трудовой деятельности становятся все более актуальными, несмотря на автоматизацию производственных процессов, человек был и остается постоянным участником и одновременно самым уязвимым элементом в системе «человек – машина». На сегодняшний день положение дел с производственным травматизмом в хозяйстве электрификации и электроснабжения свидетельствует о том, что уровень культуры безопасного труда не достиг того положения, когда безусловное выполнение основных требований безопасности является обязательным для всех работников. В статье рассмотрены вопросы формирования методики анализа и оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора как действенного инструмента по снижению травматизма.

Ключевые слова: система управления охраной труда, оценка профессиональных рисков, ранжирование, оценка влияния человеческого фактора, производственный травматизм, производственный процесс.

Для цитирования: Чаплыгин, В. С. Методика оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения / В. С. Чаплыгин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 111–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_111.

Введение

Анализ производственного травматизма в Трансэнерго показал, что в причинах травмирования персонала ключевое значение имеет влияние человеческого фактора. Детальное изучение человеческого фактора позволит разработать и реализовать наиболее эффективные меры, направленные на предупреждение травм и аварий в будущем [1].

Методика оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения (далее – Методика) дополняет установленный стандартом ОАО «РЖД» [2] метод оценки профессиональных рисков с учетом особенностей производственного процесса [3], опасностей и профессиональных рисков Трансэнерго.

Методика определяет порядок оценки профессиональных рисков и выявления опасных действий работников, явившихся причинами возникновения случаев травмирования работников хозяйства электрификации и электроснабжения.

Методика выполняет следующие функции:

- анализирует причины и последствия травм, нарушения требований охраны труда, наличие опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах на основе результатов специальной оценки условий труда работников Трансэнерго;
- реализует оценку уровней индивидуальных профессиональных рисков работников дистанции, учитывая особенности, способности и поведение человека в обычных и в нестандартных ситуациях и другие человеческие факторы;
- анализирует данные по производственному травматизму, вызванному влиянием человеческого фактора, в технологических процессах работы дистанции электроснабжения;
- на основании данных по анализу травмирования, причинами которого явились действия работников, реализует оценку причин опасных действий путем анкетирования работников по наиболее травмоопасным профессиям;
- предлагает рекомендации, реализация которых позволит минимизировать риск возникновения травм и аварий путем снижения влияния человеческого фактора.

Основная часть

Методика оценки рисков структурирована на базе требований, предъявляемых государственными и отраслевыми стандартами, и включает в себя установление заданных характеристик, идентификацию, оценку и обработку рисков (рис. 1).

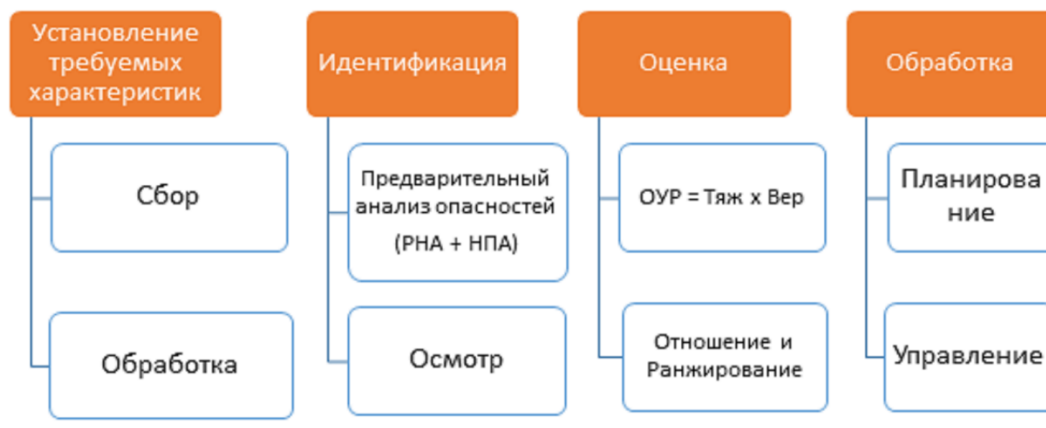


Рис. 1. Этапы проводимой оценки профессиональных рисков

Первый этап Методики состоит из описания алгоритма оценки рисков, ключевыми параметрами которого являются требования стандарта [2]. Оценка рисков в Трансэнерго представляет собой процесс определения уровня травматизма, профессиональной заболеваемости и уровня воздействия производственных факторов, отнесенных к категории опасных и вредных по результатам специальной оценки условий труда, с целью ранжирования [4] результатов оценки профессиональных рисков на уровне региональных дирекций и центрального филиала.

Для реализации оценки рисков по уровню травматизма необходимо учесть списочную численность подразделений хозяйства электрификации и электроснабжения и количество случаев травматизма. Дополнительно учитываются вид и тип происшествий, источник опасности и количество сложных метеоусловий.

По группе профессий со случаями производственного травматизма выполняется количественная оценка профессиональных рисков. По каждой группе профессий выполняется расчет численности за все годы анализа и расчет среднегодовой численности за период анализа.

Статистика травм собирается максимально за десятилетний период. Исходные данные, по которым выполнен расчет вероятностей появления травм, представлен на рис. 2.

Региональная дирекция: Горьковская НТЭ													
Группа профессий: ЭЛЕКТРОМОНТЕР, ЭЛЕКТРОМЕХАНИК, СЛЕСАРЬ - ЭЛЕКТРИК ПО РЕМОНТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ													
Данные на 12.2022г.													
Структурное подразделение	Период анализа данных	Среднегодовая численность	Количество сложных метеоусловий и сложных условий микроклимата на рабочем месте	Количество травмируемых работников из-за сложных метеоусловий и сложных условий микроклимата на рабочем месте	Бальная оценка влияния системы управления охраной труда по источникам активности (ОУ / ОУ)				Тип травмы	Происшествие	Вероятность получения травм	Вероятное количество травм за год	Уровень риска
					I11	I12	I13	I14					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Горьковская НТЭ	10	37	0 ()		- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые				
ЭЧ-1 Владимир	10	142	0 ()		- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые				
ЭЧ-10 Красноофимск (оценка проведена 01.02.2023 18:24)	10	111	10 (Жара, Холод, Ослепляющий свет, Снегопад, Ливне		- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые	Падение с высоты Пораж-е электротоком	0,00190 0,00380	0,21090 0,42180	Неприменимый в расчет Недопустимый
ЭЧ-12 Арамас (оценка проведена 12.02.2023 12:41)	10	141	0 ()		- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые	Пораж-е электротоком Вход перемещ. груз.	0,00071 0,00071	0,10011 0,10011	Не применимый в расчет Допустимый
ЭЧ-2 Горький (оценка проведена 25.01.2023 13:51)	10	282	0 ()		- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые	Укол разгр. остр. пред Пад-е на пов. передв.	0,00035 0,00035	0,09870 0,09870	Допустимый Допустимый
ЭЧ-3 Киров (оценка проведена 08.02.2023 09:58)	10	124			- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые	Пораж-е электротоком	0,00081	0,10044	Не применимый в расчет Допустимый
ЭЧ-4 Зуевка (оценка проведена 27.01.2023 15:25)	10	143			- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые	Пораж-е электротоком Пораж-е электротоком	0,00070 0,00070	0,10010 0,10010	Допустимый Допустимый
ЭЧ-5 Муром	10	117			- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые				
ЭЧ-7 Юдино (оценка проведена 28.02.2023 19:13)	10	275			- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые	Пораж-е электротоком	0,00036	0,09900	Допустимый
ЭЧ-8 Ижевск (оценка проведена 15.02.2023 14:01)	10	212			- / 1.0	- / 0.9	- / 1.0	- / 1.0	Легкие Тяжелые Смертельные Групповые	Пораж-е электротоком Пораж-е электротоком Пр. виды происш-й Падение с высоты Пораж-е электротоком	0,00094 0,00047 0,00047 0,00089	0,19928 0,09964 0,09964 0,18868	Не применимый в расчет Не применимый в расчет Допустимый Недопустимый

Рис. 2. Исходные данные по травматизму за десятилетний период анализа

Результатом анализа рисков является матрица рисков. На неё последовательно наносятся координаты появления рисков (легких, тяжелых, смертельных), групповых травм при различных происшествиях [2]. В зависимости от координаты определяется уровень профессионального риска (рис. 3).

Событие		Уровень риска			
		Легкие травмы	Тяжелые травмы	Смертельные травмы	Групповой случай
Частое	Групповые травмы	Yellow	Orange	Red	Red
	Смертельные				
	Тяжелые травмы				
	Легкие травмы				
Вероятное	Групповые травмы	Yellow	Orange	Yellow	Red
	Смертельные				
	Тяжелые травмы				
	Легкие травмы				
Случайное	Групповые травмы	Yellow	Yellow	Yellow	Red
	Смертельные				
	Тяжелые травмы				
	Легкие травмы				
Редкое	Групповые травмы	Green	Yellow	Orange	Yellow
	Смертельные				
	Тяжелые травмы				
	Легкие травмы				
Крайне редкое	Групповые травмы	Green	Yellow	Yellow	Orange
	Смертельные травмы				
	Тяжелые травмы				
	Легкие травмы				
Маловероятное	Групповые травмы	Green	Green	Yellow	Orange
	Смертельные травмы				
	Тяжелые травмы				
	Легкие травмы				

Уровень риска

Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый

- 1 - координата риска появления легких травм
 2 - координата риска появления тяжелых травм
 3 - координата риска появления смертельных травм
 4 - координата риска появления групповых случаев травмирования

Рис. 3. Матрица профессиональных рисков по группе профессий «Электромонтер, электромеханик, слесарь-электрик по ремонту»

Данные, представленные выше, получены в рамках реализации пилотного проекта по внедрению методики рисков в дистанциях электрификации и электроснабжения дирекций по энергообеспечению.

После определения уровня рисков по матрице, в которой учтены все случаи производственного травматизма за период анализа данных, формируется «Сводный реестр нежелательных и недопустимых рисков» [2] (рис. 4).

Сводный реестр недопустимых и нежелательных рисков									
ТРАНСЭНЕРГО - ФИЛИАЛ ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА "РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ"									
Структурное подразделение:									
(название структурного подразделения, дирекции)									
№	Профессия / Группа профессий	Вид происшествия / опасность	Тип травмы	Уровень риска	Источник активации опасностей	Условия активации опасностей	Название вредного фактора на рабочем месте (классы/подклассы условий труда)	Состояние барьеров безопасности	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Трансэнерго									
Октябрьская ПТЭ									
Горьковский ПТЭ									
ЭЧ-3 Киров									
1	ЭЛЕКТРОМОНТЕР, ЭЛЕКТРОМЕХАНИК, СЛЕСАРЬ - ЭЛЕКТРИК ПО РЕМОНТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	ПОРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОТОКОМ (включ. случ. с послед. пад. с выс. эл. ожог)	Групповые	Недопустимый	ИЗ-Явления, процессы, возникающие при взаимодействии людей	Неудовлетворительная организация и контроль за производством работ			
ЭЧ-12 Белгород									
1	ЭЛЕКТРОМОНТЕР, ЭЛЕКТРОМЕХАНИК, СЛЕСАРЬ - ЭЛЕКТРИК ПО РЕМОНТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	ПАДЕНИЕ ПОСТРАДАВШЕГО С ВЫСОТЫ (включая спрыгивание)	Тяжелые	Нежелательный	И1-Сам человек, его труд, деятельность, средства труда	Нарушения трудовой и производственной дисциплины			
ЭЧ-2 Волгоград									
1	ЭЛЕКТРОМОНТЕР, ЭЛЕКТРОМЕХАНИК, СЛЕСАРЬ - ЭЛЕКТРИК ПО РЕМОНТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	ПАДЕНИЕ ПОСТРАДАВШЕГО С ВЫСОТЫ (включая спрыгивание)	Смертельные	Недопустимый	И1-Сам человек, его труд, деятельность, средства труда	Нарушения трудовой и производственной дисциплины			
ЭЧ-2 Ачинск									
1	ЭЛЕКТРОМОНТЕР, ЭЛЕКТРОМЕХАНИК, СЛЕСАРЬ - ЭЛЕКТРИК ПО РЕМОНТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	ПОРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОТОКОМ (включ. случ. с послед. пад. с выс. эл. ожог)	Смертельные	Недопустимый	И1-Сам человек, его труд, деятельность, средства труда	Нарушения технологического (производственного) процесса			
2	ЭЛЕКТРОМОНТЕР, ЭЛЕКТРОМЕХАНИК, СЛЕСАРЬ - ЭЛЕКТРИК ПО РЕМОНТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	ДТП с личными транспортными средствами	Смертельные	Недопустимый	И1-Сам человек, его труд, деятельность, средства труда	Нарушения правил дорожного движения (автотранспорта)			

Рис. 4. Сводный реестр недопустимых и нежелательных рисков

Реестр рисков [2] формируется после того, как по всем предприятиям дирекции со случаями производственного травматизма будет выполнена количественная оценка профессиональных рисков, чтобы уровень рисков определялся по матрице, в которой учтены все случаи производственного травматизма за период анализа данных.

На втором этапе осуществляется оценка рисков возникновения несчастных случаев, вызванных опасными действиями человека. Для этого из сводного реестра нежелательных и недопустимых рисков определяются все несчастные случаи, где источник активации опасностей – деятельность человека.

Влияние фактора человеческого характера на возникновение аварий и травм [2, 11] определяется путем обработки сведений о сотрудниках, причастных к допущенным на производстве несчастным случаям в течение десятилетнего периода. Учитывается статистика персонала, причастного к несчастным случаям на производстве, включая оценку тяжести нарушений требований по охране труда, а также основных нарушений, которые повлияли на травмирование работников [5].

На основании полученных показателей появляется возможность обозначить категории психофизиологических причин нарушений требований охраны труда [5], а также причин действий персонала, отнесенных к категории опасных.

Определение рисков, вызванных влиянием человеческого фактора, осуществляется на основе психофизиологических качеств работников, мотивации к работе и квалификации, где именно мотивация является ключевым фактором. Отсутствие внутренней мотивации и готовности работников на соблюдение требований безопасности способствует снижению ответственности персонала за качественное исполнение поставленных задач и полноту их выполнения [3], а значит, возникает повышенный риск.

Оценка психологических и физиологических причин опасных действий работников осуществляется в два этапа:

1) определение категории психофизиологических причин нарушений требований охраны труда для всех работников, причастных к допущенным несчастным случаям;

2) установление причин, источником которых явились опасные действия работников.

Воздействие одной причины или группы непосредственных причин впоследствии вызывает опасные действия персонала, участвующего в производственном процессе.

Основные категории непосредственных причин опасных действий работников представлены таблице.

Категория	Причины опасных действий
К (квалификация)	Не умеет: ► отсутствие профессиональных знаний ► отсутствие требуемых навыков для выполнения работ ► неспособность к обучению, запоминанию, самообучению
М (мотивация)	Не хочет: ► негативная установка на исполнение обязанностей ► подверженность рисковому действиям ► безалаберность ► пассивность ► халатность ► высокая осознанность риска и склонность к совершению опасных действий
F (выполнение функций)	Не может: ► краткосрочное или беспреданное недомогание, усталость, неустойчивое психическое состояние ► страх перед выполнением работ ► слабая физическая подготовка ► заторможенность реакций
P (производственная среда)	Не обеспечен: ► средствами защиты, инструментом, необходимыми для безопасного ведения работ ► информацией о наличии рисков при выполнении технологических операций ► санитарно-бытовыми и санитарно-гигиеническими условиями

Описанные в таблице категории опасных действий характеризуются как первопричины к развитию более высокого уровня причин, которые относятся к области организации и администрирования производственного процесса [10].

По результатам анализа возникновения несчастных случаев, вызванных влиянием человеческого фактора, производится расчет возможности появления травмы.

Возможность травмы по результатам оценки влияния ЧФ рассчитывается ($P_{чф}$) по формуле

$$P_{чф} = \frac{B}{B_1 + B_2 + \dots + B_n} \times 100\% ,$$

где B – коэффициент ответственности отдельного причастного к НС работника (балл);

n – количество лиц, причастных к НС.

При значении коэффициента $P_{чф} > 10\%$ проводится детализированная оценка рисков на основе влияния человеческого фактора, которая подразумевает оценку действий каждого работника анализируемой профессии.

По каждой причине выводится средняя оценка. Непосредственная причина принимается действующей, если средняя оценка для этой причины превышает значение 3 баллов (более 50 %).

При установлении процента уверенности выше 50 в проявлении одной или нескольких причин опасных действий на предприятии предлагается организовать проведение поведенческого аудита безопасности труда.

Поведенческий аудит безопасности труда [9] – это эффективный и многофункциональный инструмент, включающий в себя:

- проведение тестирования работника на уровень его профессиональных знаний и способностей;
- проведение поведенческого интервью для оценки личностных качеств и поведенческих стереотипов, которые могут быть причинами создания опасных ситуаций.
- исследование действий работника в период выполнения трудовых функций, в том числе наблюдение за его рабочим местом [9, 12].

Тесты профессиональных знаний, в том числе тесты на знания требований охраны труда формируются для каждой профессии в объеме правил, инструкций, технологических карт, необходимых для обеспечения безопасной работы.

Тесты профессиональных способностей формируются в объеме корпоративных требований к квалификации работников компании «РЖД» с высшим и средним профессиональным образованием.

При поведенческом интервью [9] проводится опрос работников в устной форме не о гипотетических проблемах, а о реальных, которые работник решал в своей работе. Такой метод выявляет то, как работник справляется с определенными рабочими задачами.

Наблюдение за сотрудниками – это основной этап поведенческого аудита [9]. Оно может быть организовано следующим образом. Работники уведомляются о проведении наблюдения с учетом того, что его целью является не наказание, а совершенствование условий рабочего процесса и повышение уровня защиты сотрудника. Соответственно, наблюдение должно быть организовано в соответствии с трудовым законодательством с применением устройств, обеспечивающих дистанционную видео-, аудиофиксацию процессов производства работ непосредственно при выполнении производственных функций. В ходе наблюдения обращается внимание как на детали, так и на рабочий процесс в целом [12].

На основании полученного результата необходимо разобрать действия работника, при этом важно отмечать не только негативное поведение, а обращать внимание еще и на грамотность и положительные, безопасные действия.

Предложенные методы позволяют выявить персонал с неустойчивым психическим состоянием в стрессовых ситуациях выполнения работы [8], оптимально расставить кадры с учетом профессионально важных качеств, создать благоприятный психологический климат в коллективе, в том числе повысить качество условий труда и сократить риск получения травм.

Практическое доказательство эффективности использования компетентного подхода к повышению ответственности, мотивации и квалификации персонала в границах управления влиянием человеческого фактора позволило использовать данный инструмент как основу для формирования необходимых для безопасного ведения работ свойств человеческого фактора.

Выводы

Реализация Методики решит следующие ключевые задачи в системе управления охраной труда:

- выявление личностных и профессиональных составляющих человеческого фактора, определяющих возможность участвовать в трудовом процессе с установленными трудовым законодательством параметрами безопасности и эффективности;
- повышение культуры безопасности труда, включающее развитие профессиональных компетенций рабочих и руководителей среднего звена в области обеспечения нулевого травматизма на предприятиях Трансэнерго [6];
- реализация психофизиологического обеспечения [7], а именно проведение детализированного профессионального отбора.

Список литературы

- 1 **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 : Стандартинформ, 2020. – 90 с.
- 2 Распоряжение ОАО «РЖД» от 29.12.2017 № 2805/р об утверждении СТО РЖД 15.014-2017. Система управления охраной труда в ОАО «РЖД». Управление профессиональными рисками. Общие положения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/556523015> (дата обращения: 01.09.2023).
- 3 Рекомендации по совершенствованию СУОТ на предприятии: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Охрана труда и техносферная безопасность на объектах промышленности, транспорта и социальных инфраструктур», Пенза,

References

- 1 **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.
- 2 Order of JSC "Russian Railways" dated 29.12.2017 No. 2805/r on the approval of the Russian Railways Service Station 15.014-2017 Occupational safety management System in JSC "Russian Railways". Professional risk management. General provisions. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556523015> (date of access: 09/01/2023).
- 3 Recommendations for improving the management system at the enterprise: collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Occupational safety and Technosphere safety at industrial, transport and social infrastructure facilities", Penza, February 16-17, 2022 – Penza : PGAU, 2022. – P. 64–67. – EDN QVTRCO.

16–17 февраля 2022 г. – Пенза : ПГАУ, 2022. – С. 64–67. – EDN QVTRCO.

4 **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 : Стандартинформ, 2019. – 23 с.

5 Методика оценки влияния человеческого фактора на возникновение случая травмы на производстве и определения доли ответственности причастных работников к этому событию, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 06 декабря 2016 года № 2467.

6 Основные направления совершенствования системы подготовки кадров, обеспечивающих безопасность производственных процессов / В. И. Апатцев, В. А. Аксенов, Д. Л. Раенок, А. М. Завьялов // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 1. – С. 93–97. – ISSN 2074-9325.

7 Техносферная безопасность городских агломераций : сборник международной школы-конференции, Москва, 14–16 декабря 2020 года. – Москва : Российский университет транспорта, 2021. – 559 с. – ISBN 978-5-7473-1085-8.

8 **Дашкина, А. Р.** Влияние стрессоустойчивости на действия работников в условиях аварий на опасных производственных объектах / А. Р. Дашкина, Е. Э. Леонова // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сборник материалов V Международной научно-практической конференции; ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Иваново, 2021. – С. 421–427. – ISBN 978-5-907353-22-0.

9 **Салтыкова, Ю. А.** Интервью по получению поведенческих примеров как эффективный метод оценки компетенций сотрудников объектах / Ю. А. Салтыкова // EUROPEAN RESEARCH : INNOVATION IN SCIENCE : статья в сборнике материалов XXIV Международной научно-практической конференции; МАДИ Московский государственный технический университет. – Москва, 2017. – С. 281–286.

10 Модель влияния человеческого фактора на возникновение несчастных случаев на производстве: сборник научных статей национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы техносферной безопасности». Москва, 06–12 марта 2019 г. – Москва : РУТ МИИТ, 2019. – С. 66–72. – EDN PJYGD1.

11 **Косякин, В. С.** Выявление и оценка влияния человеческого фактора в кумулятивной модели возникновения несчастного случая на предприятиях железнодорожного транспорта

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

5 Methodology for assessing the impact of the human factor on the occurrence of an injury at work and determining the share of responsibility of employees involved in this event, approved by the Order of JSC "Russian Railways" dated December 06, 2016 No. 2467.

6 The main directions of improving the system of training personnel ensuring the safety of production processes / V. I. Apattsev, V. A. Aksenov, D. L. Raenok, A.M. Zavyalov // Science and technology of transport. – 2014. – No. 1. – P. 93–97. – ISSN 2074-9325.

7 Technosphere safety of urban agglomerations: Collection of the International school-conference, Moscow, December 14–16, 2020. – Moscow : Russian University of Transport, 2021. – 559 p. – ISBN 978-5-7473-1085-8

8 **Dashkina, A. R.** The influence of stress resistance on the actions of workers in the conditions of accidents at hazardous production facilities / A. R. Dashkina, E. E. Leonova // Modern fireproof materials and technologies : collection of materials of the V International Scientific and Practical Conference; Ufa State Oil University technical university. – Ivanovo, 2021. – P. 421–427. – ISBN 978-5-907353-22-0.

9 **Saltykova, Yu. A.** Interview on obtaining behavioral examples as an effective method of assessing the competencies of employees of facilities / Yu. A. Saltykova // EUROPEAN RESEARCH : INNOVATION IN SCIENCE : an article in the collection of materials of the XXIV International Scientific and Practical Conference; Moscow State Technical University. – Moscow, 2017. – P. 281–286.

10 A model of the influence of human factor on the occurrence of accidents at work : Collection of scientific articles of the National Scientific and Practical conference "Actual problems of technological security". Moscow, March 06–12, 2019. – Moscow : RUT MIIT, 2019. – P. 66–72. – EDN PJYGD1.

11 **Kosyakin, V. S.** Identification and assessment of the human factor influence in the cumulative accident occurrence model at railway transport enterprises / V. S. Kosyakin, Z. P. Oshchepkov,

/ В. С. Косякин, З. П. Ощепков, А. М. Завьялов // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 4. – С. 94–103. – ISSN 2074-9325.

12 **Хайрулина, Л. И.** Системные действия в управлении охраной труда: поведенческий аудит и его практическая реализация / Л. И. Хайрулина, М. А. Чижова // Вестник технологического университета. – 2017. – № 11. – С. 121–124. – ISSN 1998-7072.

A. M. Zavyalov // Science and Technology of Transport. – 2019. – No. 4. – P. 94–103. – ISSN 2074-9325.

12 **Khairulina, L. I.** Systemic actions in occupational safety management: behavioral audit and its practical implementation / L. I. Khairulina, M. A. Chizhova // Bulletin of the Technological University. – 2017. – No. 11. – P. 121–124. – ISSN 1998-7072.

V. S. Chaplygin

METHODOLOGY FOR ASSESSING OCCUPATIONAL RISKS USING THE INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR EMPLOYEES OF THE ELECTRIFICATION AND POWER SUPPLY FACILITIES

Abstract. Psychological aspects of work safety are becoming more and more relevant, despite the automation of production processes, a person has been and remains a constant participant and at the same time the most vulnerable element in the "man-machine" system. To date, the state of affairs with industrial injuries in the electrification and electricity supply economy indicates that the level of safe work culture has not reached the point where unconditional fulfillment of the basic safety requirements is mandatory for all employees. The paper discusses the issues of formation of methods of analysis and assessment of occupational risks using the influence of the human factor as an effective tool to reduce injuries.

Keywords: occupational safety management system; occupational risk assessment, ranking, human factor impact assessment, occupational injuries, production process.

For citation: Chaplygin, V. S. Methodology for assessing occupational risks using the influence of the human factor employees of the electrification and power supply facilities / V. S. Chaplygin, V. A. Aksenov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 111–118. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_111.

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

Information about the authors

Chaplygin Vladimir Sergeevich

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

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

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 621.37/.39.001.5 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_119

В. И. Куштин, П. Н. Щербак, Т. М. Пимшина, С. Е. Турчик

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫСОКОТОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ, АСТРОНОМИЧЕСКИХ И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация. Учет влияния атмосферы на результаты астрономических, геодезических, фотограмметрических работ, а также дистанционного зондирования является актуальной задачей при реализации различных научных и практических проектов современности. Использование современных средств и методов геодезических измерений, изменяющиеся параметры атмосферы Земли вследствие природных и антропогенных процессов, повышение требований к точности полученных результатов обуславливают необходимость разработки более совершенных способов учета влияния рефракции и замедления скорости электромагнитных волн на точность измерений как в световом, так и в радиодиапазоне. В работе показана необходимость учета влияния рефракции на измеряемые расстояния при зенитных расстояниях более 45 градусов. Предложена формула для высокоточного определения поправок из-за влияния рефракции в измеренные радиооптическими системами расстояния.

Ключевые слова: атмосфера, рефракция, задержка радиосигнала, поправки в дальности, модели атмосферы, электромагнитные волны.

Для цитирования: Учет влияния атмосферы на результаты высокоточных геодезических, астрономических и фотограмметрических измерений / В. И. Куштин, П. Н. Щербак, Т. М. Пимшина, С. Е. Турчик // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 119–124. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_119.

Введение

Практически все астрономические и геодезические измерения выполняются в атмосфере Земли. Материалы фотограмметрических работ получают с носителей, которые располагаются или в атмосфере Земли, или, при космических съемках, за пределами атмосферы. В обоих случаях проектирующие лучи, строящие изображение на снимке в определенном диапазоне спектра электромагнитного излучения, проходят через часть или всю атмосферу. В основном все измерения, выполняемые в астрономии, геодезии, фотограмметрии и других смежных областях знаний, подвержены влиянию атмосферы.

Точность современных приборов для измерения длин и углов является высокой, но она в значительной мере снижается вследствие недостаточно точного учета влияния атмосферы на результаты измерений. Поэтому теоретические разработки и экспериментальные исследования, связанные с учетом влияния атмосферы на результаты высокоточных измерений, имеют большое теоретическое и практическое значение.

Вопросами учета оптической рефракции в астрономии занимаются уже несколько столетий. Имеется много теоретических и экспериментальных разработок, направленных на высокоточное определение углов астрономической рефракции. Следует заметить, что большие достижения в этих исследованиях имеют ученые России, о чем свидетельствует то, что «Таблицы рефракции Пулковской обсерватории», пятое издание которых вышло в 1985 году (четыре прежних издания были в 1870, 1905, 1930 и 1956 годах) [1], являются международными и используются всеми астрономическими обсерваториями мира.

В связи с возможностью выполнять измерения астрономическими приборами с точностью до 0,01" и выше возникает необходимость более точного определения и учета углов астрономической рефракции, что является весьма сложной задачей, особенно при больших зенитных расстояниях.

Основная часть

Вопросами учета оптической рефракции в геодезии занимаются несколько столетий как в нашей стране, так и за рубежом. Большое число теоретических и экспериментальных исследований, которые довольно подробно рассмотрены в работах [2–7], показывает сложность решения проблемы

рефракции, особенно в приземном слое, в котором состояние атмосферы зависит от многих факторов, учесть которые весьма сложно.

Измерение расстояний свето- и радиодальномерами основано на определении времени t распространения электромагнитных волн (ЭМВ) вдоль измеряемой линии в прямом и обратном направлениях и вычислении длины линии по формуле:

$$S = \frac{c t}{n^2},$$

где $c = 299792,458$ км/с – скорость ЭМВ в вакууме; n – среднеинтегральный коэффициент преломления атмосферной среды на трассе ЭМВ. Обычно полагают $n = (n_1 + n_2)/2$, где n_1, n_2 – коэффициенты преломления, определенные в начальной и конечной точках трассы. В действительности $n \neq (n_1 + n_2)/2$, особенно для наклонных трасс [8].

В фотограмметрии полагают, что проектирующие лучи, строящие изображение на снимке, являются прямыми. Проходя через атмосферные слои с различными коэффициентами преломления, проектирующие лучи искривляются, и вследствие этого происходит смещение точек снимка, которое необходимо учитывать [9]. Кроме того, если приемник ЭМВ, например, аэрофотоаппарат, находится внутри носителя, где атмосферные условия отличаются от условий внешней атмосферы, то возникает дополнительное искривление проектирующих лучей, называемое внутренней рефракцией.

Следовательно, если до сравнительно недавнего времени вопросами учета рефракции в оптическом диапазоне излучения ЭМВ занимались в основном в астрономии, то в настоящее время в связи с развитием традиционных научных знаний и появлением новых научных дисциплин, таких как космическая геодезия, космическая фотограмметрия, дистанционное зондирование и других, возникает необходимость более точного определения углов рефракции при решении традиционных задач и изучения вопроса распространения ЭМВ в атмосфере при решении новых проблем [10].

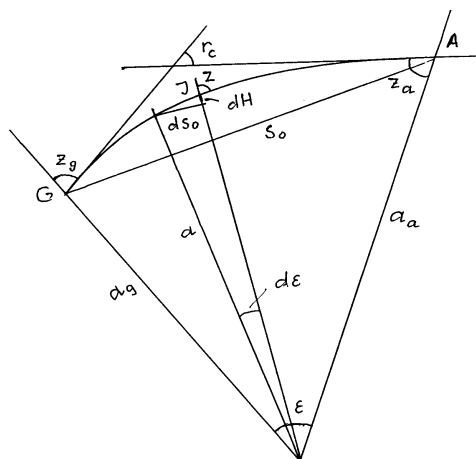


Рис. 1. К выводу формулы поправки из-за кривизны трассы ЭМВ

Из-за влияния атмосферной рефракции путь, пройденный ЭМВ, является кривой – линия GJA на рис. 1 [11], от длины S которой нужно перейти к прямой $GA = S_0$. На рис. 1 в соответствии с теоремой косинусов:

$$S_0 = \sqrt{a_g^2 + a_a^2 - 2a_g a_a \cos \epsilon},$$

где $a_g = R_{0g} + H_g$, $a_a = R_{0a} + H_a$; a_g, a_a – средние радиусы кривизны Земли в начальном пункте G и конечном A ; R_{0g}, R_{0a} – средние радиусы кривизны эллипсоида по направлениям на пункты A и G ; H_a, H_g – геодезические высоты пунктов A и G ; ϵ – угол между направлениями на пункты A и G с вершиной в точке пересечения большой и малой осей эллипсоида.

Средний радиус кривизны равен среднеарифметическому из всех радиусов кривизны нормальных сечений R_A эллипсоида в данной точке, проведенных с интервалом ΔA , где A – истинный азимут, т. е. $R_0 = \frac{1}{n} \sum_1^n R_A$. R_A – радиус произвольного нормального сечения определяется по формуле Эйлера.

$$R_A = \frac{N}{1 + e'^2 \cos^2 B \cos^2 A}; N = \frac{a}{\sqrt{1 - e'^2 \sin^2 B}}; e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}; e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2},$$

где a, b – большая и малая полуоси эллипсоида; B и A – геодезическая широта и азимут направления соответственно; e, e' – первый и второй эксцентриситеты эллипсоида. Поверхность земного эллипсоида образуется путем вращения эллипса вокруг малой оси. Параметры эллипсоида вращения подбираются под условием наилучшего соответствия фигуре геоида. Вычисления в работе выполнены для параметров эллипсоида Красовского.

Так как $\cos \varepsilon = 1 - 2\sin^2 \frac{\varepsilon}{2}$, то

$$S_0 = \sqrt{a_g^2 - 2a_g a_a + a_a^2 + 4a_g a_a \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}}.$$

Учитывая высоты начальной и конечной точек траектории, получим:

$$S_0 = \sqrt{(H_a - H_g)^2 + 4a_g a_a \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}}. \quad (1)$$

Угол ε , выраженный в секундах дуги, при том, что $d\varepsilon = \frac{dS_0}{a} = \frac{\operatorname{tg} z}{a} dH$, будет равен:

$$\varepsilon = \rho'' \int_{H_g}^{H_a} \frac{\operatorname{tg} z}{a} dH = \rho'' \int_{H_g}^{H_a} \frac{\operatorname{tg} z}{a_g + H} dH = \frac{\rho''}{a_g} \int_{H_g}^{H_a} \frac{\operatorname{tg} z}{1 + \frac{H}{a_g}} dH. \quad (2)$$

Входящие в формулу (2) $\rho'' = 206265''$ – величина радиана в секундах, а зенитное расстояние z для сферической модели атмосферы

$$\sin z_i = \frac{(R+H_g)(1+10^{-6}N_g)\sin z_g}{(R+H)(1+10^{-6}N)} = \frac{(R+H_a)(1+10^{-6}N_a)\sin z_a}{(R+H)(1+10^{-6}N)},$$

где H_g, H_a – высоты, z_g, z_a – зенитные расстояния, N_g, N_a – индексы преломления в начальной и конечной точках трассы; H, N, z – те же значения в текущих точках траектории ЭМВ.

Значения ε можно определить методом численного интегрирования или в соответствии с рис. 1 по формуле

$$\varepsilon = z_g + r_c - z_a, \quad (3)$$

где r_c – угол полной рефракции:

$$r_c = -10^{-6} \rho'' \int_{H_g}^{H_a} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{n} dN. \quad (4)$$

В формуле (4) угол φ для сферической модели атмосферы будет равным зенитному расстоянию. При использовании моделей атмосферы с изодиоптрическими слоями, т.е. слоями с одинаковым коэффициентом преломления, φ – угол между нормалью к изодиоптрической поверхности и трассой ЭМВ.

Анализ реализации формул (1)–(4) позволяет сделать вывод о том, что для определения S_0 с миллиметровой точностью (до 1 мм), с соответствующей точностью должны быть определены и значения входящих в формулу (1) аргументов, например, углы ε до $(3 \cdot 10^{-5})''$, что является существенным недостатком данного решения. Авторами предложено следующее решение.

В соответствии с рис. 2: $dS_0 = dS \cos(r_g - r_{ci}) = dS \left(1 - 2\sin^2 \frac{r_g - r_{ci}}{2}\right)$.

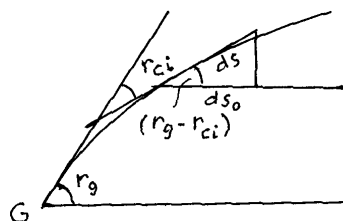


Рис. 2. К определению поправки ΔS в дальность из-за влияния рефракции

Интегрируя, с учетом $dS = dH \sec z$ имеем:

$$S_0 = S - 2 \int_0^S \sin^2 \frac{r_g - r_{ci}}{2} dS = S - 2 \int_0^H \sin^2 \frac{r_g - r_{ci}}{2} \sec z dH = S - \frac{1}{2} \int_0^H (r_g - r_{ci})^2 \sec z dH.$$

Тогда

$$\Delta S = S_0 - S = - \int_0^H \left(\frac{r_g - r_{ci}}{291,7} \right)^2 \sec z dH, \quad (5)$$

где ΔS – в мм, углы земной r_g и полной r_{ci} рефракции – в секундах дуги, dH – в км.

В ходе исследования для условий стандартной атмосферы ГОСТ 4401-81 методом численного интегрирования формулы (5) получены значения $-\Delta S$, мм, приведенные в таблице. Величины углов r_g и r_{ci} взяты из работы [8].

Значения $-\Delta S$, мм для зенитных расстояний 45, 70 и 80° и различных высот

H, км	Зенитные расстояния z_g , градусы			
	45	70	80	87
5	0,01	0,22	1,8	
10	0,05	0,82	6,6	168,8
40	0,36	5,45	40,9	
100	0,90	13,5	93,0	722,8

Выводы

Данные таблицы показывают необходимость учета поправок в дальности из-за влияния рефракции при зенитных расстояниях более 45°, для определения которых с высокой точностью можно использовать предложенное решение.

Список литературы

- 1 Таблицы рефракции Пулковской обсерватории. – Ленинград : Наука, 1985.
- 2 Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения / А. Л. Островский, Б. М. Джуман, Ф. Д. Заблоцкий [et al.]. – Москва : Недра, 1990.
- 3 **Angus-Leppan, P. V.** Surface effects on refraction in precise levelling / P. V. Angus-Leppan // Conference on Refraction Effects in Geodesy & Conference on Electronic Distance Measurement 5–8 Nov. 1968, Univ. of N. S. W. – New South Wales (Australia), 1969. – P. 74–89.
- 4 **Parkinson, B. U.** Decade of the NAVSTAR Global Navigation System Development Program (Moscow, World) / B. U. Parkinson // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 1984. – Vol. 71, No. 10.
- 5 **Мозжухин, О. А.** К анализу путей развития проблемы учёта рефракции в нивелировании / О. А. Мозжухин // Геодезия и картография. – 2016. – Т. 77, № 11. – С. 16–19. – DOI 10.22389/0016-7126-2016-917-11-16-19.
- 6 **Мозжухин, О. А.** Рефракция в двустороннем тригонометрическом нивелировании. Определение поправок / О. А. Мозжухин // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 4. – С. 8–13. – DOI 10.22389/0016-7126-2018-934-4-8-13.

References

- 1 Refractive tables of the Pulkovo Observatory. – Leningrad : Nauka, 1985.
- 2 Taking into account atmospheric influences on astronomical and geodetic measurements / A. L. Ostrovskiy, B. M. Dzhuman, F. D. Zablokiy [et al.]. – Moscow : Nedra, 1990.
- 3 **Angus-Leppan, P. V.** Surface effects on refraction in precise levelling / P. V. Angus-Leppan // Conference on Refraction Effects in Geodesy & Conference on Electronic Distance Measurement 5–8 Nov. 1968, Univ. of N. S. W. – New South Wales (Australia), 1969. – P. 74–89.
- 4 **Parkinson, B. U.** Decade of the NAVSTAR Global Navigation System Development Program (Moscow, World) / B. U. Parkinson // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 1984. – Vol. 71, No. 10.
- 5 **Mozzhuhin, O. A.** On the analysis of the ways of development of the problem of accounting for refraction in leveling / O. A. Mozzhuhin // Geodeziya i kartografiya. – 2016. – Vol. 77, No. 11. – P. 16–19. – DOI 10.22389/0016-7126-2016-917-11-16-19.
- 6 **Mozzhuhin, O. A.** Refraction in bilateral trigonometric leveling. Definition of amendments popravok / O. A. Mozzhuhin // Geodeziya i kartografiya. – 2018. – Vol. 79, No. 4. – P. 8–13. – DOI 10.22389/0016-7126-2018-934-4-8-13.

7 **Куштин, В. И.** Определение поправок в дальности при измерениях электрооптическими системами / В. И. Куштин, С. Е. Турчик, П. Н. Щербак // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4. – С. 247–255. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_247.

8 Оптическая рефракция в земной атмосфере (наклонные трассы) / А. В. Алексеев, М. В. Кабанов, И. Ф. Куштин [et al.]. – Новосибирск : Наука, СО АН СССР, 1983. – 230 с.

9 Влияние фотограмметрической и внутренней рефракций на определение линейных элементов внешнего ориентирования / В. И. Куштин, Н. Ф. Добрынин, Т. М. Пимшина // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224 (дата обращения: 31.08.2023).

10 **Дробязко, Д. Л.** Боковая рефракция в сетях сгущения / Д. Л. Дробязко, В. И. Куштин // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4(1). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224 (дата обращения: 31.08.2023).

11 **Куштин, В. И.** Учет влияния атмосферы на результаты измерения длин радиоэлектронными системами : монография / В. И. Куштин. – Москва : МИИГАиК, 2003. – 180 с. – ISBN 5-7890-0251-X.

7 **Kushtin, V. I.** Determination of corrections to the distance in measurements by electro-optical systems / V. I. Kushtin, S. E. Turchik, P. N. Shcherbak // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4. – P. 247–255. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_247.

8 Optical refraction in the Earth's atmosphere (inclined traces) / A. V. Alekseev, M. V. Kabanov, I. F. Kushtin [et al.]. – Novosibirsk: Nauka, SO AN SSSR, 1983. – 230 p.

9 The influence of photogrammetric and internal refraction on the determination of linear elements of external orientation / V. I. Kushtin, N. F. Dobrynin, T. M. Pimshina // Engineering Bulletin of the Don. – 2018. – No. 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224 (date of access: 08/31/2023).

10 **Drobyazko, D. L.** Lateral refraction in condensation networks / D. L. Drobyazko, V. I. Kushtin // Engineering Bulletin of the Don. – 2012. – No. 4(1). – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5224 (date of access: 08/31/2023).

11 **Kushtin, V. I.** Using the influence of the atmosphere on the results of length measurement by radio-electronic systems : monografiya / V. I. Kushtin. – Moscow : MIIGAiK, 2003. – 180 p. – ISBN 5-7890-0251-X.

V. I. Kushtin, P. N. Shcherbak, T. M. Pimshina, S. E. Turchik

CONSIDERATION OF THE INFLUENCE OF THE ATMOSPHERE ON THE RESULTS OF HIGH-PRECISION GEODETIC, ASTRONOMICAL AND PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENTS

Abstract. According to the influence of the atmosphere on the results of astronomical, geodetic, photogrammetric work, as well as remote sensing is an urgent task in the implementation of various scientific and practical projects of our time. The use of modern means and methods of geodetic measurements, changing parameters of the Earth's atmosphere due to natural and anthropogenic processes, increasing requirements for the accuracy of the obtained results necessitate the development of more advanced ways to account for the influence of refraction and deceleration of the speed of electromagnetic waves on the accuracy of measurements both in the light and radio range. The paper shows the need to take into account the influence of refraction on the measured distances at zenith distances of more than 45 degrees. A formula is proposed for the high-precision determination of corrections due to the influence of refraction in the distances measured by radio-optical systems.

Keywords: atmosphere, refraction, radio signal delay, range corrections, atmospheric models, electromagnetic waves.

For citation: Consideration of the influence of the atmosphere on the results of high-precision geodetic, astronomical and photogrammetric measurements / V. I. Kushtin, P. N. Shcherbak, T. M. Pimshina, S. E. Turchik // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 119–124. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_119.

Сведения об авторах**Куштин Владимир Иванович**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ips@rgups.ru

Щербак Петр Николаевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: pph@rgups.ru

Пимшина Татьяна Михайловна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: ips@rgups.ru

Турчик Светлана Евгеньевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог»,
ассистент,
e-mail: ips@rgups.ru

Information about the authors**Kushtin Vladimir Ivanovich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Research, Design and Construction of Railways»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ips@rgups.ru

Shcherbak Peter Nikolayevich

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

Pimshina Tatiana Mihailovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Research, Design and Construction of Railways»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated professor,
e-mail: ips@rgups.ru

Turchik Svetlana Evgenievna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Research, Design and Construction of Railways»,
Lectures,
e-mail: ips@rgups.ru

Н. И. Коваленко

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Аннотация. Изменение нормативных параметров в конструкции пути и его элементах, а также изменение технологии производства работ приводит к изменению характера взаимодействия подвижного состава и элементов пути, изменению вида и характеристик различных неисправностей, в особенности для условий интенсивной эксплуатации пути. Расчетами (с учетом моделирования) установлено, что для исправной и работоспособной конструкции пути коэффициент запаса прочности по напряжениям в наиболее нагруженном поперечном сечении рельса составляет 1,7 при жестком (стабилизированном) подрельсовом основании, 1,3 при слабом (мягком, сразу после ремонта подрельсовом основании). Как при слабом, так и при жестком подрельсовом основании в случае разрушения принимающей шпалы или её отсутствии коэффициент запаса прочности составил 0,82. В настоящее время, учитывая сравнительно невысокую трудоёмкость выполнения работ с применением регулировочных прокладок (карточек) на локальных участках, а также сравнительно короткий промежуток времени, необходимый для выполнения этих работ, данный способ получил широкое распространение для устранения неисправностей в виде локальных просядков, перекосов, других отклонений положения рельсовых нитей железнодорожного пути в профиле. На предварительной стадии установлено, что следствием уменьшения подрельсовой опорной площадки при использовании регулировочных прокладок (карточек) является уменьшение модуля упругости подрельсового основания на 7–15 % и увеличение на 8–12 % усталостных процессов деградации рельсовой стали.

Ключевые слова: регулировочная прокладка (карточка), равноресурсность элементов пути, излом рельса, наработка тоннажа, высокая грузонапряжённость, рельсовая сталь, подрельсовая опорная площадка, запас прочности по напряжениям, принимающий конец рельса.

Для цитирования: Коваленко, Н. И. Повышение уровня технического состояния железнодорожного пути / Н. И. Коваленко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 125–134. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_125.

Введение

В настоящее время при текущем содержании пути применяются регулировочные прокладки (карточки) для устранения неисправностей в виде локальных просядков, перекосов, других отклонений положения рельсовых нитей железнодорожного пути в профиле, которые оцениваются путеизмерительными средствами как неисправности второй степени [1–3].

Практика такого способа устранения неисправностей применялась, например, на одной из дистанций пути Куйбышевской железной дороги (например, ПЧ-12) в 70–80 гг. прошлого столетия в виде частной инициативы дорожного мастера по текущему содержанию пути. Применение такого способа устранения неисправностей имело значительное сокращение трудозатрат при выполнении данных работ при высоких показателях качества текущего состояния рельсовой колеи по оценке её состояния путеизмерительными средствами, например, путеизмерительными вагонами и ручными приборами. Однако более глубоким и всесторонним анализом состояния всех элементов пути на этом же участке данной дистанции было установлено, что, например, состояние рельсов по дефектности за этот же промежуток времени существенно отличалось в худшую сторону по сравнению с аналогичными участками, имеющими прочие практически одинаковые характеристики как перевозочного процесса, так и географических параметров. Как результат, для звеньев пути на деревянных шпалах, который эксплуатировался в тот период времени, такой способ устранения неисправностей был подвержен критике, признан неэффективным и запрещенным к применению.

Эксплуатация бесстыкового пути, внедрение участкового метода текущего содержания потребовали на практике применения измененных технологий выполнения работ. В настоящее время, учи-

тывая сравнительно невысокую трудоёмкость выполнения работ с применением регулировочных прокладок (карточек) на локальных участках, а также сравнительно короткий промежуток времени, необходимый для выполнения этих работ, данный способ получил широкое распространение в практике ОАО «РЖД» [4–6].

Однако с целью массового использования данного способа производства работ не было выполнено соответствующее научно-техническое подтверждение и обоснование влияния изменения конструкции элементов подрельсового основания и последствий долговременного применения регулировочных прокладок (карточек) [7, 8].

Авторы данный способ работ рассматривают в качестве одной из причин тенденции по ухудшению состояния путевого хозяйства, сложившегося в настоящее время на сети железных дорог РФ [10, 11].

Ухудшение состояния пути отмечается в телеграмме ОАО «РЖД» от сентября месяца 2021 г., где указывается, что на текущий период ситуация с изломами рельсов в путевом хозяйстве инфраструктурного комплекса сложилась крайне неудовлетворительная. В частности, на сети железных дорог на четвертый квартал 2021 г. было допущено 70 случаев изломов рельсов. За аналогичный период 2020 г. таких изломов было зафиксировано 42. Причем 28 из них были выявлены в сварных стыках, которые были выполнены алюминотермитным способом. За этот же период в 2020 г. было выявлено 8 случаев таких изломов. Кроме того, на четвертый квартал 2021 г. по сети допущено 5 случаев схода подвижного состава по причинам разрушения рельсов в зоне изолирующих стыков с накладками АпАТЭК.

В телеграмме отмечается, что отдельными Дирекциями инфраструктуры мероприятий по снижению изломов рельсов не принимается, необходимых выводов не сделано, а также улучшению работы по устранению нарушений не проводится, что не способствует изменению ситуации с изломами рельсов в лучшую сторону.

Материалы и методы

Для оценки существующего состояния путевого хозяйства, на наш взгляд, показательным примером может служить рассмотрение инцидента в виде схода поезда с рассмотрением последствий инцидента, предыстории его возникновения и возможных причин возникновения.

Таким примером может служить инцидент в виде схода поезда, произошедшего в марте месяце 2021 г. на перегоне Южно-Уральской железной дороги – филиале ОАО «РЖД».

Рассмотрение данного инцидента следует отнести к материалам по оценке неудовлетворительного состояния рельсов, изолирующих стыков, в том числе АпАТЭК и других элементов пути.

Комиссией ОАО «РЖД» в результате разбора данного события было установлено, что причиной схода вагонов стал излом рельса и его разрушение на большое количество фрагментов на длине рельса около 4 м.

Место произошедшего схода характеризуется следующими параметрами: класс линии – второй, класс пути – второй, специализация – О (особогрузонапряженная). Эксплуатируемая конструкция пути была создана при модернизации линии в 2013 году. По рассматриваемому пути на момент произошедшего схода пропущенный тоннаж составил 766,0 млн т брутто. По отчетным данным средняя грузонапряженность данного участка пути – 96,524 млн ткм брутто/км в год.

Рельсы, уложенные в путь, характеризуются следующими параметрами: завод – изготовитель АО «ЕВРАЗ ЗСМК», тип Р65, на шейке рельса указано К 1 2013, то есть дата проката рельса расшифровывается как январь 2013 г., категория рельса – ДТ350, по рабочей грани вертикальный износ головки рельса – 2,5 мм, боковой износ – 14 мм.

История оценки состояния участка пути и мероприятий по обеспечению необходимого уровня технического состояния железнодорожного пути накануне произошедшего схода.

В соответствии с пунктами 5 и 6 (п/п 6.7) «Правил назначения ремонтов пути»¹, а также пунктом 12 Приложения №1 в ПТЭ² начиная с 2017 года на данном участке должен был быть запланированным средний ремонт пути. По факту данный ремонт не был выполнен.

Анализом состояния элементов пути было установлено, что на примыкающих концах рельса, на котором смонтирован изолирующий стык, была нарушена эпюра шпал (в сторону её увеличения),

¹ Правила назначения ремонтов железнодорожного пути, утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 17.12.2021 г. и введенные в действие 29.04.2022 г. (далее «Правила назначения ремонтов»).

² Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, утвержденные Министерством транспорта Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 286 с изменениями в соответствии с Приказом Минтранса РФ от 09.02.2018 г. № 54 (далее ПТЭ).

которая предусматривается в соответствии с п. 3.11.10 и п. 3.11.11 Инструкции³. Со стороны отдающего конца рельса предстыковая шпала имела раскол.

6 января 2021 г. при зимнем комиссионном осмотре участка, на котором в дальнейшем произошел сход подвижного состава (примерно за два месяца до схода), в изолирующем стыке по левой рельсовой нити выявлены неисправности в виде угла в плане 36 мм на длине 24 м и свехнормативный зазор равный 26 мм. При нормативной величине в соответствии с требованиями ПТЭ равной 21 мм. Эти неисправности были устранены (согласно акту комиссии ОАО «РЖД»).

При рабочем проходе диагностического комплекса ЭРА приблизительно за месяц до схода (по отчетным данным 08 февраля 2021г.) на данном километре, где произошел сход, были обнаружены неисправности в виде бокового износа рабочей грани рельса от 16,6 до 19,5 мм, что соответствует оценке «неудовлетворительно». Данные неисправности не были устранены.

В техническом паспорте дистанции пути отмечается, что на этом участке пути были уложены промежуточные скрепления ЖБР-65 ПШМ. На основании отчетных документов отмечается, что 22 февраля 2021 г., затем 7 марта 2021 г. на этом же участке пути производились работы по замене упругой прокладки данных промежуточных скреплений. На данном участке пути 10 марта 2021 г. выполнялись работы по регулировке ширины колеи.

В материалах расследования комиссии ОАО «РЖД», а также в отчетах по текущему содержанию участка пути, где произошел сход, например в ПУ-74⁴, отсутствует информация, в которой были бы указаны сведения о выполнении осмотров изолирующего стыка с демонтажем изолирующих элементов данного стыка.

Результаты

С целью выявления и оценки состояния элементов верхнего строения пути (рельсов, шпал, скреплений промежуточных и стыковых, конструкции изолирующего стыка) для установления возможных причин схода подвижного состава, произошедшего в марте 2021 г. на вышеуказанном перегоне, была поставлена задача определения максимальных изгибающих моментов, действующих в сечении по оси принимающей шпалы. Для решения данной задачи было выполнено моделирование и произведены соответствующие расчеты [12–15]. Данными исследованиями было установлено, что при исправном и работоспособном состоянии шпал и рельсов (рис. 1) на верхней поверхности (под головкой рельса) будет растянутая зона (на схеме указана в виде знаков «плюс»), на нижней опорной поверхности (над подошвой рельса) – сжатая зона (на схеме указана в виде знаков «минус»).

В качестве примечания следует отметить, что в сечении зазора изолирующего стыка изгибающий момент и напряжения имеют минимальные значения.

Для конструкции пути по оси принимающей шпалы расчетами было установлено, что коэффициент запаса прочности по напряжениям в наиболее нагруженном поперечном сечении рельса оказался равным 1,7 при жестком стабилизированном основании при исправной и работоспособной типовой конструкции пути; в случае, если подрельсовое основание рассматривается как слабое или мягкое (например, сразу после ремонта верхнего строения пути), данный коэффициент не превышает 1,3.

При эксплуатации пути с разрушенной шпалой (или при её отсутствии) под принимающим концом рельса (рис. 2) выполненное аналогичное моделирование и произведенные расчеты показывают, что максимальный изгибающий момент действует также в сечении по оси разрушенной принимающей шпалы или условного её размещения (при её отсутствии).

³ Инструкция по текущему содержанию пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288р.

⁴ Журнал учета работ по текущему содержанию и оценке состояния пути и путевых устройств, утвержденный распоряжением ОАО «РЖД» от 02 мая 2012 г. № 857р (далее ПУ-74).

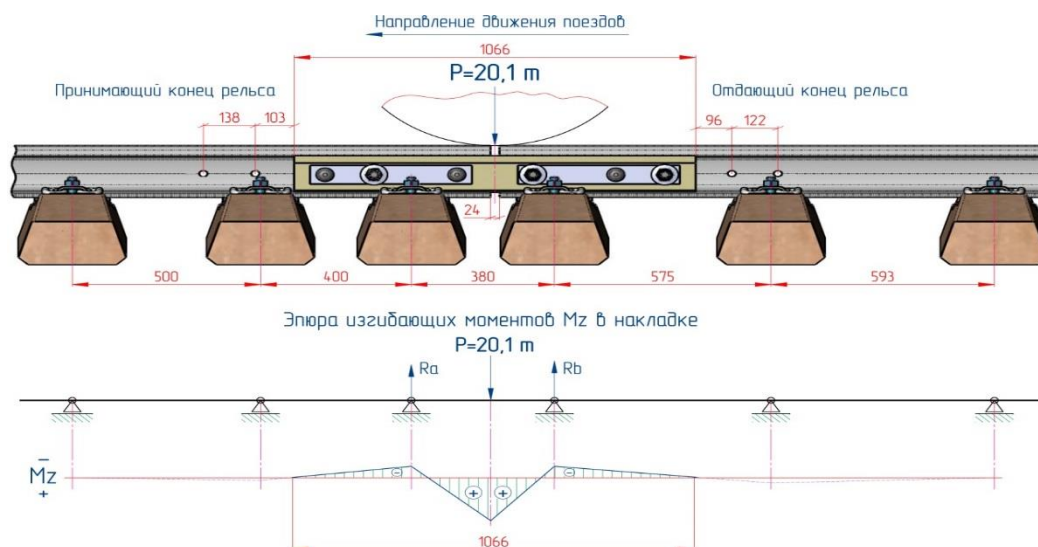


Рис. 1. Расчетная схема типового рельсового стыка при неразрушенной шпале (места будущего разрушения рельса при сходе вагонов в марте месяце 2021 г.)

Изгибающие моменты сил при разрушенной шпале под принимающим концом рельсом (рис. 2) распределяются следующим образом: на верхней поверхности (под головкой рельса) будет растянутая зона, на нижней опорной поверхности (под подошвой отдающего конца рельса) – сжатая зона.

Моделированием и расчетами установлено, что в случае разрушения принимающей шпалы (или при её отсутствии) по оси отдающей шпалы, то есть в сечении рельса, которое в данном случае является наиболее нагруженным, коэффициент запаса прочности поперечного сечения рельса по напряжениям принимает значение равное 0,82 – как при слабом, так и при жестком подрельсовом основаниях.

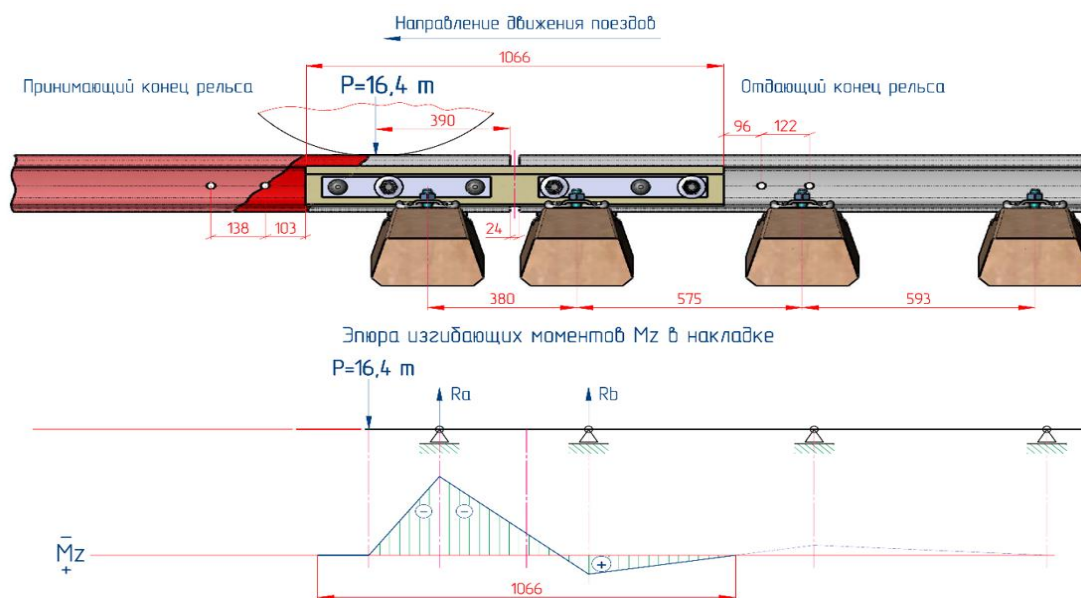


Рис. 2. Расчетная схема зоны разрушения рельса при сходе вагонов в марте месяце 2021 г. при разрушенной принимающей шпале

Использованная разработанная модель (рис. 2) показывает, что надрыв сечения рельса при разрушении принимающей шпалы (или ее отсутствии), прогнозируется в ослабленном сечении, которое располагается на расстоянии порядка 48 мм от оси принимающей шпалы или условном её размещении при её отсутствии.

Обсуждение результатов

Моделированием и последующими расчетами получен модуль упругости подрельсового основания равный 121 мПа при исправных рельсах, исправных работоспособных шпалах, то есть при типовом основании (или жестком основании) и 23 мПа при разрушенной, например, принимающей шпале в стыковом соединении рельсов.

При определении расчётных максимальных значений вертикальных сил давления колес подвижного состава на рельсы установлено, что для достижения предельных напряжений в поперечных сечениях рельсов необходимо приложить силу равную 86,4 Тс от одного колеса или 172,8 Тс от колесной пары при слабом основании (или мягком основании).

Расчётные максимальные значения вертикальных сил от подвижного состава при жестком основании составляют 129,0 Тс от одного колеса или 258 Тс от колесной пары при исправном работоспособном состоянии шпал и рельсов (типовая конструкция пути).

Вертикальные прогибы головки рельса по оси стыка составляют 36 мм в случае мягкого подрельсового основания (например, для пути сразу после выполнения ремонта), при расчётном модуле упругости подрельсового основания равном 23 мПа. При типовой конструкции пути (исправном работоспособном состоянии шпал и рельсов) и расчётном модуле упругости подрельсового основания равном 121 мПа прогибы головки рельсов составляют 24 мм.

При расчетной динамической осевой нагрузке 25 Тс (от колеса – 12,5 Тс) с учетом ударного воздействия на одно колесо, которое составит 20,1 Тс, соотношение фактических действующих сил и сил, приводящих к излому рельсов, составит $86,4/20,1 = 4,3$ раза при слабом или мягком основании или отсутствии шпалы (расчетная схема 2) и $129,0/20,1 = 6,4$ раза – при жестком или типовом основании (расчетная схема 1).

Таким образом, при работоспособном состоянии шпал и рельсов для разрушения (излома) поперечного сечения рельса от воздействия вертикальных сил на рельсы от колес подвижного состава при осевых нагрузках 25 Тс необходимо при слабом основании приложить силы, в 4,3 раза превышающие действующие в настоящее время вертикальные силы от подвижного состава. При жестком основании для разрушения рельса необходимо приложить силы, в 6,4 раза превышающие действующие в настоящее время вертикальные силы от подвижного состава.

Полученными результатами исследований установлено, что излом рельса является наиболее вероятной причиной схода вагонов в марте месяце 2021 года на Южно-Уральской железной дороге – филиале ОАО «РЖД». Разрушение рельса произошло в районе первого отверстия диаметром 22 мм под перемычку.

Наиболее вероятной причиной, которая привела к возникновению разрушения рельса, могут быть усталостные процессы, вызвавшие деградацию рельсовой стали. На вероятность происхождения таких последствий указывает то, что пропущенный тоннаж на данном участке составил более 766 млн т брутто.

Для условий интенсивной эксплуатации пути, которая отмечается для рассматриваемого участка пути, имеющего грузонапряженность линии более 96 млн ткм брутто на км в год, нормативная величина пропущенного тоннажа должна быть 700 млн т брутто (в соответствии с ранее приведенными ПТЭ и «Правилами назначения ремонтов»).

Кроме того, на данном участке не были выполнены работы по среднему ремонту пути, по замене упругой прокладки на скреплении ЖБР-65 ПШМ, а также не выполнена регулировка ширины колеи. Кроме того, недостаточно эффективно выполнялись мероприятия по текущему содержанию данного участка пути и изолирующего стыка. При текущем содержании данного участка пути применялись регулировочные прокладки (карточки) для устранения неисправностей в виде локальных просядков и перекосов.

На стадии предварительных исследований, проведенного анализа, произведенных расчетов было установлено, что при использовании регулировочных прокладок (карточек) для локального устранения неисправностей в виде просядков, перекосов, других отклонений положения рельсовых нитей железнодорожного пути в профиле следует учитывать последствия такого процесса в виде изменения как геометрических характеристик всей конструкции, так и характеристик динамического взаимодействия. В частности, на стадии предварительных результатов оценки установлено, что геометрические размеры (длина и ширина) регулировочных прокладок (карточек) на 10–20 % меньше опорных размеров подрельсовых элементов промежуточных скреплений или подрельсовых опор (шпал, брусьев, плит и других конструкций). Предварительными результатами исследований отмечается, что

следствием уменьшения опорной площади является уменьшение модуля упругости подрельсового основания на 7–15 % и увеличение усталостных процессов деградации рельсовой стали. На предварительной стадии это увеличение может составлять 8–12 %.

С целью определения необходимых параметров регулировочных прокладок (карточек), их размеров, количества применения на единице длины участка пути и других характеристик необходимо уточнить изменения модуля упругости подрельсового основания, а также модуля упругости рельсов при использовании регулировочных прокладок (карточек). Кроме этого, следует уточнить технологические параметры их применения, такие как продолжительность эксплуатации пути на регулировочных прокладках (карточках), порядок их укладки и замены и другие характеристики регулировочных прокладок (карточек).

В целом для уменьшения затрат на материалы и снижения трудозатрат при повышении уровня технического состояния пути необходимо обеспечить равноресурсность его элементов путем оптимизации ремонтной схемы [10, 16–20].

Нормативная потребность объёмов капитальных ремонтов для каждого отдельного участка пути (W_{norm} , км), имеющих различную грузонапряжённость, а также величину установленных скоростей движения, согласно «Правил назначения ремонтов пути», указанных ранее, рассчитывается по формуле (1):

$$W_{norm} = \frac{L_i \times G_{god}}{Q_{norm} \times f_i} = \frac{L_i}{N_{god} \times f_i}, \quad (1)$$

где G_{god} – величина грузонапряжённости каждого отдельного участка, млн ткм брутто/км в год;

Q_{norm}, N_{god} – наработка пути в виде пропущенного тоннажа в млн т брутто или продолжительность эксплуатации пути в виде количества лет между капитальными ремонтами пути, соответствующих нормативному периоду;

L_i – длина участков пути (развёрнутая), имеющих одинаковый класс, категорию и другие характеристики, км;

f_i – коэффициент корректировки, позволяющий учитывать дополнительные факторы и особенности эксплуатации конкретных участков пути.

В качестве таких факторов наиболее значимыми являются, например, эксплуатация плетей меньше нормативной длины; отсутствие шлифовки рельсов или её производство в недостаточных объёмах, недостаточная толщина чистого слоя балласта при выполнении ремонтных работ; близкое расположение мест погрузки нефтяных продуктов, а также сыпучих грузов в виде угля, руды, минеральных удобрений и др.

Численные значения $G_{god}, Q_{norm}, N_{god}, L_i, f_i$ берутся из отчетных материалов дистанции пути, например, технического паспорта.

Для определения потребных объёмов (V_i) разных видов работ на каждом отдельном участке пути применяется формула (2):

$$V_i = w_{kap} \times n_i, \quad (2)$$

где w_{kap} – объёмы капитального ремонта пути для каждого участка (1);

n_i – количество повторений различных видов работ в течение жизненного цикла продолжительности эксплуатации пути (между капитальными ремонтами).

Чтобы обеспечить эффективную организацию текущего содержания пути и производство его ремонтов, необходимо стремиться к минимизации суммарных затрат, которые определяются количеством задержек поездов, вызванных продолжительностью закрытия перегона (или количеством требуемых «окон» и их продолжительностью) и непосредственных затрат на выполнение ремонтных работ. Параметры, зависящие от организации и технологии выполнения работ в расчетах, учитываются только в виде переменных факторов.

Выводы

На основании выполненного моделирования и последующих расчетов величины напряжений поперечного сечения рельса в условиях максимального нагружения рельса от колес подвижного состава установлены следующие значения коэффициентов запаса прочности: 1,7 – при жестком (типовом или стабилизированном) подрельсовом основании; 1,3 – при слабом (мягком) подрельсовом основании или при состоянии пути сразу после ремонта. В случае если в стыке принимающая шпала разрушена или она отсутствует, коэффициент запаса прочности по напряжениям в наиболее нагруженном сечении

составил 0,82 как при слабом (мягком), так и при жестком (типовом или стабилизированном) подрельсовом основании.

На стадии предварительных исследований установлено, что, используя регулировочные прокладки (карточки) при локальном устранении неисправностей в виде локальных просадок, перекосов, других отклонений положения рельсовых нитей железнодорожного пути в профиле, следует учитывать последствия такого процесса в виде изменения как геометрических характеристик конструкции, так и характеристик динамического взаимодействия.

На предварительной стадии установлено, что следствием уменьшения подрельсовой опорной площадки при использовании регулировочных прокладок (карточек) является уменьшение модуля упругости подрельсового основания на 7–15 %, а также увеличение усталостных процессов деградации рельсовой стали на 8–12 %.

Таким образом, достижение равноресурсности технического состояния пути и его элементов, а также обеспечение их эксплуатационной надежности является стратегической задачей повышения уровня технического состояния пути.

Список литературы

1 **Гринь, Е. Н.** Факторный анализ оценки состояния пути / Е. Н. Гринь, Н. И. Коваленко // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 22–23. – ISSN 0033-4715.

2. Составление бюджета прямых затрат путевого комплекса ОАО «Российские железные дороги» при современной классификации железнодорожных линий / Н. Коваленко, Б. Волков, А. Коваленко, Н. Коваленко // VIII Международный научный Сибирский транспортный форум. Транссибирь 2019. Достижения в области интеллектуальных систем и вычислительной техники, том 1115. Чемпионат Спрингера от 05 января 2020 г. / З. Попович, А. Манаков, В. Брескич (ред.). – С. 177–183. – ISBN 978-3-030-37916-2. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_19 (дата обращения: 12.09.2023).

3 Методика классификации железнодорожных линий ОАО «РЖД», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 04 марта 2015 г. № 551р. – URL: <https://base.garant.ru/71085892/> (дата обращения: 12.09.2023).

4 Оценка снижения последствий, возникших в результате инцидентов на железной дороге / Н. Коваленко, В. Пономарев, Н. Коваленко [и др.] // З. Попович, А. Манаков, В. Брескич. (ред.) VIII Международный научный Сибирский транспортный форум. Транссибирь 2019. Достижения в области интеллектуальных систем и вычислительной техники, том 1115. Спрингер, Cham. 05 января 2020 г. / З. Попович, А. Манаков, В. Брескич (ред.). – С. 184–194. – ISBN 978-3-030-37916-2. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_20

(дата обращения: 12.09.2023).

5 **Коваленко, Н.** Определение сроков ремонта железнодорожного пути с учетом надежности и уровня риска / Н. Коваленко, Е. Гринь, Н. Коваленко // Веб-конференция E3S, Том 157 06031 (2020). Springer, 20 марта 2020 г. – С. 92–99. –

References

1 **Grin, E. N.** Factor analysis of the assessment of the state of the path / E. N. Grin, N. I. Kovalenko // Path and track economy. – 2013. – No. 1. – P. 22–23. – ISSN 0033-4715.

2 Kovalenko, N., Volkov, B., Kovalenko, A., Kovalenko, N. (2020). Budgeting Direct Costs of Track Complex of JSC "Russian Railways" in the Light of Modern Classification of Railway Lines. / In: Popovic, Z., Manakov, A., Breskich, V. (eds) VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol 1115. Springer Cham 05 January 2020, P. 177–183. – ISBN 978-3-030-37916-2. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_19 (date of access: 12.09.2023).

3 The methodology of classification of railway lines of JSC "Russian Railways", approved by the order of JSC "Russian Railways" dated March 04, 2015 No. 551r. – URL: <https://base.garant.ru/71085892/> (date of access: 09/12/2023).

4 Assessment of the Mitigation of Consequences Resulting from Incidents at the Railway. / N. Kovalenko, V. Ponomarev, N. Kovalenko, N. Fomina, A. Kovalenko [et al.] // In: Z. Popovic, A. Manakov, V Breskich. (eds) VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1115. Springer, Cham. 05 January 2020. – P. 184–194. – ISBN 978-3-030-37916-2. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_20 (date of access: 09/12/2023).

5 The determination of the repairs of railway track considering the reliability and risk level / N. Kovalenko, E. Grin, N. Kovalenko // E3S Web of Conferences, Vol. 157 06031 (2020). Springer, 20 March 2020. – P. 92–99. – ISBN 978-3-030-

- ISBN 978-3-030-18743-9. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706031> (дата обращения: 12.09.2023).
- 6 **Гапеенко, Ю. В.** Стабилизация пути после глубокой очистки балласта / Ю. В. Гапеенко // Путь и путевое хозяйство. – 1997. – № 10. – С. 13–16. – ISSN 0033-4715.
- 7 Путевые машины для выправки железнодорожного пути, уплотнения и стабилизации балластного слоя. Технологические системы : учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / А. В. Атаманюк, В. Б. Бредюк, В. М. Бугаенко [и др.] ; под ред. М. В. Поповича, В. М. Бугаенко. – Москва : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 285 с. – ISBN 978-5-89035-529-4.
- 8 **Величко, Д. В.** Анализ загрязненности щебеночного балласта / Д. В. Величко, Н. А. Толстикова // Известия Транссиба / Омский государственный университет путей сообщения. – 2016. – № 3(27). – С. 110–117. – ISSN 2220-4245.
- 9 Путевые машины : учебник для вузов ж.-д. транспорта / С. А. Соломонов, М. В. Попович, В. М. Бугаенко [и др.] ; под ред. С. А. Соломонова. – Москва : Желдориздат, 2000. – 756 с. – ISBN 5-94069-007-6.
- 10 Постановление Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года» (в ред. распоряжения Правительства РФ от 11.06.2014 № 1032-р). – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbеR.pdf> (дата обращения: 12.09.2023).
- 11 **Цветков, В. Я.** Концептуальная модель оценки эффективности инновационных проектов / В. Я. Цветков // Европейский журнал экономических исследований. – 2012. – Т. 1, № 1. – С. 45–50. – ISSN 2305-6282.
- 12 **Ицкович, Г. М.** Руководство к решению задач по сопротивлению материалов: учебное пособие для втузов / Г. М. Ицкович, А. С. Минин, А. И. Винокуров ; под общ. ред. Л. С. Минина. – Москва : Высшая школа, 2001. – 592 с. – ISBN 5-06-003494-1.
- 13 **Перельмутер, А. В.** Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Москва : СКАД СОФТ; Ассоциация строительных вузов; ДМК Пресс, 2011. – 736 с. – ISBN 978-5-903683-12-3; ISBN 978-5-930938-06-7; ISBN 978-5-940747-10-9.
- 14 **Александров, А. В.** Сопротивление материалов : учебник для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин ; под ред. 18743-9. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706031> (date of access: 09/12/2023).
- 6 **Gapeenko, Yu. V.** Path stabilization after deep ballast cleaning / Yu. V. Gapeenko // Path and track management. – 1997. – No. 10. – P. 13–16. – ISSN 0033-4715.
- 7 Track machines for straightening the railway track, compaction and stabilization of the ballast layer. Technological systems : Textbook for universities of railway transport / A. V. Atamanyuk, V. B. Bredyuk, V. M. Bugayenko et al.; ed. M. V. Popovich, V. M. Bugayenko. – Moscow : State Educational Institution "Educational and Methodological Center for education in railway transport", 2008. – 285 p. – ISBN 978-5-89035-529-4.
- 8 **Velichko, D. V.** Analysis of contamination of crushed stone ballast / D. V. Velichko, N. A. Tolstikova // Izvestiya Transsib / Omsk State University of Railway Transport. – 2016. – No. 3(27). – P. 110–117. – ISSN 2220-4245.
- 9 Travel cars: Textbook for universities of railway transport / S. A. Solomonov, M. V. Popovich, V. M. Bugaenko [etc.]; edited by S. A. Solomonov. – Moscow : Zheldorizdat, 2000. – 756 p. – ISBN 5-94069-007-6.
- 10 Resolution of the Government of the Russian Federation of November 22, 2008 No. 1734-r "Transport Strategy of the Russian Federation until 2030" (as amended by the Decree of the Government of the Russian Federation of 11.06.2014 No. 1032-r). – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOOpQhLl0nUT91RjCbеR.pdf> (date of access: 09/12/2023).
- 11 **Tsvetkov, V. Ya.** Conceptual Model of the Innovative Projects Efficiency Estimation / V. Ya. Tsvetkov // European Journal of Economic Studies. – 2012. – Vol. (1), No. 1. – P. 45–50. – ISSN 2305-6282.
- 12 **Itskovich, G. M.** A guide to solving problems on the resistance of materials: a textbook for higher education institutions / G. M. Itskovich, A. S. Minin, A. I. Vinokurov; Under the general editorship of L. S. Minin. – Moscow : Higher School, 2001. – 592 p. – ISBN 5-06-003494-1.
- 13 **Perelmuter, A. V.** Design models of structures and the possibility of their analysis / A. V. Perelmuter, V. I. Slivker. – The fourth edition, revised and supplemented. – Moscow : SCUD SOFT; the Association of Construction Universities; DMK Press, 2011. – 736 p. – ISBN 978-5-903683-12-3; ISBN 978-5-930938-06-7; ISBN 978-5-940747-10-9.
- 14 **Alexandrov, A. V.** Resistance of materials: Textbook. For universities / A. V. Alexandrov, V. D. Potapov, B. P. Derzhavin; Edited by A. V. Alexandrov. – 3rd ed., Revised edition. –

А. В. Александрова. – 3-е изд., испр. – Москва : Высш. шк., 2003. – 560 с. – ISBN 5-06-003732-0.

15 **Горшков, А. Г.** Сопротивление материалов : учебное пособие / А. Г. Горшков, В. Н. Трошин, В. И. Шалашилин. – 2-е изд., испр. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с. – ISBN 5-9221-0181-1.

16 **Абрашитов, А. А.** Механизм образования выплесков в балластной призме / А. А. Абрашитов // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13, № 3(58). – С. 210–217. – ISSN 1992-3252.

17 Оценка источников загрязнения балластного слоя из гранитного щебня и моделирование разрушения и истирания частиц щебня при динамическом нагружении / А. А. Абрашитов, А. А. Зайцев, А. В. Семак, Л. А. Шаврин // В сборнике : Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути / Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – Москва, 2016. – С. 184–187.

18 **Бессонова, Н. В.** Определение общих расходов для ремонтно-путевых работ при предоставлении «окон» / Н. В. Бессонова // Соискатель – приложение к журналу «Мир транспорта». – 2010. – Т. 8, № 2. – С. 52–54. – ISSN 1992-3252.

19 **Парамонова, Н. В.** Оптимум для времени «окна» / Н. В. Парамонова // Мир транспорта. – 2007. – Т. 5, № 1(17). – С. 114–116. – ISSN 1992-3252.

20 **Державин, А. Н.** Методика назначения капитального ремонта пути на перегоне / А. Н. Державин, Н. Н. Лысенко, А. В. Замуховский // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 5. – С. 31–33. – ISSN 0033-4715.

Moscow : Higher School, 2003. – 560 p. – ISBN 5-06-003732-0.

15 **Gorshkov, A. G.** Resistance of materials : Textbook / A. G. Gorshkov, V. N. Troshin, V. I. Shalashilin. – 2nd ed., Revised edition. – Moscow : FIZMATLIT, 2005. – 544 p. – ISBN 5-9221-0181-1.

16 **Abrashitov, A. A.** The mechanism of splash formation in a ballast prism / A. A. Abrashitov // World of Transport. – 2015. – Vol. 13, No. 3(58). – P. 210–217. – ISSN 1992-3252.

17 Assessment of sources of contamination of the ballast layer from granite rubble and modeling of destruction and abrasion of crushed stone particles under dynamic loading / A. A. Abrashitov, A. A. Zaitsev, A. V. Semak, L. A. Shavrin, // In the collection : Modern problems of railway track design, construction and operation / Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference. Readings dedicated to the memory of Professor G. M. Shakhunyants. – Moscow, 2016. – P. 184–187.

18 **Bessonova, N. V.** Determination of total expenses for repair and track work when providing "windows" / N. V. Bessonova // The applicant is an appendix to the World of Transport magazine. – 2010. – Vol. 8, No. 2. – P. 52–54. – ISSN 1992-3252.

19 **Paramonova, N. V.** Optimum for the "window" time / N. V. Paramonova // The world of transport. – 2007. – Vol. 5, No. 1(17). – P. 114–116. – ISSN 1992-3252.

20 **Derzhavin, A. N.** Methodology for the purpose of capital repairs of the track on the stretch / A. N. Derzhavin, N. N. Lysenko, A. V. Zamukhovskiy // Path and track economy. – 2021. – No. 5. – P. 31–33. – ISSN 0033-4715.

N. I. Kovalenko

IMPROVING THE TECHNICAL CONDITION LEVEL OF THE RAILWAY TRACK

Abstract. A change in the regulatory parameters in the track design and its elements, as well as a change in the technology of work, leads to a change in the nature of the interaction of rolling stock and track elements, a change in the type and characteristics of various malfunctions, especially for conditions of intensive track operation. The calculations to be done by modeling have established that for a serviceable and workable track structure, the stress safety factor in the most loaded cross-section of the rail is 1.7 with a rigid (stabilized) sub-rail base, 1.3 with a weak (soft, immediately after repair of the sub-rail base). Both with a weak and with a rigid sub-rail base, in case of destruction of the receiving sleeper or its absence, the safety margin coefficient was 0.82. Currently, given the relatively low complexity of performing work with the use of adjustment pads (cards) on local sections, as well as a relatively short period of time required to perform these works, this method has become widely used to eliminate malfunctions in the form of local subsidence, distortions, and other deviations in the position of the rail threads of the railway track in the profile. At the preliminary stage, it was found that the consequence of reducing the under-rail support platform when using adjustment pads (cards) is a decrease in the elastic modulus of the under-rail base by 7–15 % and an increase by 8–12 % fatigue processes of degradation of rail steel.

Keywords: adjustment gasket (card), equal resource of track elements, rail breakage, tonnage operating time, high load-bearing capacity, rail steel, under-rail support platform, stress safety margin, receiving end of the rail.

For citation: Kovalenko, N. I. Improving the technical condition level of the railway track / N. I. Kovalenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 125–134. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_125.

Сведения об авторах

Коваленко Николай Иванович
Российский университет транспорта (МИИТ),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: kni50@mail.ru

Information about the authors

Kovalenko Nikolay Ivanovich
Russian University of Transport (MIIT),
Chair «Track and Track Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: kni50@mail.ru

В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, А. В. Морозов, А. Г. Кочур

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПОСЛЕ РАЗРУШЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрены нормативные документы и иные открытые источники, в которых приведены нормы продолжительности строительства мостовых сооружений в зависимости от их вида и параметров. Выполнен анализ сроков строительства мостовых сооружений, которые имели полную длину от 30 до 1800 м. В результате анализа определены сроки строительства в основной и подготовительный периоды, получены средние значения продолжительности на погонный метр сооружения. На основе полученных данных из нормативных документов и открытых источников построены графики зависимостей продолжительности строительства от протяженности мостового сооружения. По совокупности полученных данных построены графики минимальных, максимальных и средних сроков строительства. Полученные значения были сопоставлены со сроками, затраченными на восстановление реальных объектов (мостовых сооружений), которые были разрушены в результате воздействий природного характера.

Ключевые слова: искусственные сооружения, мосты, разрушения, воздействия, сроки восстановления.

Для цитирования: Подходы к оценке продолжительности восстановления мостовых сооружений после разрушения / В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, А. В. Морозов, А. Г. Кочур // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 135–143. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_135.

Введение

При воздействиях природного и техногенного характера на искусственные сооружения железных дорог могут возникать различного рода разрушения, которые можно разделить на частичные разрушения, когда повреждены либо отдельные элементы конструкции или их комплекс, или на полное разрушение, когда восстановление сооружения не представляется целесообразным [1–4]. В обоих случаях восстановление искусственного сооружения должно быть выполнено в кратчайший срок для минимизации расходов, связанных с задержкой поездов, особенно на стратегически важных направлениях или на тех участках, где нет альтернативного маршрута железнодорожным перевозкам или другими видами транспорта [5–8]. Наибольшее время на восстановление требуется в случае невозможности замены отдельных элементов, когда необходимо построить новое сооружение. Одними из наиболее трудоемких объектов для восстановления являются мосты через водные преграды. Для оценки ориентировочных сроков, необходимых для восстановления движения через водные преграды, рассмотрены подходы, позволяющие оценить срок строительства в зависимости от протяженности сооружения. В качестве исходных данных использованы нормативные документы [9–10] и открытые источники, из которых известны сроки строительства и характеристика объекта строительства.

Оценка сроков восстановления мостового сооружения

Для оценки вероятных сроков восстановления движения через разрушенные мостовые сооружения выполнен анализ источников, из которых можно получить информацию о характеристиках объекта и сроке, требуемом для его восстановления. В качестве таких источников информации были использованы нормативные документы СНиП 1.04.03-85*. Часть II. Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений [9] и МРР-3.2.81-12. Рекомендации по определению норм продолжительности строительства зданий и сооружений [10], в которых приведены укрупненные нормы времени на строительство мостовых сооружений различной длины. Дополнительная информация получена из технической документации, размещенной на сайте <https://zakupki.gov.ru>, к конкурсным процедурам по восстановлению и строительству мостовых сооружений и из открытых источников в сети Интернет.

В разделе 8 СНиП 1.04.03-85*. Часть II [9] содержится информация о нормах продолжительности строительства мостов и тоннелей. В нормы продолжительности строительства мостов и тоннелей не включено время на строительство временных объектов производственной базы (в том числе поли-

гоны по изготовлению сборных железобетонных конструкций), зданий жилищного и культурно-бытового назначения для строителей, временных дорог, переправ, линий электроснабжения, а также порталных выемок тоннелей. При необходимости строительства таких объектов к норме продолжительности строительства моста или тоннеля добавляется 6 месяцев. Также в продолжительность строительства не включено время на строительство подходов. При строительстве двухпутного железнодорожного моста к указанным нормам устанавливается коэффициент 1,3. Основные нормы времени для строительства однопутного железнодорожного моста приведены в табл. 1.

Таблица 1

Нормы времени на строительство моста

Однопутный железнодорожный мост длиной, м	Норма продолжительности строительства, месяцы	В том числе подготовительный период, месяцы	В среднем на погонный метр моста, дни	В среднем на погонный метр подготовительного периода, дни
30–100	10	2	3,0	0,6
100–200	12	2	1,8	0,3
200–300	14	2	1,4	0,2
300–400	16	3	1,2	0,225
400–500	18	3	1,08	0,18

В таблице нормы времени на погонный метр определялись для основного и подготовительного периодов как отношение продолжительности строительства к максимальной длине моста в рассматриваемом интервале и выражались в днях.

Для каждого интервала построен график зависимости продолжительности строительства от длины моста, на рис. 1 показан сплошной линией с указанием интервалов длин мостов из табл. 1. Для полученного графика построена аппроксимирующая степенная зависимость, выражение которой приведено на рис. 1. Такое выражение описывает зависимость с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,94$.

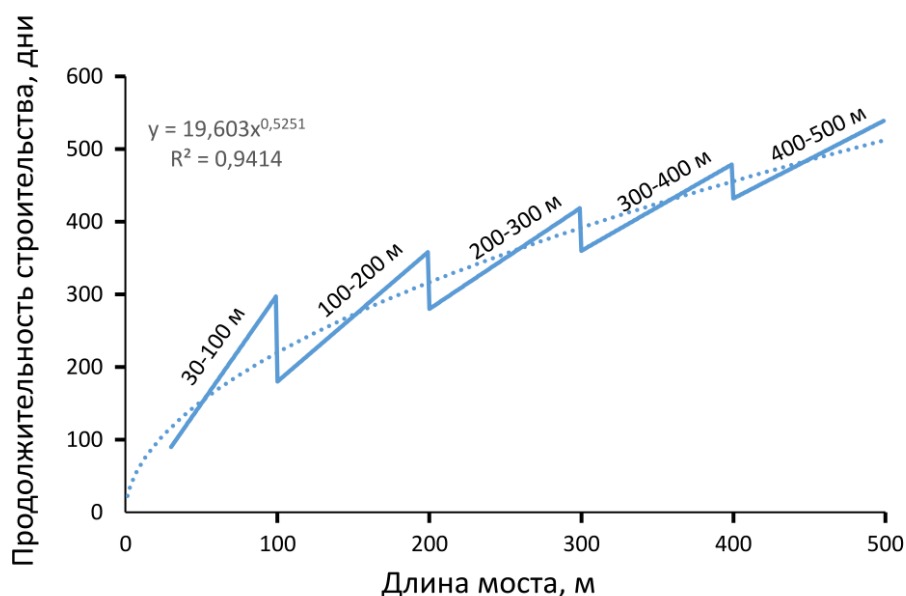


Рис. 1. График зависимости продолжительности строительства железнодорожного моста от его длины

Следующий документ, используемый для анализа, – МРР-3.2.81-12, в котором приведены нормы продолжительности строительства для автомобильных мостов. В данном документе нормы учитывают продолжительность создания площадок укрупненной сборки конструкций в составе работ подготовительного периода. Для сопоставления данных с данными, полученными в [9], выбраны двухполосные эстакады,

ширина которых сопоставима с железнодорожным однопутным мостом. Данные для сборных и монолитных конструкций пролетных строений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Нормы времени на строительство автомобильной эстакады

Двухполосная эстакада на свайном основании, м	Норма продолжительности строительства, месяцы	В том числе подготовительный период, месяцы	В среднем на погонный метр моста, дни	В среднем на погонный метр моста подготовительного периода, дни
Со сборным железобетонным пролетным строением				
200	12	2	1,8	0,3
400	20	2,5	1,5	0,19
С монолитным железобетонным пролетным строением				
200	14	2	2,1	0,3
400	24	2,5	1,8	0,19

В табл. 2 нормы времени на погонный метр определены для общего и подготовительного периода как отношение продолжительности строительства к длине моста и выражены в днях.

Для двух длин пролетов построены графики зависимости продолжительности строительства от длины моста, которые отмечены на рис. 2 сплошной линией с указанием длины моста из табл. 2 (оранжевая линия – сборная конструкция пролетов, синяя линия – монолитная конструкция пролетов). С учетом меньшей продолжительности строительства для сборной конструкции пролетов также выполнена аппроксимация степенной зависимостью, выражение которой показано на рис. 2 пунктирной линией. Такое выражение описывает зависимость с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,99$.

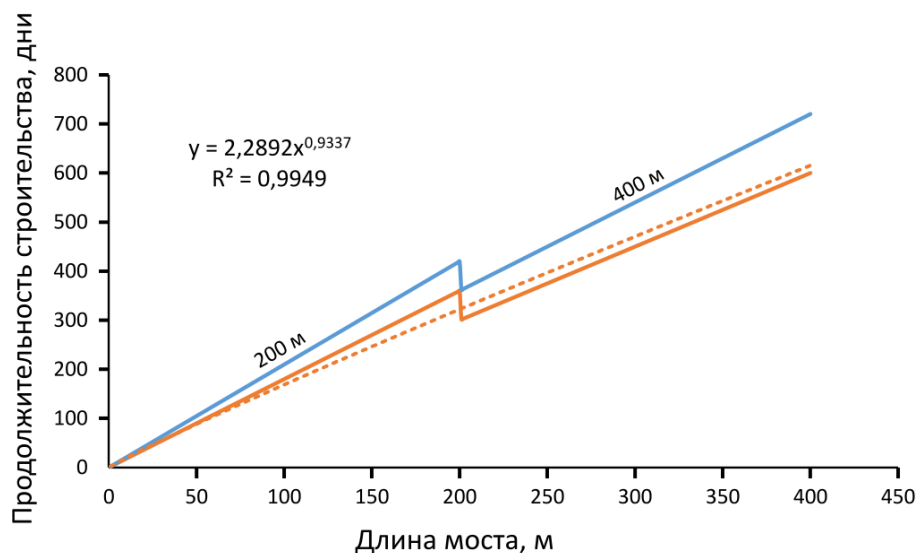


Рис. 2. График зависимости продолжительности строительства от длины автомобильной эстакады

При анализе технической документации к проводимым конкурсным процедурам по восстановлению и строительству мостовых сооружений и данных из открытых источников сети Интернет было проанализировано свыше 40 объектов. Часть рассматриваемых объектов исключена из статистики из-за сложности конструкции (например, арочные мосты). Оставшиеся сооружения разделены на капитальные и временные, а продолжительность их строительства приведена в табл. 3.

Таблица 3

Продолжительность строительства по данным технической документации

Длина моста, м	Продолжительность строительства, дни
Капитальное строительство	
72	350
47	360
48	360
105	480
45	390
171	720
78	360
56	180
21	300
48	540
239	720
434	1095
190	750
1130	780
2096	1800

Для данных из табл. 3 при капитальном строительстве построен график зависимости продолжительности строительства от длины моста, представленный на рис. 3 (синие точки). Приведенные данные были аппроксимированы логарифмической зависимостью, которая на графике показана пунктирной линией. Аппроксимационное выражение описывает зависимость с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,77$.

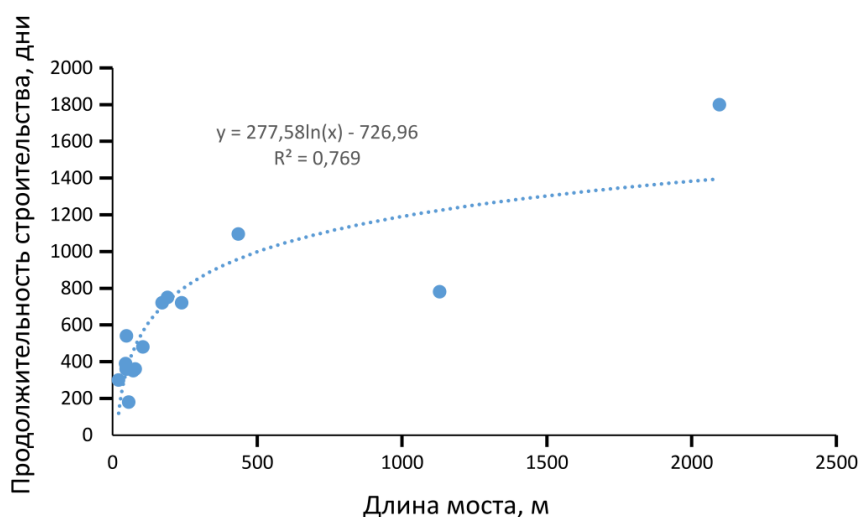


Рис. 3. График зависимости продолжительности строительства мостового сооружения от его длины

На рис. 4 приведен сводный график отображения зависимости продолжительности строительства мостового сооружения от его длины согласно данным рис. 1–3.

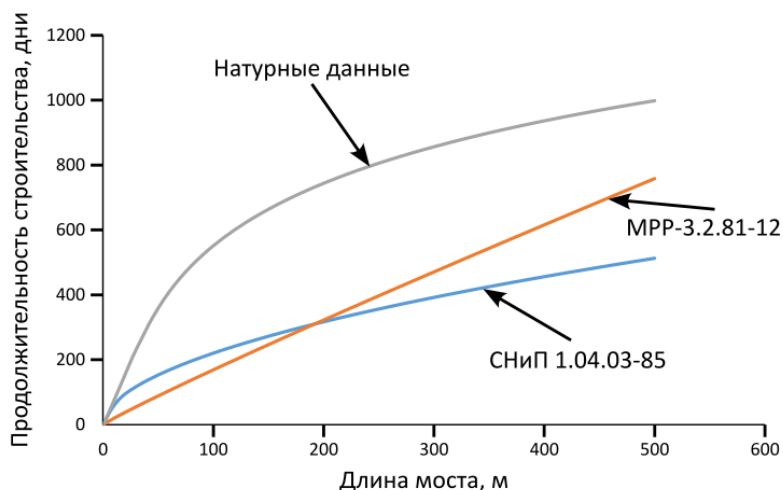


Рис. 4. Сводный график зависимости продолжительности строительства мостового сооружения от его длины

На рис. 4 видно, что имеется существенная разница между укрупненными нормами времени на строительство мостовых сооружений, взятыми из нормативных документов, и натурными данными. Такое расхождение может достигать до полутора лет. Даже при учете того, что натурные сроки приведены для всего комплекса работ, а, например, в СНиП 1.04.03-85 не включены работы по сооружению временных объектов производственной базы, зданий жилищного и культурно-бытового назначения для строителей, временных дорог, переправ, линий электроснабжения, такие расхождения могут составить более года. Поскольку имеются такие большие расхождения, необходима разработка новых подходов и соответствующего нормативного документа для более точного определения сроков восстановления (строительства), учитывающего современные реалии и возможности строительных организаций.

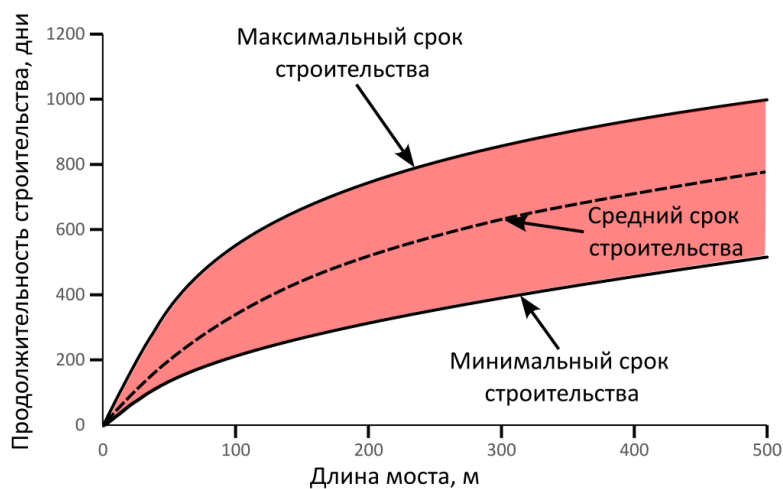


Рис. 5. График максимальных, средних и минимальных сроков продолжительности строительства мостового сооружения в зависимости от его длины

Для железобетонных мостов срок строительства, усредненный по нормативным документам и натурным данным о строительстве мостов, можно представить в виде номограммы, приведенной на рис. 6, полученной из рис. 5.

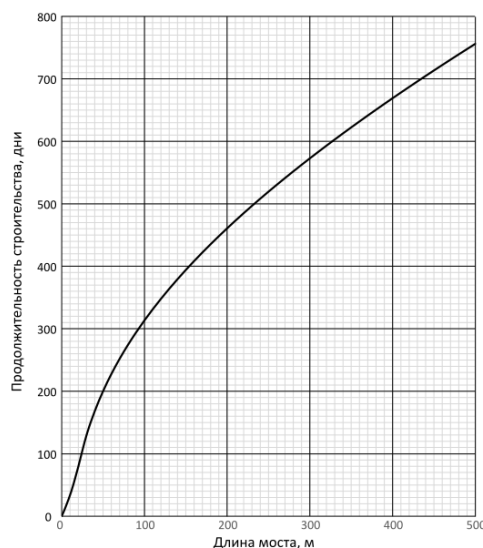


Рис. 6. Номограмма для определения средней продолжительности строительства в зависимости от длины моста

Сроки оперативного восстановления на основе опыта восстановления реальных объектов

Предложенные подходы основаны на практическом опыте восстановления объектов с известным временем на капитальное восстановление. Рассмотрим два случая восстановления моста через р. Кола и через р. Арета.

Следует отметить, что при капитальном восстановлении моста через р. Кола на темпы восстановления в значительной степени оказали влияние три основных фактора. Во-первых, привлечение значительного технического и человеческого ресурса, включая ресурсы Министерства обороны, во-вторых, пролетное строение для капитального моста уже было изготовлено заранее (аварийно-восстановительный запас), в-третьих, параллельное выполнение строительных и проектных работ, поэтапно проходящих госэкспертизу. Сочетание таких факторов позволило реализовать проект за достаточно короткий срок – 105 дней.

На графике (рис. 7) отмечены штриховыми красными линиями минимальный (определенный по нормативным документам), максимальный (из опыта капитального строительства) и средний срок строительства моста длиной 158 м. При этом даже минимальный срок по графику, который составил 270 дней, значительно превышает (в 1,7 раза) тот период времени, за который был восстановлен мост через р. Кола. Если сравнивать со средним сроком строительства, то он превышает фактический для рассматриваемого случая в 4,3 раза.

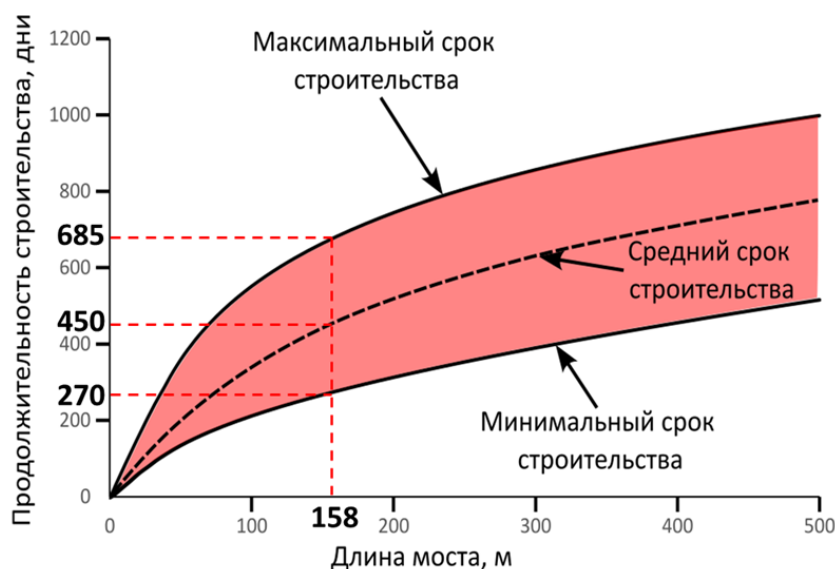


Рис. 7. График определения сроков строительства

В случае восстановления движения через р. Арета следует отметить, что на темпы временного восстановления в значительной степени оказал влияние тот факт, что имелись пролетные строения, а также удалось привлечь значительные технические и человеческие ресурсы, это позволило открыть движение уже через 1,5 суток. При этом можно отметить и значительные темпы капитального восстановления моста.

На графике (рис. 8) отмечены штриховыми красными линиями минимальный (определенный по нормативным документам), максимальный (из опыта капитального строительства) и средний срок строительства однопутного моста длиной 63 м. При этом минимальный срок по графику составил 180 дней. Для двухпутного участка можно предположить, что этот срок увеличится в два раза и составит 360 дней. В сравнении с максимальными сроками строительства, которые в соответствии с графиком для данного моста составили 450 дней, для двух путей – 900 дней, фактический срок восстановления оказался в 4,3 раза меньше, а в сравнении со средними значениями – меньше в 2,5 раза.

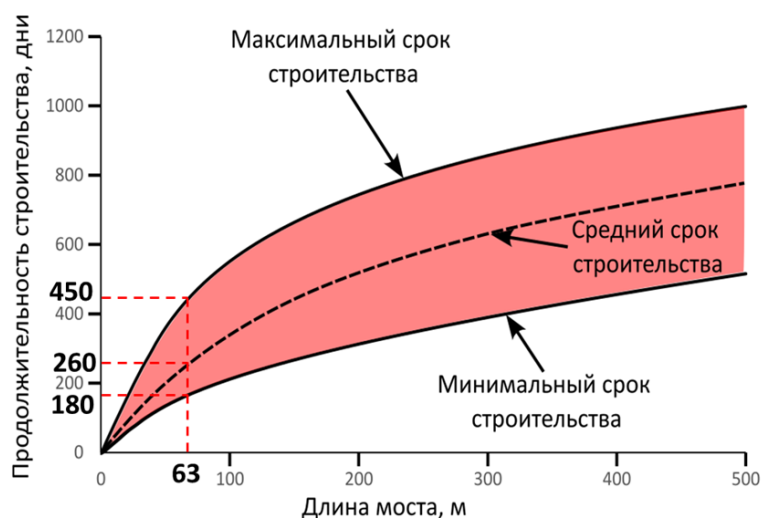


Рис. 8. График определения сроков строительства

Выводы

Анализ возможных сроков капитального восстановления мостовых сооружений позволил сформулировать следующие выводы:

- ориентировочные сроки строительства, приведенные в документах [2, 3], сходны, а аппроксимация графиков, построенных на этих данных, дает высокое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,94$ и $0,99$;
- сроки строительства, заложенные в проектах строительства реальных объектов, оказались значительно больше, чем сроки, указанные в документах [2, 3]. Для мостовых сооружений большой протяженности различие может составлять до 1,5 года;
- реальный срок капитального восстановления с полным комплексом строительных работ на натуральных объектах, рассмотренных в работе, в сравнении со средним сроком строительства из графика на рис. 5 был меньше в 4,5 раз для моста через р. Кола (рис. 7) и в 2,5 раза через реку р. Арета (рис. 8). Такие сроки могут быть связаны с рядом обстоятельств, например, наличие аварийно-восстановительного запаса отдельных элементов конструкции моста в непосредственной близости к объекту.

Список литературы

1 Шаповалов, В. Л. Анализ сценариев развития ситуации при различных воздействиях на искусственные сооружения железных дорог / В. Л. Шаповалов, П. В. Харламов, А. Г. Кочур // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 209–223. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_209. – EDN QJMXDO.

References

1 Shapovalov, V. L. Analysis of scenarios for the development of the situation under various impacts on artificial structures of the railways / V. L. Shapovalov, P. V. Kharlamov, A. G. Kochur // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1(89). – P. 209–223. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_209. – EDN QJMXDO.

2 **СП 35.13330.2011.** Мосты и трубы (актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*) : издание официальное : утвержден Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2011 г. N 635 и введен в действие с 01 января 2013 г. – Москва, 2013. – 145 с.

3 **СП 46.13330.2012.** Мосты и трубы (актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91) : издание официальное : утвержден Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 28 декабря 2010 г. N 822 ; введен в действие с 20 мая 2011 г. – Москва, 2011. – 350 с.

4 **СП 79.13330.2012.** Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний : издание официальное : утвержден Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30.06.2012 г. N 273 ; введен в действие с 1 января 2013 г. – Москва, 2013. – 38 с.

5 Справочник офицера-мостовика железнодорожных войск / под редакцией А. Д. Горчакова. – Москва : Военное издательство Министерства обороны СССР, 1963. – 952 с.

6 **ПВКМ-79.** Инструкция по проектированию железнодорожных временных и краткосрочных мостов и труб / Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства. – Москва, 1982. – 217 с.

7 Распоряжение ОАО «РЖД» от 30.12.2010 № 2795р «О введении в действие Указаний о классификации работ по восстановлению инженерных сооружений ОАО «РЖД». – URL: https://e-ecolog.ru/docs/d8BSvmHVNzS7JAIA_QHdP/1?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения: 04.09.2023).

8 Распоряжение ОАО «РЖД» от 25.02.2021 N 377/р «Об утверждении Порядка составления плана действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». – URL: https://e-ecolog.ru/docs/OfvJ_HPOhRBFxQPh2XayO (дата обращения: 04.09.2023).

9 **СНиП 1.04.03-85*.** Часть II. Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений : утверждены постановлением Госстроя СССР и Госплана СССР от 17 апреля 1985 г. N 51/90 (с изменениями от 10 февраля 1987 г.). Срок введения в действие 1 января 1991. – Москва, 1991. – 437 с.

10 **MPP-3.2.81-12.** Рекомендации по определению норм продолжительности строительства зданий и

2 **SP 35.13330.2011.** Bridges and pipes (updated edition of SNiP 2.05.03-84*) : official edition : approved by Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) dated December 29, 2011 N 635 and put into effect from January 01, 2013. – Moscow, 2013. – 145 p.

3 **SP 46.13330.2012.** Bridges and pipes (Updated version of SNiP 3.06.04-91) : official edition : approved by Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) dated December 28, 2010 N 822 and introduced in effect from May 20, 2011. – Moscow, 2011. – 350 p.

4 **SP 79.13330.2012.** Bridges and pipes. Rules for examinations and tests : official edition : approved and put into effect by Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation (Ministry of Regional Development of Russia) dated 06.30.2012 N 273 and put into effect on January 1, 2013. – Moscow, 2013. – 38 p.

5 Reference book of the bridge officer of the railway troops / A.D Gorchakov // Military publishing house of the Ministry of Defense of the USSR. Moscow. 1963. – 952 p.

6 **PVKM-79.** Instructions for the design of railway temporary and short-term bridges and pipes / All-Union. Research Institute of Transport Construction. – Moscow, 1982. – 217 p.

7 Decree of Russian Railways dated December 30, 2010 No. 2795r «On the Enactment of Instructions on the Classification of Works for the Restoration of Engineering Structures of Russian Railways». – URL: https://e-ecolog.ru/docs/d8BSvmHVNzS7JAIA_QHdP/1?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (date of access: 09/04/2023).

8 Decree of Russian Railways dated 02.25.2021 N 377/r «On approval of the Procedure for drawing up an action plan for the prevention and elimination of natural and man-made emergencies». – URL: https://e-ecolog.ru/docs/OfvJ_HPOhRBFxQPh2XayO (date of access: 09/04/2023).

9 **SNiP 1.04.03-85*.** Part II. Standards for the duration of construction and groundwork in the construction of enterprises, buildings and structures : approved Decree of the Gosstroy of the USSR and the State Planning Committee of the USSR of April 17, 1985 N 51/90 (as amended on February 10, 1987). Effective date January 1, 1991. – Moscow, 1991. – 437 p.

10 **MRR-3.2.81-12.** Recommendations for determining the norms for the duration of construction of buildings and structures, the

сооружений, строительство которых осуществляется с привлечением средств бюджета города Москвы : издание официальное : утверждены и введены в действие приказом Комитета города Москвы по ценовой политике в строительстве и государственной экспертизе проектов от 12.09.2012 г. № 50. – Москва, 2012. – 93 с.

construction of which is carried out with the involvement of funds from the budget of the city of Moscow : official publication : approved and put into effect by the order of the Committee of the city of Moscow on pricing policy in construction and state examination of projects dated 12.09.2012. No. 50. – Moscow, 2012. – 93 p.

V. L. Shapovalov, M. V. Okost, A. V. Morozov, A. G. Kochur

APPROACHES FOR ASSESSING THE TIME PERIOD OF THE BRIDGE STRUCTURE REBUILDING AFTER DESTRUCTION

Abstract. The paper considers normative documents and other open sources, which give the norms for the duration of the construction of bridge structures, depending on their type and parameters. The terms of construction of bridge structures were analyzed, which had a total length of 30 to 1800 m. As a result of the analysis, the construction terms in the main and preparatory periods were determined and the average values of the duration per linear meter of the structure were obtained. On the basis of the data obtained from regulatory documents and open sources, graphs of the dependence of the duration of construction on the length of the bridge structure were constructed. Based on the totality of the data obtained, graphs of the minimum, maximum and average construction time were constructed. The obtained values were compared with the time spent on the restoration of bridge structures that were destroyed as a result of natural impacts on real objects.

Keywords: artificial structures, bridges, destruction, impacts, restoration.

For citation: Approaches for assessing the time period of the bridge structure rebuilding after destruction / V. L. Shapovalov, M. V. Okost, A. V. Morozov, A. G. Kochur // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 135–143. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_135.

Сведения об авторах

Шаповалов Владимир Леонидович

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

Окост Максим Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: cpd@rgups.ru

Морозов Андрей Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Физика»,
кандидат технических наук,
e-mail: cpd@rgups.ru

Кочур Андрей Григорьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Физика»,
доктор физико-математических наук, профессор,
e-mail: agk2007@bk.ru

Information about the authors

Shapovalov Vladimir Leonidovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Track and Track Facilities»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Okost Maksim Victorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Track and Track Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Morozov Andrey Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Physics»,
Candidate of Engineering Sciences,
e-mail: cpd@rgups.ru

Kochur Andrey Grigorievich

Rostov State University of Railways (RSTU),
Chair «Physics»,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor,
e-mail: agk2007@bk.ru

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 629.421.4(045)

DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_144

*С. Н. Журавлев***К ВОПРОСУ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ
МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА ПРИ РАБОТЕ НА СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКЕ**

Аннотация. Рассматривается реализация проекта автоматического управления маневровыми локомотивами при работе на сортировочной станции. Приведена информация о реализованном проекте модернизации тепловозов ТЭМ7А для возможности диагностирования оборудования локомотива при работе в беспилотном режиме. Представлена структурная схема бортового оборудования маневрового тепловоза ТЭМ7А, имеющего возможность эксплуатироваться в автоматическом режиме под управлением систем верхнего уровня, а также осциллограммы результатов математического моделирования процессов надвига и роспуска составов. Приведены результаты опытных поездок локомотива с разработанным алгоритмом на сортировочной станции Лужская Октябрьской ж. д. (с различными скоростями движения и массами состава).

Ключевые слова: маневровый локомотив, беспилотное управление, поддержание заданной скорости движения, математическое моделирование, надвиг и роспуск составов, результаты испытаний маневровых локомотивов при работе в автоматическом режиме, круиз-контроль для локомотива.

Для цитирования: Журавлев, С. Н. К вопросу поддержания заданной скорости движения маневрового локомотива при работе на сортировочной горке / С. Н. Журавлев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 144–151. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_144.

Введение

Развитие беспилотного управления на железнодорожном транспорте является одной из важных тенденций современности. Эта технология предлагает новые возможности для повышения безопасности и эффективности железнодорожных перевозок. Автоматические системы могут оптимизировать скорость и расписание поездов, избегая заторов и минимизируя время на простой поездов. Это позволяет сократить время в пути и улучшает общую производительность транспортной системы. В холдинге ОАО «РЖД» также ведутся работы по внедрению систем беспилотного управления. Пилотным проектом по применению систем автоматического управления является сортировочная станция нового поколения – станция Лужская Октябрьской железной дороги [1–2].

Одной из задач в комплексе работ по внедрению беспилотных локомотивов является задача по автоматизации подвижного состава (локомотивов). Экспериментальными локомотивами для отработки технических решений по автоматизации подвижного состава стали три локомотива ТЭМ7А № 534, 542 и 543, построенные на Людиновском тепловозоремонтном заводе и оборудованные системой автоматического управления горочным локомотивом. При реализации проекта и формировании требований к выполняемым функциям при работе в автоматическом режиме архитектура оборудования тепловоза и его системы подверглись значительным изменениям. В ходе последнего этапа дооснащения тепловоза ТЭМ7А № 543 на тепловоз был установлен ряд дополнительного оборудования:

- регулятор ЭРЧВ – для повышения управляемости и диагностируемости ДГУ;
- кран 224Д – для обеспечения управления локомотивным прямодействующим тормозом и его диагностики;
- клапаны продувки ТМ – для обеспечения выполнения операции продувки ТМ при объединении тормозов с составом;
- блок управления стояночным тормозом (БУСТ), блок сбора и обработки диагностических сигналов (БС ОДС) – для обеспечения безопасного состояния тепловоза при нештатных ситуациях;
- реализован протокол взаимодействия с БОПМЛ для снижения скорости и остановки при обнаружении препятствий, а также обеспечения управления локомотивом от ЦАМР (центр автоматизации маневровой работы) и ЦУМЛ (центр управления маневровым локомотивом) в режимах автоматического и дистанционного управления.

Структура бортового оборудования тепловоза ТЭМ7А с установленным и демонтированным оборудованием представлена на рис. 1.

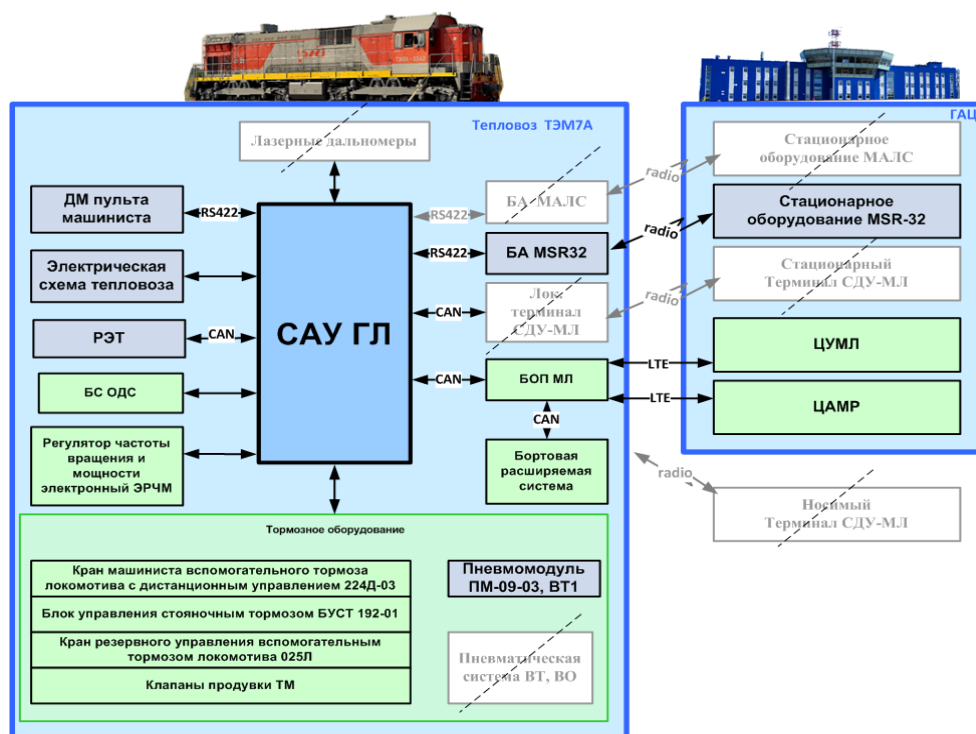


Рис. 1. Структура бортового оборудования тепловоза ТЭМ7А в 2023 году:

ДМ – дисплей машиниста, *САУ ГЛ* – система автоматического управления горочным локомотивом, *РЭТ* – регулятор электрического тормоза, *БС ОДС* – блок сбора и обработки диагностических сигналов, *ТМ* – тормозная магистраль, *БОП МЛ* – блок обнаружения препятствий маневрового локомотива, *ЦУМЛ* – центр управления маневровым локомотивом, *ЦАМР* – центр автоматизации маневровой работы, *СДУ-МЛ* – система дистанционного управления маневровым локомотивом, *БА МАЛС* – бортовая аппаратура маневровой автоматической локомотивной сигнализации, *БА MSR-32* – бортовая аппаратура системы управления сортировочным процессом

Для работы в автоматическом режиме особые требования предъявляются и к алгоритмам управления тепловозом, поскольку необходимо безопасно управлять скоростью и тормозами локомотива, так как даже небольшая неисправность или сбой в работе оборудования локомотива, при отсутствии машиниста на борту, может привести к крушению или прерыванию выполняемого технологического процесса с ожиданием вмешательства дежурной локомотивной бригады. Для снижения количества выходов из автоматического режима по причине неисправности в программном обеспечении системы управления реализованы предрейсовые тесты, позволяющие диагностировать неисправности тепловоза. Перед выдачей тепловоза в работу прохождение предрейсовой диагностики в части управления сборкой схемы тяги, схемы ЭДТ, ослаблением возбуждения тяговых электродвигателей, прохождение тестов управления локомотивным и поездным тормозом является обязательным.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Для реализации задачи автоматического управления скоростью движения локомотива обусловленной безопасностью (не превышение допустимой скорости) и чрезвычайно жесткими требованиями к поддержанию заданной скорости движения при надвиге и роспуске составов (особенность системы управления сортировочным процессом MSR-32 отклонение скорости от заданной не должно превышать 0,18 км/ч в диапазоне скоростей 1,8–21,6 км/ч) [3–4] была разработана математическая модель электропривода тепловоза ТЭМ7А и уникальный алгоритм поддержания заданной скорости движения, упрощенная функциональная схема которой представлена на рис. 2 [5–6].

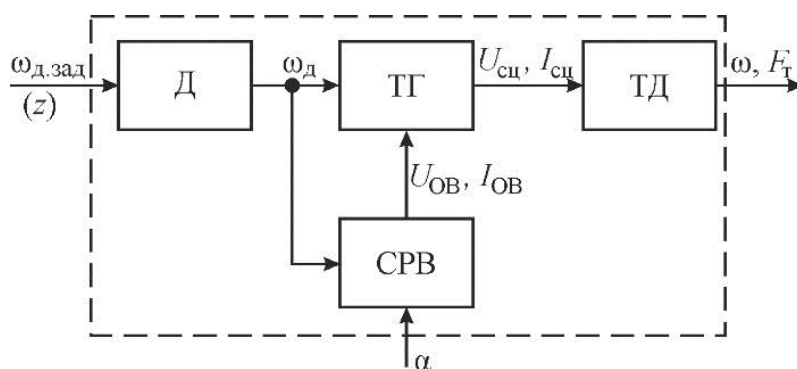


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема электропередачи тепловоза ТЭМ7А:

Д – дизель, *ТГ* – тяговый генератор, *ТД* – тяговый двигатель, *СРВ* – система регулирования возбуждения *ТГ*; $\omega_{д,зад}$, $\omega_{д}$ – заданная частота вращения вала *Д* и фактическая частота вращения вала *Д*, z – выход штока силового сервомотора регулятора частоты вращения, $U_{сц}$, $I_{сц}$ – напряжение и ток обмотки якоря *ТГ*, $U_{ОВ}$, $I_{ОВ}$ – напряжение и ток обмотки возбуждения *ТГ*, α – угол открытия тиристорov управляемого выпрямителя, ω – частота вращения вала *ТД*, F_T – сила тяги

В основе алгоритма регулятора скорости движения локомотива лежит пропорционально-интегральный закон регулирования (1), для нахождения оптимальных коэффициентов K_p и K_i в соответствии с весом состава использовался численный метод Монте-Карло [7–8]:

$$U(t) = P + I = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (1)$$

где $U(t)$ – функция; P – пропорциональная составляющая; I – интегральная составляющая; $e(t)$ – текущая ошибка; K_p – пропорциональный коэффициент; K_i – интегральный коэффициент.

Поскольку при роспуске состава осуществляется изменение веса состава (за счет отцепя группы вагонов) и имеют место переходные колебательные процессы, для оценки качества регулирования применяется квадратичный интегральный критерий I_2 (2) [9–10].

$$I_2 = \int_0^{\infty} (\Delta X)^2 dt. \quad (2)$$

Осциллограммы результатов математического моделирования надвига и роспуска состава на сортировочную горку приведены на рис. 3.

На рис. 3, *а* изображены полученные зависимости напряжения $U_{ТГ}$ и тока $I_{ТГ}$ тягового генератора, а также скорости V в зависимости от времени при надвиге и роспуске состава с заданной скоростью 5 км/ч для состава из 20 вагонов массой по 80 тонн каждый. Операция надвига состава на сортировочную горку переходит в операцию роспуск в момент времени $t = 550$ с., имеют место переходные колебательные процессы (поскольку осуществляется отцеп группы вагонов). Значения параметров регулятора скорости $K_p = 20$, $K_i = 0,008$ обеспечивают минимум функции $I_2 = 336,9$, процесс разгона более подробно представлен на рис. 3, *б*.

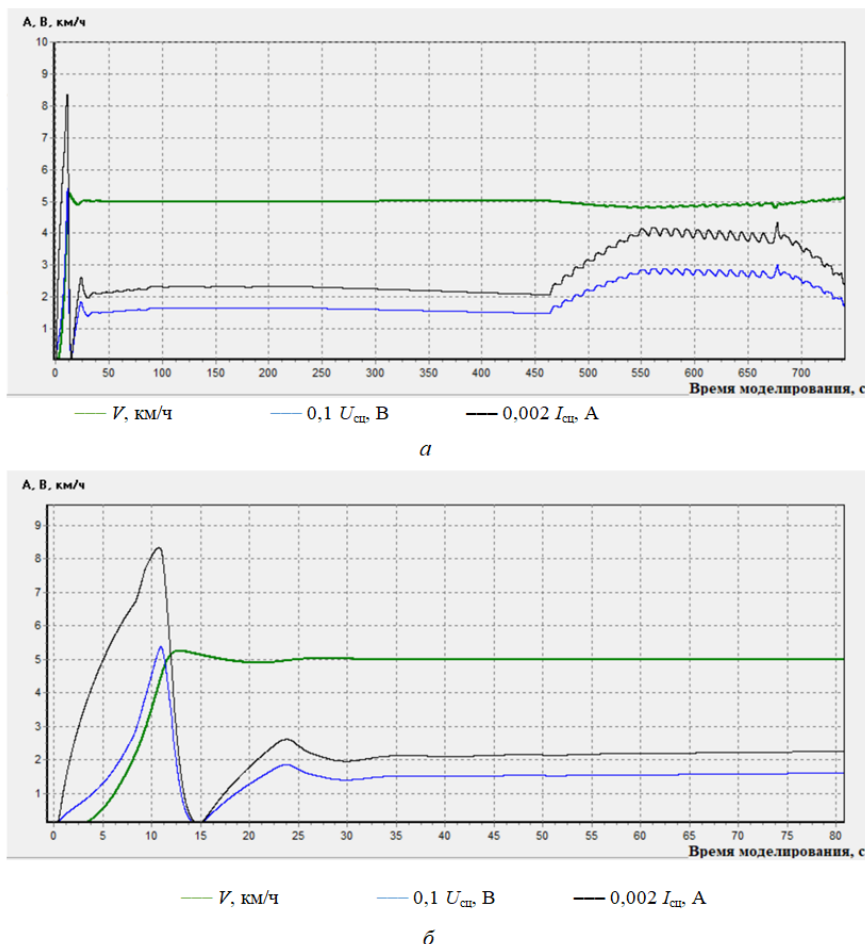


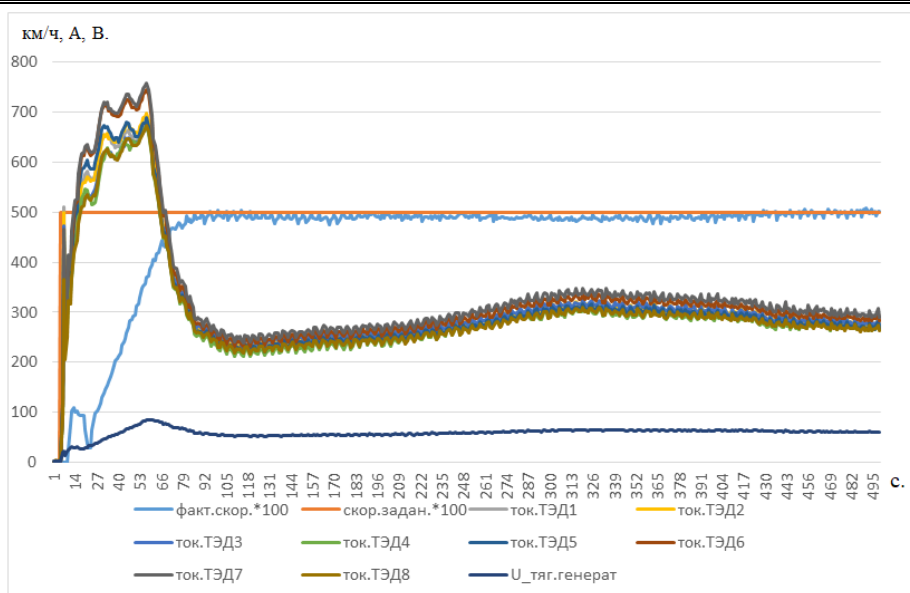
Рис. 3. Осциллограммы результатов математического моделирования:

а – осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона, надвига и роспуска состава массой 1600 т тепловозом ТЭМ7А; *б* – осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона состава массой 1600 т тепловозом ТЭМ7А

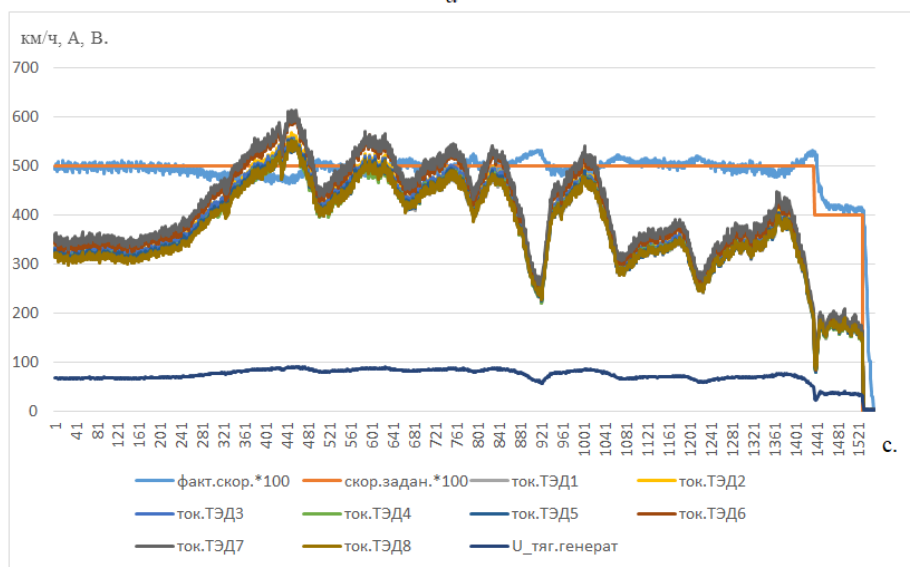
Для верификации разработанной математической модели электропривода тепловоза ТЭМ7А и проверки разработанного алгоритма поддержания заданной скорости в июле 2023 года на станции Лужская Октябрьской ж. д. проведены опытные поездки. В ходе испытаний маневровым тепловозом ТЭМ7А № 543 в автоматическом режиме осуществлялся надвиг и роспуск составов различных масс (от 900 т до 5200 т) под управлением системы верхнего уровня (система управления сортировочным процессом MSR32) с различными заданными скоростями движения (от 2 до 15 км/ч).

На рис. 4, *а* и *б* представлены осциллограммы зависимости напряжения тягового генератора, тока тяговых двигателей и скорости в зависимости от времени при опытной поездке тепловоза ТЭМ7А с составом массой 5100 т. На рис. 4, *а* процесс разгона состава и надвиг состава на сортировочную горку с заданной скоростью 5 км/ч. Процесс роспуска данного состава представлен на рис. 4, *б* (роспуск начинается при $t = 400$ с), при этом возникающие колебательные процессы связаны с групповыми отцепками вагонов (изменение массы состава). В конце роспуска от системы управления верхнего уровня происходит изменение заданной скорости с 5 км/ч до 4 км/ч, регулятор обрабатывает данное задание с необходимой точностью.

На рис. 5, *а*, *б* и *в* представлены осциллограммы зависимости напряжения тягового генератора, тока тяговых двигателей и скорости в зависимости от времени при опытной поездке тепловоза ТЭМ7А с составом массой 940 т. На рис. 5, *а* процесс разгона состава и надвиг состава на сортировочную горку с заданной скоростью 5 км/ч. На рис. 5, *б* представлена работа регулятора скорости при изменении заданной скорости с 5 до 3 км/ч, как видно регулятор обрабатывает данное задание с необходимой точностью. Процесс роспуска данного состава начинается при $t = 680$ с. На рис. 5, *в* представлен процесс трогания локомотива после остановки при роспуске роспуска состава (при перекрытии горочного светофора).



а



б

Рис. 4. Осциллограммы результатов математического моделирования:
а – осциллограмма результатов математического моделирования процесса разгона состава массой 5100 т тепловозом ТЭМ7А; *б* – осциллограмма результатов математического моделирования процесса роспуска состава массой 5100 т тепловозом ТЭМ7А



Рис. 5. Осциллограммы результатов математического моделирования:

а – осциллограмма результатов математического моделирования процессов разгона и надвига составов массой 940 т тепловозом ТЭМ7А; *б* – осциллограмма результатов математического моделирования процессов надвига и роспуска состава массой 940 т тепловозом ТЭМ7А с изменением заданной скорости с 5 км/ч до 3 км/ч.; *в* – осциллограмма результатов математического моделирования процесса роспуска состава массой 940 т тепловозом ТЭМ7А

Выводы

Результатом работы является уникальный алгоритм управления скоростью тепловоза ТЭМ7А при работе на сортировочной горке в режиме надвига и роспуска состава. По результатам математического моделирования с помощью метода оптимизации Монте-Карло выбраны коэффициенты K_p , K_i для пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора), при которых обеспечивается минимум интегральной ошибки скорости второго порядка, а динамическая ошибка не превышает 0,15 км/ч (соответствует требованиям системам управления верхнего уровня к точности поддержания заданной скорости локомотивом). Проведены опытные поездки на станции Лужская Октябрьской железной дороги, по результатам получена достаточная сходимость расчетных показателей с данными по испытаниям тепловозов ТЭМ7А верификации цифровой модели электропривода локомотива (расхождение не более 8 %). Данный алгоритм может быть рекомендован к применению на маневровых тепловозах ТЭМ7А, оборудованных микропроцессорными системами управления и диагностики, которые будут эксплуатироваться в автоматическом режиме.

Список литературы

1 **Zhuan, X.** Cruise control Scheduling of Heavy Haul Trains / X. Zhuan, X. Xia // IEEE Transactions on control system technology. – 2006. – Vol. 14. – No. 4. – С. 757–766. – ISSN 1558-0865.

References

1 **Zhuan, X.** Cruise control Scheduling of Heavy Haul Trains / X. Zhuan, X. Xia // IEEE Transactions on control system technology. – 2006. – Vol. 14. – No. 4. – P. 757–766. – ISSN 1558-0865.

2 Концептуальная проработка удаленного рабочего места машиниста-оператора электропоезда ЭС2Г как еще один шаг на пути к беспилотному вождению поездов / А. С. Куренков, С. А. Дмитриев, А. В. Сорокин, К. А. Суслов // Журнал Локомотив. – 2021. – № 3. – С. 9–10. – ISSN 0869-8147.

3 **Шелухин, В. И.** Автоматизация и механизация сортировочных горок / В. И. Шелухин. – Москва : Маршрут, 2005. – 240 с. – ISBN 5-89035-239-3.

4 Требования к радиуправляемому локомотиву. Станция Лужская-сортировочная. (Lokanforderungen_Luz) RU_Henning, 2012 – 17 с.

5 **Журавлев, С. Н.** Система автоматического управления скоростью локомотива / С. Н. Журавлев, О. Е. Пудовиков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 2. – С. 181–194. – ISSN 2223-9987.

6 **Пудовиков, О. Е.** Система автоматического управления скоростью грузового поезда с распределенной тягой / О. Е. Пудовиков, В. Г. Сидоренко [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 9. – С. 47–54. – ISSN 0013-5860.

7 **Журавлев, С. Н.** Система управления силовой установкой маневрового тепловоза с алгоритмом автоматического регулирования скорости / С. Н. Журавлев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – № 3–4. – С. 31–38. – ISSN 2658-3488.

8 Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways / Hairong Dong, Bin Ning, Baigen Cai, Zhongsheng Hou // IEEE circuits and systems magazine. – 2010. – Vol. 10. – Issue 2. – P. 6–18 – ISSN 1558-0830.

9 **Зайцев, А. П.** Основы теории автоматического управления : учебное пособие / А. П. Зайцев. – Томск, 2000. – С. 83–84.

10 **Баранов, Л. А.** Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1984. – 312 с.

2 Conceptual development of the remote workplace of the driver-operator of the electric train ES2G as another step towards unmanned train driving / A. S. Kurenkov, S. A. Dmitriev, A. V. Sorokin, K. A. Suslov // Journal Locomotive. – 2021. – No. 3. – P. 9–10. – ISSN 0869-8147.

3 **Shelukhin, V. I.** Automation and mechanization of sorting slides / V. I. Shelukhin. – Moscow : Marshrut, 2005. – 240 p. – ISBN 5-89035-239-3.

4 Trebovaniya k radiupravlyаемому lokomotivu. Stanciya Luzhskaya-sortirovochnaya. (Lokanforderungen_Luz) RU_Henning, 2012 – 17 p.

5 **Zhuravlev, S. N.** Automatic locomotive speed control system / S. N. Zhuravlev, O. E. Pudovikov // Bulletin of scientific research results. – 2023. – No. 2. – P. 181–194. – ISSN 2223-9987.

6 **Pudovikov, O. E.** Automatic speed control system of a freight train with distributed traction / O. E. Pudovikov, V. G. Sidorenko [et al.] // Electrical Engineering. – 2019. – No. 9. – P. 47–54. – ISSN 0013-5860.

7 **Zhuravlev, S. N.** Control system of a shunting locomotive power plant with an algorithm for automatic speed control / S. N. Zhuravlev // Automation and modeling in design and management. – 2021. – No. 3–4. – P. 31–38. – ISSN 2658-3488.

8 Automatic Train Control System Development and Simulation for High-Speed Railways / Hairong Dong, Bin Ning, Baigen Cai, Zhongsheng Hou // IEEE circuits and systems magazine. – 2010. – Vol. 10. – Issue 2. – P. 6–18 – ISSN 1558-0830.

9 **Zaitsev, A. P.** Fundamentals of the theory of automatic control : a textbook / A. P. Zaitsev. – Tomsk, 2000. – P. 83–84.

10 **Baranov, L. A.** Systems of automatic and telemechanic control of electric vehicles / L. A. Baranov, E. V. Erofeev, V. M. Maksimov [et al.]. – Moscow : Transport, 1984. – 312 p.

S. N. Zhuravlev

THE QUESTION OF KEEPING A SPECIFIED SPEED OF A SHUNTING LOCOMOTIVE WHEN OPERATING AT MARSHALLING YARDS

Abstract. The paper describes the project implementation of shunting locomotives automatic control when operating at marshaling yard. It is provided the information about the implemented project of TEM7A diesel locomotives modernization for the possibility of diagnosing locomotive equipment when operating in unmanned mode. It is presented a block diagram of the on-board equipment of the TEM7A shunting diesel locomotive, which is equipped to operate in automatic

mode under the control of top-level systems. And it is given the oscillogram records of mathematical modeling results of the train pushing and breaking up processes. The results of the locomotive test trips with the developed algorithm at the Luzhskaya marshaling yard of the Oktyabrskaya railway are given (with different speeds and masses of the train).

Keywords: shunting locomotive, unmanned control, keeping a specified speed, mathematical modeling, train pushing and breaking up, test results of shunting locomotives when operating in automatic mode, cruise control for a locomotive.

For citation: Zhuravlev, S. N. The question of keeping a specified speed of a shunting locomotive when operating at marshaling yards / S. N. Zhuravlev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 144–151. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_144.

Сведения об авторах

Журавлев Сергей Николаевич

акционерное общество
«Научно-исследовательский и
конструкторско-технологический институт
подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»),
заместитель главного инженера,
e-mail: zhuravlev-sn@vnikti.com

Information about the authors

Zhuravlev Sergey Nikolayevich

Joint Stock «Company Scientific-Research
and Design-Technology Institute of Rolling
Stock» (JSC “VNIKTI”),
Deputy Chief Engineer,
e-mail: zhuravlev-sn@vnikti.com

О. Л. Игнатьев, Я. К. Склифус, В. В. Ширококов, С. Шевченко

РАЗДВИЖНАЯ КОЛЕСНАЯ ПАРА ДЛЯ ВАГОНОВ, ОБРАЩАЮЩИХСЯ В МЕЖГОСУДАРСТВЕННОМ СООБЩЕНИИ

Аннотация. Представлена конструкция раздвижной колесной пары для вагонов, обращающихся в межгосударственном сообщении с разной шириной колеи. Представлены основные элементы разработанной раздвижной колесной пары, рассмотрено их взаимодействие при смене ширины колеи. Отличительной особенностью предлагаемой конструкции является использование в качестве фиксаторов стопорных пластин, которые работают исключительно на срез без сдвигающих усилий и дополнительно прижимаются к пазам за счет центробежной силы инерции при вращении колеса, что обеспечивает фиксацию колес при движении в случае поломки механизма. Данная конструкция характеризуется компактностью конструкции, повышенной надежностью и долговечностью. Также предложена инфраструктура железнодорожной станции для обеспечения смены колеи.

Ключевые слова: колесная пара, ступица, обод, фиксатор, привод фиксаторов, напольное оборудование.

Для цитирования: Раздвижная колесная пара для вагонов, обращающихся в межгосударственном сообщении / О. Л. Игнатьев, Я. К. Склифус, В. В. Ширококов, С. Шевченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 152–158. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_152.

Введение

Для увеличения пассажиропотока и развития грузоперевозок между государствами, имеющими железнодорожный путь с различной шириной рельсовой колеи, в работе [1] была показана целесообразность разработки раздвижных колесных пар (РКП) для нетягового подвижного состава.

На основе имеющихся данных о недостатках конструкции существующих РКП [2–5] была разработана новая конструкция РКП. Важным фактором при разработке является новизна и практичность конструкции при изготовлении и эксплуатации.

Основная цель и главная концептуальная идея – сохранение геометрических размеров оси, профиля дорожки качения и ступицы колеса. Это позволит ввести РКП в эксплуатацию без модернизации тележек и прочего оборудования вагонов, находящихся в эксплуатации в настоящее время. Также большое значение в разработке любых деталей и узлов, связанных с безопасностью движения подвижного состава, имеет надежность.

Основная часть

Для выполнения заданных критериев было предложено использовать схему подвижной части обода колеса при неподвижной ступице. Соединение между ободом и ступицей колеса обеспечивается шлицевым соединением. Это позволяет сохранить ограничение степени свободы в радиальном направлении, при этом обеспечив осевое смещение. Для фиксации подвижного обода относительно ступицы колеса предложено использовать подвижные фиксаторы.

На основе предварительной оценки местом размещения фиксирующего устройства было выбрано пространство между ступицей колеса и лабиринтным кольцом буксового узла на предподступичной части оси. На этапе первичного проектирования размерных цепей было выявлено несоответствие имеющихся размеров требуемым размерам проектируемого объекта.

В связи с этим было принято решение разместить узел фиксации на подступичной части оси, с внутренней стороны обода колеса. Такое расположение обеспечивает свободное пространство для перемещения деталей в осевом направлении, устраняет возможность разблокировки фиксирующего узла при воздействии посторонних предметов, находящихся на рельсовых путях, позволяет использовать место для установки переводного напольного оборудования между рельсами.

Основные части и элементы РКП

Спроектированная раздвижная колесная пара (рис. 1) включает в себя следующие основные узлы:

– ось РУ1Ш-957Г;

– два колеса (каждое колесо состоит из обода и ступицы);

- два комплекта фиксаторов (комплект включает в себя 12 фиксаторов);
- два привода фиксаторов;
- два ограничителя привода фиксаторов;
- два ограничителя фиксаторов;
- две пружины привода.

Колесо РКП (рис. 2) состоит из ступицы с плоскоконическим диском и обода. Форма профилей ступицы колеса, диска и обода соответствует ГОСТ 10791–2011 [6]. Материал ступицы и обода колеса – сталь колесная марки 1 по ГОСТ 10791–2011. Связь между ступицей и ободом обеспечена шлицевым соединением $66z \times 8,0m \times 30,0P \times 5H/5h$, рассчитанным согласно ISO 4156-2:2005 [7] в программе проектирования шлицевых соединений, встроенной в среду разработки Autodesk Inventor. Шлицевое соединение обеспечивает нормальный режим работы при нагрузке в радиальном направлении.

Ступица колеса (рис. 3) с внутренней стороны имеет 12 отверстий, предназначенных для размещения стопорных пластин фиксаторов. Обод колеса (см. рис. 3) с внутренней стороны имеет 24 отверстия, которые предназначены для фиксации и геометрического совмещения относительно ступицы колеса. Отверстия расположены друг от друга на расстоянии, равном половине разницы ширины колеи, т.е. $(1520 - 1435)/2 = 42,5$ мм.

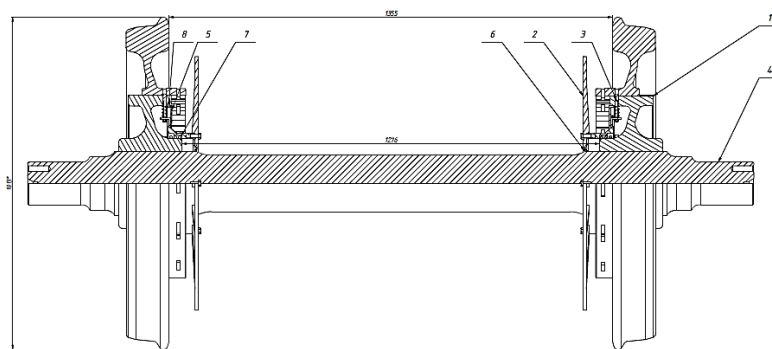


Рис. 1. Раздвижная колесная пара:

1 – колесо; 2 – привод фиксаторов; 3 – фиксатор; 4 – ось РУШ; 5 – упор фиксаторов;
6 – упор привода фиксаторов; 7 – пружина фиксаторов; 8 – винт

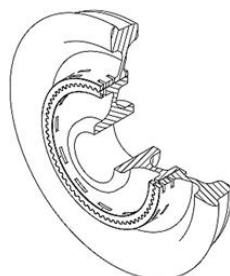


Рис. 2. Колесо

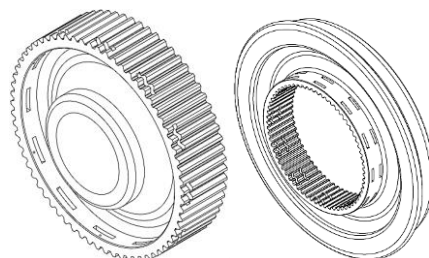


Рис. 3. Ступица и обод колеса

Комплект фиксирующих элементов состоит из 12 фиксаторов, расположенных друг относительно друга в одной плоскости. Фиксатор (рис. 4) состоит из стопорной пластины, двух шпилек, двух пружин и направляющего толкателя. Шпилька имеет резьбу $M8 \times 1,25-6g$ для соединения со стопорной пластиной и резьбу $M5 \times 0,8-6g$ для соединения с направляющим толкателем корончатой гайкой $M5-6H$ ГОСТ 5932-73 [8].

Стопорная пластина выполнена с закругленной частью радиусом R 316 для равномерной фиксации или расфиксации. По бокам выполнены фаски с размером 3 мм под углом 60° для мгновенного перемещения в положение фиксации при смене положения обода относительно ступицы во время смены колеи. Увеличен запас прочности стопорной пластины при действии нагрузки на срез за счет использования стали 27ХГР ГОСТ 4543–71 [9] с высоким пределом текучести 1175 МПа, пределом прочности при растяжении 1370 МПа.

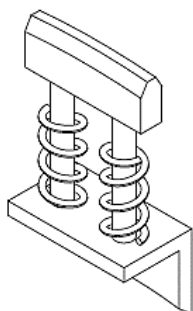


Рис. 4. Фиксатор

Привод фиксаторов (рис. 5) состоит из отжимной втулки и нажимного кольца, соединенных между собой четырьмя болтами с углублением под шестигранный ключ M10×25(3) ISO 4017 [10].

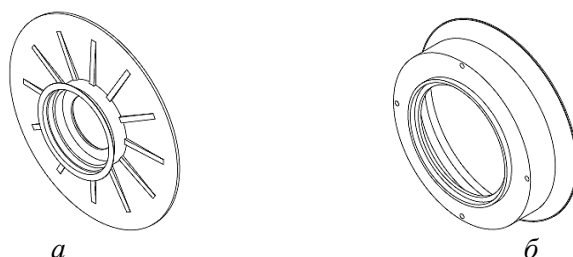


Рис. 5. Привод фиксаторов:

a – кольцо нажимное; *б* – втулка отжимная

Принцип работы РКП

Чтобы работа РКП была полноценной, требуется наличие напольного оборудования для смены ширины колеи (рис. 6).

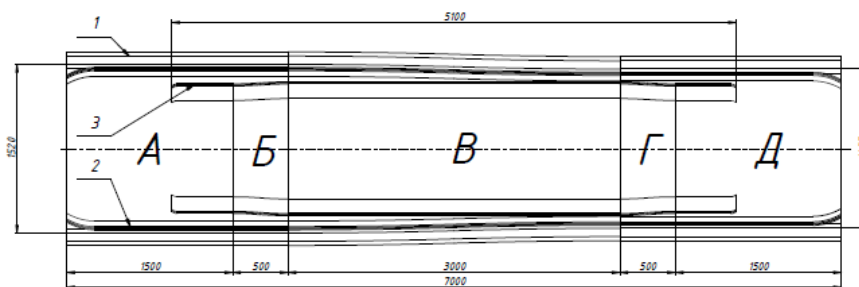


Рис. 6. Напольное оборудование для смены колеи 1520/1435 мм:

1 – рельс Р65; 2 – рельс направляющий; 3 – рельс разблокирующий

Во время движения подвижного состава с любой стороны – 1520 мм или 1435 мм напольное оборудование обеспечивает смену колеи РКП. Общая длина участка составляет 7 м, что существенно меньше существующих систем напольного оборудования.

При заходе первой РКП на участок смены колеи она попадает в зону А или Д (А со стороны 1520 мм). Зона А или Д подготовительная длиной 1,5 м, гребень колеса «встречает» отогнутый радиусом R500 направляющий рельс 2, который ограничивает перемещение обода колеса до окончания процесса смены колеи. Через 1 м в контакт с нажимными кольцами приводов фиксаторов вступает разблокирующий рельс 3.

В зоне Б разблокирующий рельс 3 переводит механизм фиксатора в крайнее положение, при этом фиксаторы занимают нижнее положение, происходит освобождение обода в осевом направлении.

В зоне В происходит ответственный момент – смена положения обода относительно ступицы колеса. За 3 м обод на каждом колесе перемещается на 42,5 мм. Разблокирующий рельс продолжает удерживать нажимное кольцо в разблокированном состоянии.

Зона Г идентична зоне Б, процесс протекает в обратном направлении. Разблокирующий рельс 3 переводит механизм фиксатора в нормальное положение, при этом фиксаторы занимают верхнее положение, происходит блокировка обода относительно ступицы. Длина зоны Г и Б составляет 0,5 м.

В нормальном (заблокированном) состоянии РКП (рис. 7), приводы фиксаторов прижаты к стопору привода 3 под действием пружины 10. Нажимная втулка 2 конусной частью воздействует на направляющий толкатель 5 фиксатора, преодолевая силу нажатия пружины фиксатора 7, заставляя его переместиться в крайнее верхнее положение. Ребро на конце конусной части нажимной втулки ограничивает дальнейшее перемещение толкателя. Стопор, упираясь в боковую плоскость толкателя фиксаторов, предотвращает выпадение или излом фиксаторов. Стопорные пластины 6 фиксатора пересекают контур шлицов ступицы 9 и обода колеса 8.

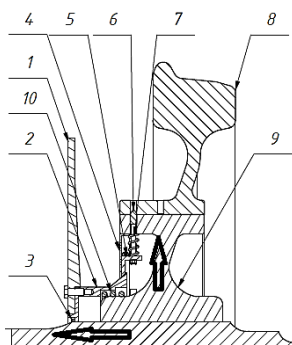


Рис. 7. РКП в нормальном состоянии:

1 – нажимное кольцо; 2 – нажимная втулка; 3 – упор привода фиксаторов; 4 – упор фиксаторов;
5 – толкатель направляющий; 6 – стопорная пластина; 7 – пружина фиксаторов; 8 – обод; 9 – ступица;
10 – пружина привода

Процесс разблокировки начинается с перемещения приводов фиксаторов (рис. 8). Преодолевая нажатие пружины 10, приводы перемещаются в положение «разблокировано». Нажимная втулка 2 прижимается к ступице колеса 9, конусная часть сокращает диаметр сопряжения с толкателем фиксатора 5, тем самым освобождая место. Фиксаторы под действием пружины 7, которая упирается в ступицу и толкатель, начинают перемещаться вниз. Стопорные пластины 6 выходят из зацепления контура шлицов, освобождая осевое перемещение обода 8 относительно ступицы 9 колеса.

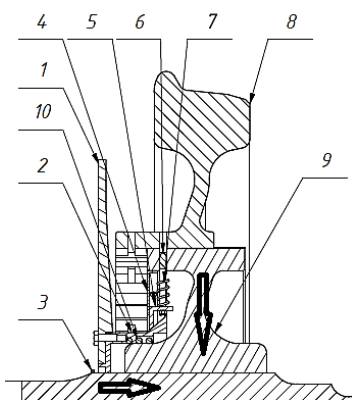


Рис. 8. РКП в процессе разблокировки:

1 – нажимное кольцо; 2 – нажимная втулка; 3 – упор привода фиксаторов; 4 – упор фиксаторов;
5 – толкатель направляющий; 6 – стопорная пластина; 7 – пружина фиксаторов; 8 – обод; 9 – ступица;
10 – пружина привода

В переходном процессе смены положения обода 8 (рис. 9) привод фиксаторов находится в разблокированном положении. Процесс блокировки протекает в обратном порядке. Когда разблокирующий рельс «освобождает» привод, он под действием пружины привода 10 начинает перемещаться в сторону стопора 3. Нажимная втулка 2 прижимается к толкателю фиксатора 5, конусная часть увеличивает диаметр сопряжения с толкателем фиксатора, тем самым занимая место под ним. Фиксаторы под действием нажимной втулки, которая упирается в толкатель, начинают перемещаться вверх. Стопорные пластины 6 входят в зацепление контура шлицов, блокируя осевое перемещение обода 8 относительно ступицы 9 колеса.

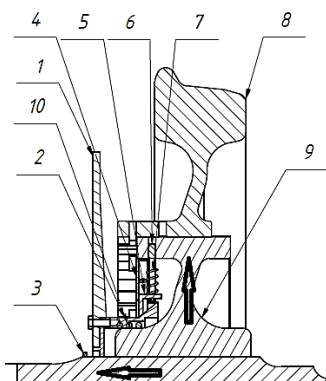


Рис. 9. РКП в процессе разблокировки:

1 – нажимное кольцо; 2 – нажимная втулка; 3 – упор привода фиксаторов; 4 – упор фиксаторов; 5 – толкатель направляющий; 6 – стопорная пластина; 7 – пружина фиксаторов; 8 – обод; 9 – ступица; 10 – пружина привода

Выводы

Предложена новая компактная конструкция РКП. Прочность и работоспособность такого технического решения подтверждена расчетами в соответствии с общепринятыми методиками и компьютерной симуляцией рабочих процессов. Преимущество данной конструкции перед другими известными РКП состоит не только в компактности: пружины в механизме не несут значительных нагрузок, что повышает их надежность и долговечность; также все усилия по фиксации колес в выбранном положении воспринимают стальные фиксаторы (стопорные пластины), которые работают исключительно на срез без сдвигающих усилий и дополнительно прижимаются к пазам за счет центробежной силы инерции при вращении колеса, что обеспечит фиксацию колес при движении в случае поломки механизма.

Список литературы

- 1 Актуальность реализации сквозной технологии доставки крупнотоннажных рефрижераторных контейнеров в международных перевозках / О. Л. Игнатъев, О. А. Ворон, Я. К. Склифус, В. В. Широбок // Материалы первой Международной научно-технической конференции «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы» (Ташкент, 20–23 апреля 2022 г.). – Ташкент: ТГТУ, 2022. – С. 53–59.
- 2 Graff, M. System SUW2000 w komunikacji przestawczej 1435/1520 mm / M. Graff // TTS Szynowego. – 2016. – Z. 1–2. – P. 34–53.
- 3 Takao, K. Development of the gauge change EMU train system in Japan / K. Takao, K. Uruga // Urban Transport X. – 2004. – P. 521–530.
- 4 Садчиков, П. И. Технология перехода железнодорожного подвижного состава с одной колеи на другую (международный опыт) / П. И. Садчиков, О. Л. Целищева // Техника железных дорог. – 2014. – № 12. – С. 27–28. – ISSN 1998-9318.

References

- 1 Relevance of the implementation of end-to-end delivery technology of large-tonnage refrigerated containers in international transportation / O. L. Ignatiev, O. A. Voron, J. K. Sklifus, V. V. Shirobokov // Proceedings of the First International Scientific and Technical Conference «Railway rolling stock: problems, solutions, prospects» (Tashkent, April 20–23, 2022). – Tashkent: TSTrU, 2022. – P. 53–59.
- 2 Graff, M. System SUW2000 w komunikacji przestawczej 1435/1520 mm / M. Graff // TTS Szynowego. – 2016. – Z. 1–2. – P. 34–53.
- 3 Takao, K. Development of the gauge change EMU train system in Japan / K. Takao, K. Uruga // Urban Transport X. – 2004. – P. 521–530.
- 4 Sadchikov, P. I. Technology of transition of the railway rolling stock from one gauge to another (international experience) / P. I. Sadchikov, O. L. Tselischeva // Railroad Engineering. – 2014. – No. 12. – P. 27–28. – ISSN 1998-9318.

5 Глазунов, Д. В. Способы снижения износа колесных пар подвижного состава / Д. В. Глазунов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 2(54). – С. 107–114. – ISSN 2307-2091.

6 ГОСТ 10791-2011. Колёса цельнокатаные. Технические условия : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии 23 июня 2011 г. № 142 : дата введения 2011–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 27 с.

7 ISO 4156-2:2005. Шлицы прямые с боковыми эвольвентными поверхностями для цилиндрических валов. Метрический модуль. Посадка по боковой поверхности. Часть 2 : Размеры : дата введения 01.10.2005. – Международная организация по стандартизации, 2005. – 196 с.

8 ГОСТ 5932–73. Гайки шестигранные прорезные и корончатые класса точности А. Конструкция и размеры : межгосударственный стандарт : дата введения 01.01.74. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 6 с.

9 ГОСТ 4543–71. Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат, калиброванная сталь. Часть 1 : межгосударственный стандарт : дата введения 01.01.73. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 63 с.

10 ГОСТ Р ИСО 4017–2013. Винты с шестигранной головкой. Классы точности А и В (с поправками) : национальный стандарт : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии 28 августа 2013 г. № 573-ст : дата введения 2014–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 22 с.

5 Glazunov, D. V. Ways to reduce the wear of rolling stock wheelsets / D. V. Glazunov // Izvestia of the Ural State Mining University. – 2019. – No. 2(54). – P. 107–114. – ISSN 2307-2091.

6 GOST 10791–2011. The wheels are solid rolled. Technical conditions: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology on June 23, 2011 No. 142: implementation date 2011–07–01. – Moscow: Standartinform, 2011. – 27 p.

7 ISO 4156-2:2005. Straight splines with involute lateral surfaces for cylindrical shafts. Metric module. Side landing. Part 2 : Dimensions: date of introduction 01.10.2005. – International Organization for Standardization, 2005. – 196 p.

8 GOST 5932–73. Hexagon slotted and castle nuts, accuracy class A. Design and dimensions : interstate standard : date of introduction 01.01.74. – Moscow : Standartinform, 2008. – 6 p.

9 GOST 4543–71. The steel is high quality and high quality. Long and shaped rolled steel, calibrated steel. Part 1 : interstate standard: introduction date 01.01.73. – Moscow : IPK Publishing House of Standards, 2004. – 63 p.

10 GOST R ISO 4017–2013. Hexhead screws. Accuracy classes A and B (as amended) : national standard: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology on August 28, 2013 No. 573-st : implementation date 2014–07–01. – Moscow : Standartinform, 2014. – 22 p.

O. L. Ignatiev, Y. K. Sklifus, V. V. Shirobokov, S. Shevchenko

SLIDING WHEELSET FOR RAILCARS IN INTERSTATE TRAFFIC

Abstract. The paper presents the design of sliding wheelset for wagons operating in interstate traffic with different track gauge. It is presented the main elements of the developed sliding wheelset and their interaction for changing the track gauge. A distinctive feature of the proposed design is the use of locking plates as retainers, which work exclusively on shear without shear forces and are additionally pressed to the grooves due to the centrifugal force of inertia during wheel rotation, which provides fixation of wheels during movement even in case of mechanism breakdown This design is characterized by compact design, increased reliability and durability. The infrastructure of the railroad station to provide gauge change is also proposed.

Keywords: wheelset, hub, rim, retainer, retainer drive, floor equipment.

For citation: Sliding wheel set for railcars in interstate traffic / O. L. Ignatiev, Y. K. Sklifus, V. V. Shirobokov, S. Shevchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 152–158. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_152.

Сведения об авторах**Игнатъев Олег Леонидович**

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

Склифус Ярослав Константинович

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

Широбок Владимир Вячеславович

эксплуатационное вагонное депо Батайск, пункт технического обслуживания вагонов станции Батайск (ПТО Север),
мастер участка производства,
e-mail: shirobokovrgups@yandex.ru

Шевченко Сергей

филиал Самарского государственного технического университета в г. Сызрани,
кафедра «Технология машиностроения»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: sfsamgtu@sfsamgtu.ru

Information about the authors**Ignatiev Oleg Leonidovich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Car and Car Facilities»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: ips@rgups.ru

Sklifus Yaroslav Konstantinovich

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

Shirobokov Vladimir Vyacheslavovich

Operational Car Depot Bataysk,
Maintenance Point for Carriages in Bataysk Station (PTO Sever),
Production Supervisor,
e-mail: shirobokovrgups@yandex.ru

Shevchenko Sergey

Samara State Technical University Branch in Syzran»,
Chair «Mechanical Engineering Technology»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: sfsamgtu@sfsamgtu.ru

С. П. Круглов, П. Ю. Иванов, А. А. Корсун

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЖЕНИЯ С ПОСТОЯННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА ПО НАЖАТИЮ *

Аннотация. Методами математического описания и расчета обосновано преимущество реализации тормозной кривой пассажирского поезда с обеспечением постоянного коэффициента запаса по нажатию, определенного ранее для обеспечения одинаковых условий по свойству заклинивания колесных пар (юза) на всем периоде торможения. Выведена зависимость ускорения торможения от данного коэффициента. Решением интегральных уравнений для типовых параметров поезда построены зависимости пройденного пути от скорости (тормозная кривая), ускорения торможения от скорости и времени торможения при постоянстве указанного коэффициента. Названные характеристики были сравнены с аналогичными параметрами при реализации других способов управления торможением на одном и том же тормозном пути: при постоянном ускорении и постоянном тормозном нажатии (постоянном давлении в тормозной магистрали). Показана эффективность предлагаемого метода торможения в сравнении с вышеописанными.

Ключевые слова: тормозной путь, электропневматические тормоза, пассажирский подвижной состав, эффективность торможения, безюзное торможение, коэффициент запаса по нажатию.

Для цитирования: Круглов, С. П. Математическое обоснование эффективности торможения с постоянным значением коэффициента запаса по нажатию / С. П. Круглов, П. Ю. Иванов, А. А. Корсун // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 159–168. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_159.

Введение

На сегодняшний день повышение скорости движения поездов приобретает особенное значение. Из основных факторов, влияющих на скорость движения поезда, можно выделить состояние инфраструктуры, профиль пути, массу поезда, условия сцепления колес с рельсами и многие другие факторы. Как известно, при оценке эффективности поездной работы скорость движения поезда терминологически разделяют на участковую, техническую, ходовую и маршрутную, определяя таким образом некоторое среднее значение скорости поезда, вычисляемое с учетом, либо без учета различных факторов, таких как интенсивность разгона и торможения, продолжительность простоя и т. п. В нормативной документации, регламентирующей обеспечение безопасности движения [1, 2] встречается понятие «допустимая скорость движения». В поездной работе машинисты стремятся максимально приблизить фактическую скорость поезда к значению допустимой скорости. При работе с клиентами компания ОАО «РЖД» использует термин «коммерческая скорость», подразумевающий скорость доставки грузов, которая в конечном счете влияет на прибыль компании и ее привлекательность для клиентов.

Допустимая скорость движения поезда определяется длиной его тормозного пути до внезапно возникающих препятствий, т. е. длиной блок-участка и эффективностью тормозов. Таким образом, сокращение длины тормозного пути приводит к увеличению допустимой скорости движения, как следствие, ходовой скорости, участковой и, главное, коммерческой скорости.

Характер торможения поезда также оказывает влияние на техническую скорость, учитывающую время или интенсивность торможения. Чем интенсивней замедление, тем выше техническая скорость с учетом остановок. В настоящее время наблюдается развитие автоматических систем управления, работа которых направлена на увеличение технической скорости движения.

Современные системы управления поездами позволяют достаточно точно обеспечивать режим ведения и удерживать фактическое значение скорости на уровне программной скорости, заданной в качестве некоторого эталона для системы автоведения. Также для пассажирских поездов с электропневматическими тормозами ведутся разработки систем адаптивного управления тормозным

* Работа выполнена в рамках государственного задания по государственной работе «Адаптивная система автоматического управления с повышенной эффективностью тормозами пассажирских и высокоскоростных поездов» № 121050600026-9 от 06.05.2021.

нажатием в зависимости от коэффициента трения и коэффициента запаса по нажатию, влияющим на кривую торможения и значение технической скорости.

Поскольку управляемость тормозами поезда растет, становится актуальным вопрос исследования критериев или условий управления процессом торможения. Стандартное торможение поезда по [2, 3] чаще всего осуществляется при условно-постоянном значении тормозного нажатия (постоянстве давления в тормозной магистрали). Можно осуществлять торможение с регулируемым нажатием, установив в качестве критерия соблюдение постоянного ускорения торможения (замедления). Такой метод применяется рядом разработчиков [4, 5], а также часто используется машинистами электропоездов и пассажирских поездов при ручном торможении.

В ряде научных трудов [6–9] описывается управление тормозами в процессе торможения по критерию постоянства коэффициента запаса по нажатию, обеспечивающего более эффективное использование тормозной силы на высоких скоростях и более надежное сцепление колеса с рельсом на малых скоростях.

Данная работа посвящена сравнительному анализу перечисленных выше способов торможения с построением кривых торможения для определения более эффективного из них. Будем рассматривать условия торможения пассажирских поездов в предположении, что во всех случаях торможение идет без юза, уклона пути нет.

Тормозная кривая при постоянном ускорении торможения

В соответствии с основами механики тормозная кривая определяется из энергетического баланса по уменьшению кинетической энергии поезда во время торможения к работе силы торможения, потраченной на это при постоянном ускорении торможения:

$$(V^2 - V_k^2)m/2 = amS, \quad (1)$$

где V, V_k – текущая и конечная скорость; m – масса поезда; a – ускорение торможения; S – тормозной путь. Отсюда находится достаточно хорошо известное уравнение тормозной кривой:

$$V(S) = \sqrt{2aS + V_k^2}.$$

Пройденный тормозной путь с начальной скорости (V_0) и время торможения (t_a) определяются зависимостями:

$$S(V) = S_a(V) = (V_0^2 - V^2)/(2a); \quad (2)$$

$$t_a = V_0/a. \quad (3)$$

Тормозная кривая при постоянном коэффициенте запаса по нажатию

Коэффициент запаса по нажатию (K), отнесенный ко всему поезду, определяется как [3, 6–9]:

$$K = F_{\text{сц}}/F_T, \quad (4)$$

где $F_{\text{сц}} = mg\psi(V, q_0)$ – общая располагаемая сила сцепления поезда при текущей скорости; g – ускорение свободного падения; $\psi(V, q_0)$ – коэффициент максимального сцепления; q_0 – средняя нагрузка на колесо поезда; F_T – текущая сила торможения.

Последнюю рассмотрим подробнее. Пусть безразмерный тормозной коэффициент поезда определяется как

$$\vartheta = \frac{\Sigma T_{\text{max}}}{mg}, \quad (5)$$

где ΣT_{max} – максимальная суммарная сила давления всех тормозных колодок на колеса поезда.

При отсутствии юза колес тормозная сила поезда определяется исключительно силой, развиваемой между колодками и колесами. На основании этого, а также (5) и известных соотношений по тормозной силе колодок [3, 10, 11] общая максимальная тормозная сила поезда определится:

$$F_{T \max} = \varphi(\Sigma T_{\max}, V) \Sigma T_{\max} = \varphi(\Sigma T_{\max}, V) \vartheta mg .$$

Отсюда текущую тормозную силу поезда, с учетом второго закона Ньютона, можно записать:

$$F_T = \varphi(\Sigma T, V) \Sigma T = \alpha F_{T \max} = \alpha \varphi(\Sigma T_{\max}, V) \vartheta mg = a_T m , \quad (6)$$

где ΣT – текущая суммарная сила всех тормозных колодок поезда; $\alpha = F_T / F_{T \max} \in \{0, 1\}$ – степень торможения; $a_T = \alpha \varphi(\Sigma T_{\max}, V) \vartheta g$ – ускорение торможения.

Подставляя (6) в (4), получим: $K = g \psi(V, q_0) / a_T$, или

$$a_T = \frac{g}{K} \psi(V, q_0) . \quad (7)$$

Из последнего следует, что для обеспечения заданного постоянного значения коэффициента запаса по нажатию требуется, чтобы ускорение торможения было пропорционально функции $\psi(V, q_0)$, т. е. не было постоянным.

Типовой зависимостью коэффициента сцепления $\psi(V, q_0)$ для одной колесной оси железнодорожного экипажа является [11]:

$$\psi(V, q_0) = \psi_1(V) \psi_2(q_0) , \quad (8)$$

где $\psi_1(V) = 0,2(V + 200) / (3V + 200)$; $\psi_2(q_0) = (q_0 + 100) / (4q_0 + 100)$; V – скорость, км/ч; q_0 – осевая нагрузка, тс; второй сомножитель коэффициента сцепления всего поезда также будем обозначать как ψ_2 .

На рис. 1 представлена зависимость первого сомножителя коэффициента сцепления т. е. $\psi_1(V)$.

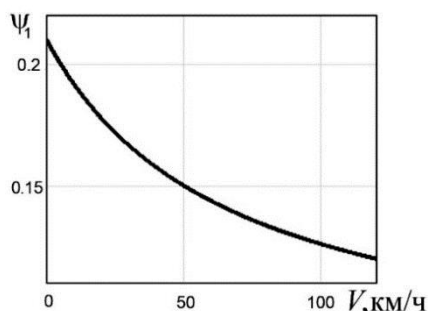


Рис. 1. Первый сомножитель коэффициента сцепления

Разумеется, соотношение (7) не дает простых алгебраических равенств, подобных (1)–(3), поэтому предлагается следующая методика формирования тормозной кривой по заданному коэффициенту запаса по нажатию.

Аналитически решается дифференциальное уравнение (7) для заданного значения K и известной функции $\psi(V, q_0)$, соответствующей параметрам поезда, с получением аналитического описания тормозной кривой. Его можно записать в виде:

$$\dot{V} = -\frac{g}{K} \psi(V, q_0) . \quad (9)$$

Перепишем (9) в виде (переменные S , V и g указаны в измерительной системе СИ):

$$\frac{K}{g\psi_1(V)\psi_2} dV = -dt = -\frac{dS}{V}.$$

Отсюда получим зависимости торможения на рассматриваемом режиме, описываемые в общем виде как

$$\int \frac{VdV}{\psi_1(V)} = -\frac{\psi_2 g}{K} S. \quad (10)$$

Для демонстрации возможности решения этого уравнения рассмотрим пример. Возьмем типовой пассажирский поезд, составленный из локомотива типа ЭП1 (массой 132 т, имеет 6 колесных пар) и 15 однотипных вагонов (массой 60 т каждый, по 4 колесные пары) [3, 13].

1 По этим параметрам можно найти второй множитель коэффициента сцепления, общий для всего поезда (ψ_2). Действительно, сила сцепления для всего поезда определяется по (4) и (8) как

$$F_{\text{сц}} = g\psi_1(V)[m_{\text{л}}\psi_2(q_{0\text{л}}) + m_{\text{в}}\psi_2(q_{0\text{в}})] = g\psi_1(V)\psi_2(m_{\text{л}} + m_{\text{в}}),$$

где нижними индексами «л» и «в» обозначены ранее введенные параметры, отнесенные соответственно к локомотиву и вагонам; по принятым данным: $m_{\text{л}} = 132$ т, $m_{\text{в}} = 900$ т, $q_{0\text{л}} \approx 22$ тс, $q_{0\text{в}} \approx 15$ тс. Отсюда, используя (8), несложно определить искомую величину: $\psi_2 = 0,71$.

2 Далее перепишем первый множитель коэффициента сцепления с измерением скорости в м/с в виде:

$$\psi_1(V) = 0,2 \frac{3,6V + 200}{10,8V + 200} \approx 0,067 \frac{V + 55,56}{V + 18,52}. \quad (11)$$

Подставляя это в (10), найдем (заменяем приближенное на точное равенство):

$$\int \frac{(V + 18,52)V}{V + 55,56} dV = -0,048 \frac{g}{K} S. \quad (12)'$$

3 Используя таблицы неопределенных интегралов (например, [12]), с учетом положительного значения скорости найдем решение этого равенства:

$$\frac{V^2}{2} - (55,56 - 18,52)[V - 55,56 \ln(V + 55,56)] + C_1 = -0,048 \frac{g}{K} S,$$

или
$$V^2 - 74,08[V - 55,56 \ln(V + 55,56)] + C = -0,096 \frac{g}{K} S,$$

где C_1, C – произвольные постоянные. Если считать, что вначале торможения $S = 0$, то

$$C = -V_0^2 + 74,08[V_0 - 55,56 \ln(V_0 + 55,56)].$$

Объединяя последние два равенства, найдем зависимость пути торможения от скорости на рассматриваемом режиме:

$$S(V) = S_K(V) = \frac{K}{0,096g} \left[V_0^2 - V^2 - 74,08 \left(V_0 - V + 55,56 \ln \frac{V + 55,56}{V_0 + 55,56} \right) \right]. \quad (13)$$

4 Определим ускорение торможения (a_K). В соответствии с (8), (9), (11)

$$a_K(V) = -\dot{V} = 0,048 \frac{g}{K} \frac{V + 55,56}{V + 18,52}. \quad (14)$$

5 Также важным параметром является время торможения (t_K). Для его поиска перепишем уравнение (14) в виде:

$$t_K(V) = -\frac{K}{0,048g} \int \frac{V+18,52}{V+55,56} dV.$$

Его решением, проводимым аналогично представленному выше, будет зависимость прошедшего времени (t_K) от текущей скорости поезда:

$$t_K(V) = \frac{K}{0,048g} \left(V_0 - V + 37,04 \ln \frac{V+55,56}{V_0+55,56} \right). \quad (15)$$

Тормозная кривая при постоянном усилии нажатия на тормозные колодки

Сила торможения поезда (F_T) при таком торможении без юза определяется как:

$$F_T = \varphi_k(T, V) T n, \quad (16)$$

где $\varphi_k(T, V)$ – коэффициент трения тормозной колодки; T – сила нажатия на колодку; n – количество тормозных колодок на поезде.

Примем, что тормозная система поезда содержит только чугунные тормозные колодки. Для них, в соответствии с [11], имеем

$$\varphi_k(T, V) = \varphi_{k1}(V) \varphi_{k2}(T), \quad (17)$$

где $\varphi_{k1}(V) = 0,6(V+100)/(5V+100)$, $\varphi_{k2}(T) = (1,6T+100)/(8T+100)$, сила нажатия измеряется в кН, скорость – км/ч.

Зависимость (17) для скорости, измеряемой в м/с, можно переписать:

$$\varphi_{k1}(V) = 0,12 \frac{V+27,78}{V+5,56}. \quad (18)$$

Очевидно, торможение поезда описывается вторым законом Ньютона с учетом (16)–(18):

$$\dot{V} = -F_T/m = -0,12 \frac{V+27,78}{V+5,56} \varphi_{k2}(T) T n / m = -\chi \frac{V+27,78}{V+5,56}, \quad (19)$$

где $\chi = \chi(T) = 0,12 \varphi_{k2}(T) T n / m$.

Преобразовав (19) и интегрируя результат, найдем по аналогии вывода (12):

$$\int \frac{(V+5,56)V}{V+27,78} dV = -\chi(T) S. \quad (20)$$

Решение этого интегрального уравнения подобно получению (13), что дает

$$S(V) = S_T(V) = \frac{1}{2\chi} \left[V_0^2 - V^2 - 44,44 \left(V_0 - V + 27,78 \ln \frac{V+27,78}{V_0+27,78} \right) \right]. \quad (21)$$

Аналогичными уравнениям (14), (15) здесь будут зависимости ускорения торможения (a_T), полученного на основании (19)

$$a_T(V) = -\dot{V} = \chi \frac{V + 27,78}{V + 5,56}, \quad (22)$$

а также времени торможения (t_T), выведенного аналогично (15) из (22):

$$t_T(V) = \frac{1}{\chi} \left(V_0 - V + 22,22 \ln \frac{V + 27,78}{V_0 + 27,78} \right). \quad (23)$$

Сравнение тормозных кривых

Сравним тормозные кривые по зависимостям (2), (13) и (21) – $S_a(V)$, $S_K(V)$, $S_T(V)$, соответствующим торможению с постоянным ускорением, постоянным коэффициентом запаса по нажатию и постоянной силой нажатия на тормозные колодки.

Примем начальную скорость движения поезда 108 км/ч, или 30 м/с, заданным значением коэффициента запаса по нажатию – величину $K \equiv 1,5$. Для удобства сравнения тормозных кривых параметры a , $\chi(T)$ в (2) и (21) выберем такими, чтобы во всех трех случаях тормозной путь был одинаковым (он составил 724 м): $a = 0,623 \text{ м/с}^2$, $\chi = 0,325 \text{ м/с}^2$. Такой подход позволит проанализировать формы кривых относительно друг друга, сопоставив ускорения в разные моменты времени, а также сравнить другие параметры.

На рис. 2 приведены графики рассматриваемых тормозных кривых, представленных на графиках в виде обратных зависимостей $V(S)$, что более привычно для анализа таких кривых.

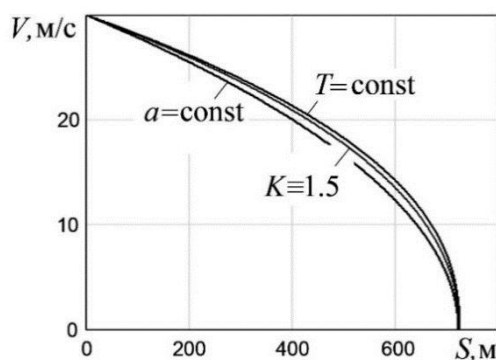


Рис. 2. Сравнение тормозных кривых

Сравним также значения коэффициента запаса по нажатию приведенных ранее тормозных кривых. Для этого аналитические зависимости этого параметра будут:

– для случая $a = \text{const}$ на основании (7) и (11):

$$K_a(V) = 0,067 \frac{g}{a} \frac{V + 55,56}{V + 18,52};$$

– для случая $T = \text{const}$ (7), (11), (17):

$$K_T(V) = 0,067 \frac{g}{\chi} \frac{V + 55,56}{V + 18,52} \frac{V + 5,56}{V + 27,78}.$$

На рис. 3 представлены графики изменения коэффициента запаса по нажатию для всех трех режимов торможения.

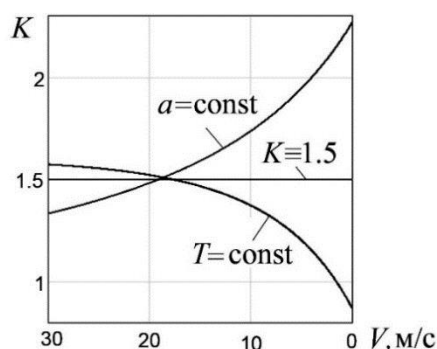


Рис. 3. Сравнение значений коэффициента запаса по нажатию при реализации одного и того же тормозного пути

На рис. 4 представлены зависимости ускорений торможения: a , $a_K(V)$, $a_T(V)$ – по (2), (14) и (22).

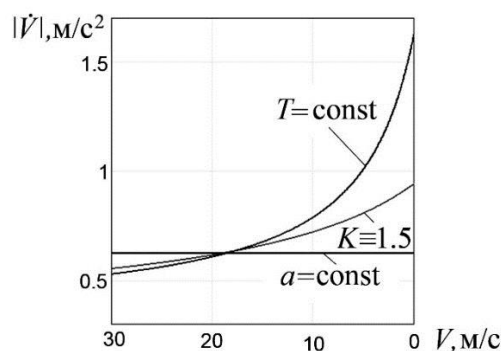


Рис. 4. Сравнение ускорений торможения при реализации одного и того же тормозного пути

На основании (3), (15), (23) было определено время торможения:

$$t_a = 48,1 \text{ с}, \quad t_K = t_K(0) = 44,6 \text{ с}, \quad t_T = t_T(0) = 42,2 \text{ с}.$$

Как можно видеть, метод торможения при постоянстве нажатия на тормозные колодки ($T = \text{const}$) отличается низким значением коэффициента запаса по нажатию на малых скоростях, со значениями даже меньше единицы, чем вызывает высокий риск появления юза.

Торможение в режиме постоянства ускорения торможения обеспечивает большие значения K , однако этот метод по сравнению с торможением при $K \equiv 1,5$ менее эффективен:

- время торможения на указанном тормозном пути при торможении при $K \equiv 1,5$ ниже, чем при $a = \text{const}$, что уменьшает время торможения (время прохождения участка) на величину около 8 %; это также следует из графиков рис. 2;
- торможение с $K \equiv 1,5$ имеет большую среднюю скорость, чем $a = \text{const}$;
- начальное значение ускорения торможения для второго случая ниже, чем при $a = \text{const}$ (соответственно 0,554 и 0,623 м/с²) примерно на 13 %; это значит, что начальное значение силы нажатия на тормозные колодки на 13 % ниже подхода с постоянным ускорением, что дает запас по интенсивности торможения;
- возможность дополнительного снижения тормозного пути и времени.

Приблизительно такие же процентные оценки были получены и при других заданных значениях K (проверен диапазон его значений 1,1–4).

Недостатком предлагаемого подхода является большая алгоритмическая сложность получения тормозной кривой. Однако для современных бортовых вычислительных машин это препятствие не является критическим.

Заключение

Таким образом, из проведенного математического моделирования можно сделать вывод о подтверждении наибольшей эффективности торможения с постоянным коэффициентом по нажатию, при котором наблюдается максимальная техническая скорость на участке торможения с соблюдением ста-

бильно низкого уровня вероятности юза на протяжении всего торможения. Способ торможения с постоянным ускорением имеет самую низкую техническую скорость и обеспечивает избыточный коэффициент запаса по нажатию. Стандартный способ торможения с постоянным нажатием имеет меньшее значение технической скорости среди трех проанализированных способов, однако создает существенно более высокие риски образования ползунов на низких скоростях.

В сравнении с торможением с постоянным ускорением предлагаемый способ дает сокращение времени торможения приблизительно на 8 %, а начальное ускорение (начальную силу нажатия на тормозные колодки) – меньше на 13 %.

Полученные результаты и предложенную методику моделирования можно использовать для оценки и изучения алгоритмов управления тормозами как машинистам, так и разработчикам систем автоматического управления тормозами в пригородном движении, в поездах дальнего следования и в том числе для высокоскоростных поездов. При помощи данной методики возможно построение управления реостатным и рекуперативным торможением в безопасном режиме в части избегания юза и выдерживания при этом максимальной технической скорости.

Список литературы

- 1 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены приказом Минтранса РФ от 21 декабря 2010 г. № 286. – URL: sudact.ru/law/prikaz-mintransa-rf-ot-21122010-n-286/pravila-tekhnicheskoi-ekspluatatsii-zheleznykh-dorog (дата обращения: 18.09.2023).
- 2 Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава. Утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (протокол № 60 от 6–7 мая 2014 г.), приказом Минтранса России № 151 от 03.06.2014, 2019. – URL: files.stroyinf.ru/Data2/1/4293727/4293727582.pdf (дата обращения: 19.09.2023).
- 3 Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 09.02.2018 № 182/р. – Москва, 2015. – 516 с.
- 4 Аппаратура локомотивная системы автоматического управления торможением поездов САУТ-ЦМ/485. Руководство по эксплуатации. Москва : ООО «НПО САУТ», 2004. – URL: www.saut.ru/documents (дата обращения: 20.09.2023).
- 5 Универсальная система автоведения электропоездов пассажирского движения (УСАВПП). Руководство по эксплуатации / ООО «АВП Технология». – URL: www.avpt.ru/soprovozhdenie/dokumentatsiya/rukovodstva (дата обращения: 22.09.2023).
- 6 Повышение эффективности работы тормозной системы пассажирских поездов / П. Ю. Иванов, А. И. Романовский, А. А. Хамнаева [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 3. – С. 39–43. – DOI 10.36535/0236-1914-2020-03-6. – EDN DUWTCJ.

References

- 1 Rules of technical operation of railways of the Russian Federation. Approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated December 21, 2010 No. 286. – URL: sudact.ru/law/prikaz-mintransa-rf-ot-21122010-n-286/pravila-tekhnicheskoi-ekspluatatsii-zheleznykh-dorog (date of access: 09/18/2023).
- 2 Rules for maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock. Approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States (Protocol No. 60 dated May 6-7, 2014), by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 151 dated 06.03.2014, 2019. – URL: files.stroyinf.ru/Data2/1/4293727/4293727582.pdf (date of access: 09/19/2023).
- 3 Rules of traction calculations for train work. Approved by the Order of JSC “Russian Railways” dated 12.05.2016 No. 867r as amended by the Order of JSC “Russian Railways” dated 09.02.2018 No. 182/p. – Moscow, 2016. – 516 p.
- 4 Locomotive equipment of the automatic braking control system of SOUTH-CM/485 trains. Operation manual. – Moscow: NPO SOUTH LLC, 2004. – URL: www.saut.ru/documents (date of access: 09/20/2023).
- 5 Universal system of driving electric locomotives of passenger traffic (USAVPP). Operation manual / AVP Technology LLC. – URL: www.avpt.ru/soprovozhdenie/dokumentatsiya/rukovodstva (date of access: 09/22/2023).
- 6 Improving the efficiency of the braking system of passenger trains / P. Yu. Ivanov, A. I. Romanovsky, A. A. Khamnaeva [et al.] // Transport: science, technology, management. Scientific Information Collection. – 2020. – No. 3. – P. 39–43. – DOI 10.36535/0236-1914-2020-03-6. – EDN DUWTCJ.

7 **Иванов, П. Ю.** Существующие способы управления тормозным нажатием с повышенной эффективностью / П. Ю. Иванов, А. А. Корсун, Д. О. Емельянов // Научные междисциплинарные исследования : сборник статей XV Международной научно-практической конференции, Саратов, 10 июня 2021 года. – Москва : КДУ, Добросвет, 2021. – С. 28–36. – EDN JUYBDQ.

8 Математическая модель работы тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления с рельсом в компьютерной среде / А. А. Корсун, П. Ю. Иванов, С. П. Круглов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2(86). – С. 104–113. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_104. – EDN LNUDHW.

9 Алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием пассажирского подвижного состава / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. А. Корсун, Д. В. Осипов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2022. – № 5. – С. 60–64. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-05-11. – EDN LTBUFW.

10 **Крылов, В. И.** Автоматические тормоза подвижного состава : учебник для техникумов железнодорожного транспорта / В. И. Крылов, В. В. Крылов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1977. – 320 с.

11 **Асадченко, В. Р.** Автоматические тормоза подвижного состава : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта. – Москва : Маршрут, 2006. – 392 с.

12 **Брычков, Ю. А.** Таблицы неопределенных интегралов : справочник / Ю. А. Брычков, О. И. Маричев, А. П. Прудников. – Москва : Наука, 1986. – 192 с.

13 Электровоз ЭП1. Руководство по эксплуатации. Т. 2. – Новочеркасск : ООО «ПК «НЭВЗ», 2007. – 580 с.

7 **Ivanov, P. Yu.** Existing methods of brake pressure control with increased efficiency / P. Yu. Ivanov, A. A. Korsun, D. O. Yemelyanov // Scientific interdisciplinary research: collection of articles of the XV International Scientific and Practical Conference, Saratov, June 10, 2021. – Moscow: KDU, Dobrosvet, 2021. – P. 28–36. – EDN JUYBDQ.

8 A mathematical model of the operation of the train braking system during braking, taking into account the dynamics of the friction coefficient of the pad on the wheel and the coupling with the rail in a computer environment / A. A. Korsun, P. Yu. Ivanov, S. P. Kruglov [et al.] // Bulletin of the Rostov State University of Railways. – 2022. – No. 2(86). – P. 104–113. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_104. – EDN LNUDHW.

9 Algorithm of adaptive control by braking of passenger rolling stock / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dul'sky, A. A. Korsun, D. V. Osipov // Transport: science, technology, management. Scientific Information Collection. – 2022. – No. 5. – P. 60–64. – DOI 10.36535/0236-1914-2022-05-11. – EDN LTBUFW.

10 **Krylov, V. I.** Automatic brakes of rolling stock : a textbook for technical schools of railway transport / V. I. Krylov, V. V. Krylov. – 3rd edition, reprint. and add. – Moscow : Transport, 1977. – 320 p.

11 **Asadchenko, V. R.** Automatic brakes of rolling stock : a textbook for universities of railway transport. – Moscow : Route, 2006. – 392 p.

12 **Brychkov, Yu. A.** Tables of indefinite integrals : a handbook / Yu. A. Brychkov, O. I. Marichev, A. P. Prudnikov. – Moscow : Nauka, 1986. – 192 p.

13 Electric locomotive EP1. Operating manual. Vol. 2. – NovoCherkassk : PC NEVZ LLC, 2007. – 580 p.

S. P. Kruglov, P. Yu. Ivanov, A. A. Korsun

MATHEMATICAL RATIONALE OF BRAKING EFFECTIVENESS WITH A CONSTANT PRESSURE SAFETY FACTOR

Abstract. Using methods of mathematical description and calculation, the advantage of implementing the braking curve of a passenger train is substantiated, ensuring a constant pressure safety factor, previously determined to ensure the same conditions for the property of wheel pairs throughout the entire braking period. The dependence of braking acceleration on this coefficient is derived. By solving integral equations for typical train parameters, the dependences of the distance traveled on speed (braking curve), braking acceleration on speed and braking time were constructed at a constant specified coefficient. These characteristics were compared with similar parameters when implementing other methods of braking control

over the same braking distance: with constant acceleration and constant brake pressure (constant pressure in the brake line). It is shown the effectiveness of the proposed braking method in comparison with those described above.

Keywords: braking distance, electro-pneumatic brakes, passenger rolling stock, braking efficiency, skidless braking, pressure safety factor.

For citation: Kruglov, S. P. Mathematical rationale of braking efficiency with a constant pressure safety factor / S. P. Kruglov, P. Yu. Ivanov, A. A. Korsun // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 159–168. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_159.

Сведения об авторах

Круглов Сергей Петрович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Автоматизация производственных процессов»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроподвижной состав»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Корсун Антон Александрович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроподвижной состав»,
аспирант,
e-mail: korsunanton1998@gmail.com

Information about the authors

Kruglov Sergey Petrovich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Automation of Production Processes»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Ivanov Pavel Yurievich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electric Rolling Stock»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: savl.ivanov@mail.ru

Korsun Anton Aleksandrovich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electric Rolling Stock»,
Postgraduate Student,
e-mail: korsunanton1998@gmail.com

В. И. Моисеев, А. В. Жебанов

РАЗОГРЕВ ЗАСТЫВШИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ВЫГРУЗКЕ ИЗ ЦИСТЕРН РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Тематика статьи обусловлена необходимостью организации перевозок застывающих наливных грузов на территории Российской Федерации при отрицательных температурах. К таким грузам можно отнести котельные и флотские мазуты, крекинг-остатки, тяжелые нефтяные масла, гудроны и нефтебитумы и др. Рассматривается способ, обеспечивающий создание первичных каналов в застывшей массе нефтепродукта с возможностью использования как пароразогревающей системы, так и электро-разогревающей системы, оборудованных линейными нагревательными элементами. Устройство обеспечивает быстрый размыв затвердевшей фракции, проводимый практически одновременно с выгрузкой. Предлагаемые мероприятия, направленные на повышение устойчивости движения вагона-цистерны или автомобильной цистерны, а также снижение затрат времени и тепловой энергии при выгрузке застывающих наливных грузов, легко осуществимы.

Ключевые слова: вагон-цистерна, автомобильная цистерна, транспортировка застывающих грузов, разогрев вязких грузов, выгрузка при отрицательных температурах.

Для цитирования: Моисеев, В. И. Разогрев застывших нефтепродуктов при выгрузке из цистерн различного назначения в зимних условиях / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 169–176. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_169.

Введение

В Российской Федерации, с её холодным континентальным климатом, продолжительным осенне-зимним периодом, который в некоторых регионах страны составляет от 6 до 8 месяцев в году, большими дальностями перевозок, была и остается проблема доставки застывающих наливных грузов (ЗНГ).

К ЗНГ относятся котельные и флотские мазуты, крекинг-остатки, тяжелые нефтяные масла, гудроны и нефтебитумы и др. Продукты заливают в котел вагона-цистерны или автомобиля-цистерны при высокой температуре и низкой вязкости. За типичное для России продолжительное время транспортирования при низких температурах воздуха ЗНГ охлаждаются и переходят в высоковязкое состояние, резко затрудняющее их выгрузку, проводимую, как правило, сливом самотеком [1, 2].

Низкотемпературные свойства ЗНГ обуславливают особенности их доставки. Если мазуты перевозят на большие расстояния в вагонах-цистернах и автомобилях-цистернах, то значительную долю технических масел доставляют в таре, что существенно усложняет логистику их перевозок. Масла теряют кондиционность при обводнении, и это делает невозможным их разогрев открытым паром, проводимом при выгрузке мазутов. Затруднен и электрозаогрев застывших масел из-за возможности образования нагара на греющих элементах. При рециркуляционном способе разогрева ЗНГ часть продукта, идентичного находящемуся в котле вагона-цистерны, разогревается на наземной установке до высокой температуры и подается горячей жидкой струей в виде теплоносителя, создаваемого гидромонитором на застывшую массу ЗНГ, вызывая её размыв. Гидромонитор заводится в котел вагона-цистерны или автомобиля-цистерны через верхний наливной люк [3]. При этом технические трудности возникают при размыве фракции ЗНГ, застывшей в больших количествах на днищах котла, наиболее удаленных от наливного люка. Кинетическая энергия струи часто оказывается недостаточной для быстрого размыва слоя затвердевшей фракции [4–8].

Основная часть

На начальной стадии перевозки, когда ЗНГ ещё сохраняют высокую температуру и подвижность, тоже встречаются технические трудности.

Все жидкие нефтепродукты имеют большое тепловое расширение, возникающее с ростом температуры. Поэтому для предотвращения разрывов обечайки котла вагона-цистерны, или автомобиля-цистерны, котел в штатных условиях эксплуатации заполняется лишь частично, приблизительно на 80–96 % от своей вместимости (в зависимости от типа наливного груза). Но очень часто встречаются внештатные ситуации, когда его заполняют с большим недоливом (~50 %). Следовательно, жидкий ЗНГ внутри котла всегда имеет

свободную поверхность. Тогда при движении вагона-цистерны или автомобиля-цистерны внутри котла происходят колебания жидкости, а на её поверхности возникают волны. Эти движения крайне нежелательны при эксплуатации вагонов-цистерн и просто очень опасны при перевозках ЗНГ в автомобилях-цистернах.

Внутренние движения жидкости в котлах цистерны резко снижают устойчивость её движения. Они зачастую ведут к аварийным ситуациям, связанным с опрокидыванием транспортного средства (особенно большегрузных автомобилей-цистерн), проливам больших количеств нефтепродукта, экологическим загрязнениям окружающей среды и возникновением пожаров.

Для повышения эффективности перевозок ЗНГ в холодный осенне-зимний период в автомобилях-цистернах или железнодорожных вагонах-цистернах предлагаются два мероприятия:

- для повышения устойчивости движения провести подготовку ЗНГ к перевозке в частично заполненном вагоне-цистерне или автомобиле-цистерне;
- для снижения затрат ресурсов (прежде всего времени и тепловой энергии) при выгрузке использовать двухэтапный способ разогрева и размыва высоковязкой или даже затвердевшей фракции ЗНГ.

Первое мероприятие сводится к следующему. Все мазуты и масла имеют малые значения коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{\text{ЗНГ}} \sim 0,03 \text{ Н/м}$, при этом их вязкость $\nu_{\text{ЗНГ}}$ резко возрастает с понижением температуры.

Это идеальные условия для получения нефтепродукта в пористом, воздухом насыщенный состоянии, создаваемом барботированием холодного воздуха мелкими пузырями через массу ЗНГ в частично заполненном котле вагона-цистерны или автомобиля-цистерны.

Среда в пористом, воздухом насыщенный состоянии называется «дисперсоидом». В данном случае это будет мазутный или масляный дисперсоид (МД), твердый при сравнительно низких температурах, но очень легко плавящийся при нагревании. Примером дисперсоида является выпускаемый пищевой промышленностью пористый шоколад.

Основными параметрами МД являются его кратность и дисперсность. Поясним термины. В заданном объеме дисперсоида V_d содержится некоторый объем воздуха V_v и жидкости V_j (мазута), пошедшей на его образование. Кратность МД, как параметр, определяется отношением:

$$\gamma = \frac{V_j + V_v}{V_j}.$$

Высокократными дисперсоидами ($\gamma > 20$) являются пены, а вот предлагаемый МД должен иметь низкую кратность ($\gamma \approx 2 \dots 4$).

Даже при такой низкой кратности МД имеет существенно меньшую плотность и теплопроводность, чем жидкие мазуты и технические масла, перевозимые в цистерне. Теплопроводность МД можно оценить по формуле Манегольда:

$$\lambda_{\text{мд}} = \frac{2}{3} \frac{\lambda_j}{\gamma} + \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \lambda_v. \quad (1)$$

Мазуты и масла имеют малую теплопроводность $\lambda_j \approx 0,12 \dots 0,16 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$, воздух ещё меньшую: $\lambda_v = 0,025 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$. Оценка по формуле (1) показывает, что теплопроводность МД $\lambda_{\text{мд}} = 0,05 \dots 0,07 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$ оказывается сравнимой с теплопроводностью стекловолокна и стекловаты, которые идут на изготовление вагонов-цистерн-термосов $\lambda = 0,045 \dots 0,065 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$

Дисперсность МД определяют средним радиусом r воздушных пузырьков в этой среде. Коллективная скорость подъема пузырьков в МД зависит от вязкости $\nu_{\text{ЗНГ}}$ жидкости (мазута, масла) и кратности γ МД [9]:

$$u = \frac{2r^2 g}{9\nu_{\text{ЗНГ}}} (1 - \gamma^{-0,33}). \quad (2)$$

Здесь g – ускорение свободного падения м/с^2 . Котельные мазуты и масла имеют, при температурах $T \approx 40 \text{ °С}$, вязкость $\nu_{\text{ЗНГ}} \sim (5 \dots 6) 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Из (2) можно определить, что пузырьки воздуха диаметром $2r = 10^{-3} \text{ м}$ будут подниматься со скоростью $u \approx 1,2 \text{ мм/мин}$, а при температурах $T < 30 \text{ °С}$ скорость их подъема вообще становится пренебрежимо малой. При этом МД становится устойчивой,

псевдо пластической средой, способной держаться на свободной поверхности жидкости в котле вагона-цистерны или автомобиля-цистерны и гасить колебания и волны, понижающие устойчивость движения транспортного средства, и играть роль тепловой изоляции для перевозимого МД.

Второе мероприятие сводится к ускоренному способу размыва высоковязкой или даже затвердевшей фракции ЗНГ, проводимому в два этапа. На первом этапе в толще застывшей фракции ЗНГ с помощью линейных нагревателей, установленных вдоль стенок обечайки и днищ котла вагона-цистерны (или автомобиля-цистерны), протапливаются каналы, ведущие к нижнему сливному прибору.

Через эти каналы прокачивается горячий жидкий теплоноситель от наземной установки, обеспечивающий размыв и расширение каналов по всей их длине, вплоть до полного разжижения всей затвердевшей фракции ЗНГ.

Рассмотрим динамику тепловых процессов на примере выгрузки котельных мазутов М100, М200 и тяжелых нефтяных масел (солидолов).

Для создания первичных каналов в застывшей массе нефтепродукта возможно использование как пароразогревающей системы (ПРС), так и электроразогревающей системы (ЭРС) с линейными нагревательными элементами. Принципиальной разницы между этими системами нет, и мы ограничимся вариантом использования ПРС, показанном на рис. 1.

Подобное предложение было рассмотрено [6–8], далее рассмотрим принципиальные отличия. Предложение сводится к следующему. На внутренней поверхности стенок котла вагона-цистерны жестко крепятся тонкие трубы 1 радиусом R_t (стандартные водопроводные трубы диаметром 1 дюйм) для подачи пара и трубы 2 большего диаметра (пять дюймов) для подачи теплоносителя от системы, используемой при рециркуляционном способе выгрузки ЗНГ. В верхней части котла вагона-цистерны или автомобиля-цистерны трубы 1 и трубы 2 объединены по монтажной схеме «труба в трубе».

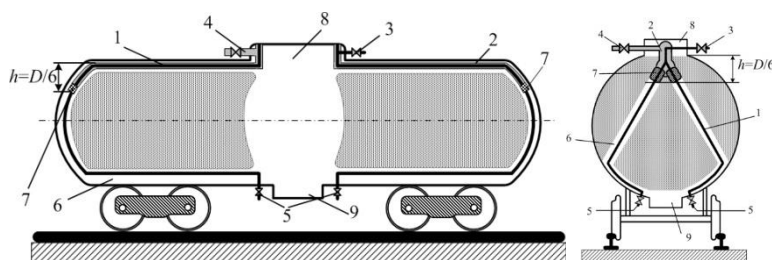


Рис. 1. Устройство двухэтапного размыва застывшей фракции ЗНГ:

- 1 – трубы для подачи пара; 2 – трубы для подачи теплоносителя;
3, 4 – входные патрубки к трубам 1 и 2; 5 – штуцера для сброса остатков пара и слива конденсата;
6 – каналы в массе застывшей фракции; 7 – рассеивающие сопла для подачи теплоносителя в протопленные каналы 6; 8 – верхний загрузочный люк; 9 – нижний сливной прибор

В массе ЗНГ трубами 1 протапливается канал с увеличивающимся по мере работы устройства радиусом $r(t) > R_t$. Греющая труба 1 остается в центре канала. Проходное сечение канала, с разогретым нефтепродуктом, с малой вязкостью, имеет толщину $\delta = r(t) - R_t$, увеличивающуюся со временем разогрева. В верхней части котла вагона-цистерны трубы 1 проходят внутри труб 2, имеющих больший диаметр. У днищ котла вагона-цистерны на расстоянии $h = 0,5 \dots 0,8$ м от верхней поверхности его обечайки каждая из труб 2 оканчивается соплом 4, обеспечивающем подачу теплоносителя струей, направленной вдоль трубы 1, т.е. в зону маловязкого продукта внутри котла. Это ведет к образованию каналов 6 в массиве затвердевшего ЗНГ и последующему размыву их стенок с увеличением проходного сечения каналов.

Расширяющиеся каналы 6 проходят рядом с днищами котла и его обечайкой прямо к нижнему сливному патрубку 9. Обе системы труб 1 и 2 имеют входные патрубки 3 и 4 на наружной поверхности котла вагона-цистерны, у верхнего наливного люка 8. Трубы 1 ПРС оканчиваются штуцерами 5 для сброса остатков пара и конденсата.

Остающийся свободным доступ к верхнему, загрузочному люку 8 и нижнему сливному патрубку 9 позволяет размывать затвердевшую массу ЗНГ и стандартными методами, применяемыми при рециркуляционном способе слива, т.е. струей гидромонитора, формируемой в центре котла.

Таким образом, размыв затвердевшего мазута или солидола можно осуществить одновременно в центре котла вагона-цистерны или автомобиля-цистерны у его днищ и в нижней части, около сливного патрубка.

По специально разработанной программе для ЭВМ было рассчитано изменение со временем диаметра δ размываемого канала 6.

На рис. 2 показаны результаты расчетов, характеризующие увеличение диаметра δ проплавляемых каналов b . Температура наружного воздуха и исходная температура ЗНГ задавались очень низкими – минус 30 °С.

Ход кривых показывает, что при пропускании пара с температурой плюс 120 °С через трубы ПРС в течение 1200 секунд разогревается, становится маловязким и сливается слой ЗНГ около трубы 1 толщиной $\delta \approx 50$ мм. Около трубы 1 образуется и канал b , а затем он размывается теплоносителем (горячим ЗНГ), подаваемым, например, установкой «Поток-175ГМ».

Скорость подачи размывающего ЗНГ \bar{w} находилась из уравнения, описывающего теплоотдачу от турбулентного потока стенкам канала [9]:

$$Nu = \frac{\zeta}{8} Re \cdot f(Re). \quad (3)$$

В формуле использованы отмеченные в табл. 1 безразмерные критерии теплового и динамического подобия и коэффициенты, а также функция Пекле $f(Re)$ – зависящая от значений критериев Прандтля и Рейнольдса. Её можно вычислить по данным, указанным в табл. 2. Указанные величины содержат физические характеристики нефтепродукта: ν – кинематическую вязкость, м²/с; a – температуропроводность, м²/с; λ – теплопроводность, Вт/м²С; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²С, \bar{w} – скорость течения нефтепродукта по каналу, м/с, и δ – диаметр канала, м [9, 10].

Таблица 1

Безразмерные критерии подобия и коэффициент Блазиуса

Рейнольдса	$Re = \frac{\bar{w}\delta}{\nu_{\text{ЗНГ}}}$	Нуссельта	$Nu = \frac{\alpha\delta}{\lambda}$
Прандтля	$Pr = \frac{\nu_{\text{ЗНГ}}}{a}$	Блазиуса	$\zeta = 0,316 Re^{-0,25}$ при $10^4 < Re < 10^5$
Пекле	$Pe = Re \cdot Pr = \frac{\bar{w}\delta}{a}$		

Таблица 2

Численные значения функции $f(Re)$

Re	Pr = 5	Pr = 10 ⁻⁴	Pr = 10	Pr = 15
1·10 ⁴	1,78	1,78	2,1	2,4
1·10 ⁶	2,30	230	310	410

Так как центральная часть канала b занята трубой ПРС, эта труба считается тонкой, то вводится допущение, что в начале размыва $r \approx \delta$. При этом:

$$Re = 2 \frac{\bar{w}\delta}{\nu_{\text{ЗНГ}}}. \quad (4)$$

Числа Прандтля $Pr = 5-15$ в табл. 2 отвечают температурам ЗНГ $T \sim 120-90$ °С.

При этих температурах кинематическая вязкость мазутов М100, М200 составляет порядка $\nu = (15..20) \cdot 10^{-6}$ м²/с, что при толщине канала $\delta = 5 \cdot 10^{-2}$ м обеспечивает значение Рейнольдса $Re \approx 6 \cdot 10^4$, попадающее в интервал, отмеченный в табл. 1. Известно [10], что движение жидкости по трубе проходит в турбулентном режиме при $Re > 2300$, в нашем случае это условие заведомо выполняется.

Расчеты по формуле (4) с учетом определения числа Рейнольдса Re , показывают, что прокачку размывающего продукта необходимо проводить со скоростью не меньшей $\bar{w} = 10$ м/с.

Формально, перенос теплоты в канале b можно описать, используя модель «эквивалентной теплопроводности», предложенную академиком М. А. Михеевым [11]. В её основе лежит уравнение Фурье для плотности теплового потока q Вт/м²:

$$q = \frac{\varepsilon_k \lambda}{\delta} \Delta T. \quad (5)$$

Здесь ΔT – разность температур между наружной стенкой нагревающей трубы l и внутренней стенкой канала b , ε_k – безразмерный «коэффициент конвекции» [11]. В рамках этой модели эта величина показывает во сколько раз эквивалентная теплопроводность движущейся жидкости $\lambda_{\text{экв}}$ больше, чем её молекулярная теплопроводность λ :

$$\varepsilon_k = \lambda_{\text{экв}} / \lambda . \quad (6)$$

Модель применялась при рассмотрении начальных стадий размыва, когда диаметр канала $\delta < 10$ см.

Нижняя кривая на рис. 2 показывает изменение со временем коэффициента конвекции ε_k . Можно ввести допущение, что $\varepsilon_k \approx 50$.

При указанных параметрах греющих и размывающих элементов увеличение массы тары вагона-цистерны не превысит 300 кг, а её полезная вместимость уменьшается всего на 0,07 м³. Суммарная масса сопел 4 (рис. 1) считалась равной 5 кг.

Из рис. 2 видно, что при числах Нуссельта $Nu = 1200$ – 2000 выгрузку ЗНГ можно завершить через 2–2,5 часа, так как диаметры каналов b достигают при этом $\delta \approx 0,5$ м. Эти значения превышают наблюдаемую в практике эксплуатации подвижного состава толщину затвердевшего слоя ЗНГ.

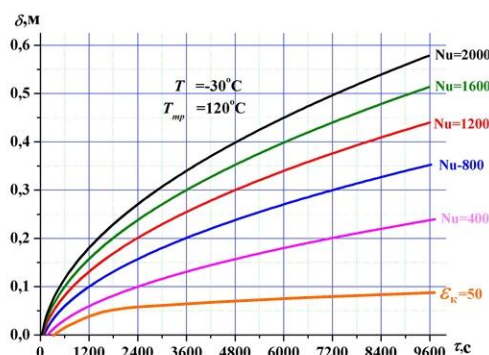


Рис. 2. Рост диаметра δ размываемого канала в затвердевшем мазуте М100 на первом ($\tau < 20$ мин) и втором ($\tau > 20$ мин) этапах работы устройства

На рис. 3 показаны результаты расчетов по росту диаметра канала b со временем размыва, осуществляемого струей теплоносителя, имеющего различное удельное теплосодержание $Q = C_{\text{ж}} \Delta T$ при различной теплопроводности λ затвердевшей фракции.

Кривая 1 отвечает условиям размыва МД, с кратностью $\gamma = 2,5$ и имеющего теплопроводность $\lambda = 0,03$ Вт/м²·°С. Кривая 2 характеризует размыв затвердевшего мазута М100, кривая 3 – размыв солидола.

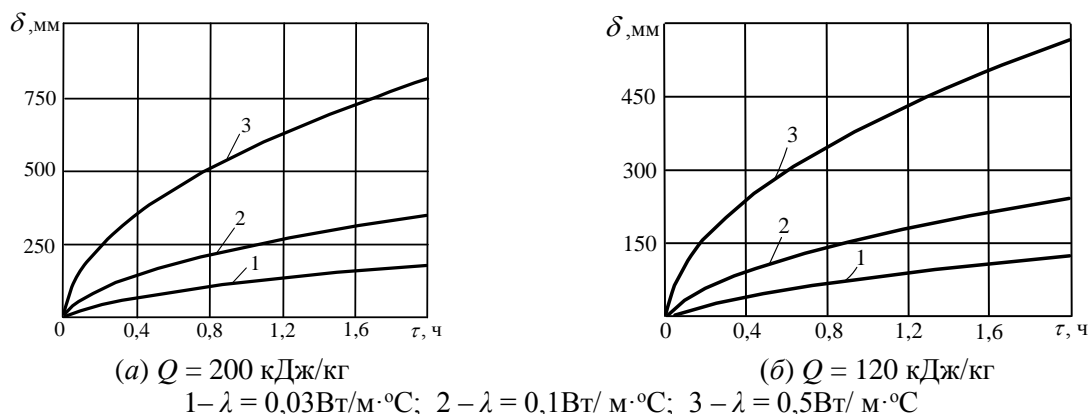
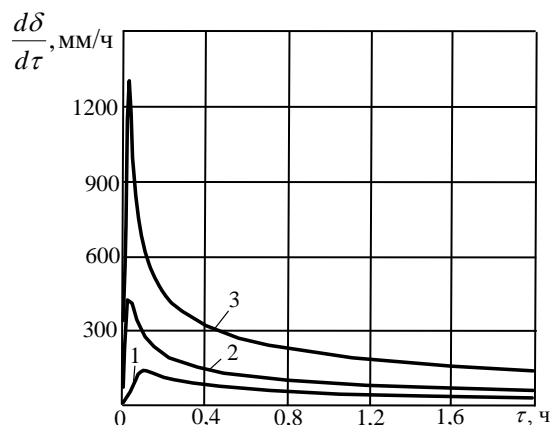


Рис. 3. Рост во времени диаметра размываемого канала δ в затвердевшей фракции ЗНГ при различных значениях теплопроводности среды λ и удельного теплосодержания теплоносителя Q

Время возрастания диаметра канала b до значений $\delta = 300$ мм даже при сравнительно небольших температурах теплоносителя ($\Delta T = 100 \dots 160$ °С) не превосходит 2-х часов.

На рис. 4 показаны результаты расчета скорости движения фронта плавления при размыве канала b в застывшем ЗНГ у продуктов с различными значениями коэффициента теплопроводности λ . Кривая 1 характеризует скорость размыва МД, кривая 2 – размыва мазутов М100, с теплопроводностью $\lambda \approx 0,12 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, а кривая 3 – скорость разжижения солидолов, с теплопроводностью $\lambda \approx 0,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$.



1 – $\lambda = 0,03 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$; 2 – $\lambda = 0,1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$; 3 – $\lambda = 0,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$

Рис. 4. Скорость движения фронта расплава ЗНГ в окрестностях горячей трубы ПРС при различных значениях теплопроводности ЗНГ

$T_{\text{нагр.}} = 90 \text{ °C}$, $Q = 120 \text{ кДж/кг}$

На начальных стадиях размыва (первые 3–5 мин), когда каналы b имеют ещё малый диаметр, скорость движения фронта плавления велика. Затем, с ростом проходного сечения канала b и снижения скорости течения жидкости в нем (расход жидкости через канал задавался постоянным) она снижается до 300–150 мм/час.

Коэффициент теплоотдачи от труб ПРС в окружающую среду определялся, исходя из критериального уравнения, применяемого в инженерных расчетах теплообменных аппаратов [12, 13]:

$$\text{Nu} = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,33}. \quad (7)$$

По этой формуле были найдены: коэффициент теплоотдачи от труб ПРС к ЗНГ на первом этапе работы устройства $\alpha = 2003 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ и коэффициент теплопередачи $k = 1400 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ от теплоносителя в размываемую среду. Теплоноситель имел избыточную (относительно температуры плавления ЗНГ) температуру $T_{\text{ж}} = 75 \text{ °C}$ и скорость течения $\bar{w} = 8 \text{ м/с}$. В этих размывах канала b скорость достигала $5 \cdot 10^2 \text{ м/с}$ (см. рис. 4).

Выводы

Устройство обеспечивает быстрый размыв затвердевшей фракции ЗНГ, проводимый практически одновременно с выгрузкой. Отличается простотой и низкими затратами на изготовление и установку, дает очень малые изменения массы тары и вместимости котла вагона-цистерны или автомобиля-цистерны. Оно позволяет быстро удалять высоковязкую фракцию ЗНГ с торцов котла вагона-цистерны или автомобиля-цистерны, что является одним из недостатков в применяемых в настоящее время системах слива вязких жидкостей. Простое по исполнению устройство размыва ЗНГ может быть изготовлено и установлено на стадии планового ремонта вагона-цистерны или автомобиля-цистерны. При железнодорожных перевозках ЗНГ оно позволит перевозить вязкие продукты в зимний период в неспециализированных цистернах общего назначения, что дает большой экономический эффект.

Предлагаемые мероприятия, направленные на повышение устойчивости движения вагона-цистерны или автомобиля-цистерны, а также направленные на снижение затрат времени и тепловой энергии при выгрузке застывающих наливных грузов, легко осуществимы. Их можно внедрить на находящихся в эксплуатации средствах их перевозки. Оба не требуют больших капиталовложений и могут быть реализованы в условиях депо или автомобильного парка.

Список литературы

1 Жебанов, А. В. Каталитический разогрев вязких нефтепродуктов в котле вагона – цистерны /

References

1 Zhebanov, A. V. Catalytic heating of viscous petroleum products in the boiler of a tank car /

А. В. Жебанов, В. И. Моисеев // Наука и образование транспорта. – 2022. – № 1. – С. 45–48. – EDN EUKVOY.

2 **Моисеев, В. И.** Организация перевозок вагонами-цистернами застывающих нефтяных топлив с передачей по полевым трубопроводам в условиях низких температур / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов, Т. А. Комарова // Транспорт Урала. – 2021. – № 2(69). – С. 40–43. – ISSN 1815-9400.

3 **Колесников, А. А.** Параметрическая оптимизация конструкции на базе генетического алгоритма эволюционных вычислений цистерны для перевозки сжатых или сжиженных газов / А. А. Колесников, М. Ю. Сербиновский, В. Е. Доценко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2(86). – С. 22–28. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_22.

4 **Моисеев, В. И.** Оптимальные варианты перевозки застывающих темных и светлых нефтепродуктов в вагонах-цистернах / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов – 2021. – № 2(86). – С. 7–14. – EDN JXEBHB.

5 **Моисеев, В. И.** Расчет тепловой модели вагона-цистерны для перевозки нефтепродуктов / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов // Известия Транссиба. – 2021. – № 1(45). – С. 85–95. – ISSN 2220-4245.

6 **Патент на полезную модель № 182602 U1 Российская Федерация, МПК B65D 88/00.** Цистерна для перевозки вязких продуктов : № 2018104341 : заявл. 05.02.2018 : опубл. 23.08.2018 / А. Н. Балалаев, А. В. Жебанов, М. А. Паренюк, И. О. Ананников; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (САМГУПС). – EDN RKTDSU.

7 **Ворон, О. А.** Использование метода актуализации технических решений для создания модели функционального взаимодействия систем автономного рефрижераторного вагона / О. А. Ворон // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_86.

8 **Ворон, О. А.** Аспекты совершенствования железнодорожных перевозок скоропортящихся грузов в составе непрерывной холодильной цепи / О. А. Ворон, И. Г. Морчилдзе // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 1(50). – С. 40–45. – ISSN 1994-831X.

9 **Коган, В. Б.** Теоретические основы типовых процессов химической технологии / В. Б. Коган. – Ленинград : Химия, 1977. – 592 с.

10 **Повх, И. Л.** Техническая гидромеханика / И. В. Повх. – Ленинград : Машиностроение. – 1976. – 502 с.

A. V. Zhebanov, V. I. Moiseev // Science and education for transport. – 2022. – No. 1. – P. 45–48. – EDN EUKVOY.

2 **Moiseev, V. I.** Organization of transportation by tank cars of solidified petroleum fuels with transmission through field pipelines at low temperatures / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov, T. A. Komarova // Transport of the Urals. – 2021. – No. 2(69). – P. 40–43. – ISSN 1815-9400.

3 **Kolesnikov, A. A.** Parametric optimization of the design based on the genetic algorithm of evolutionary calculations of a tank for the transportation of compressed or liquefied gases / A. A. Kolesnikov, M. Y. Serbinovsky, V. E. Dotsenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2(86). – P. 22–28. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_22.

4 **Moiseev, V. I.** Optimal options for transportation of solidified dark and light oil products in tank cars / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov // 2021. – No. 2(86). – P. 7–14. – EDN JXEBHB.

5 **Moiseev, V. I.** Calculation of the thermal model of a tank car for the transportation of petroleum products / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov // Izvestiya Transsib. – 2021. – No. 1(45). – P. 85–95. – ISSN 2220-4245.

6 **Utility model Patent No. 182602 U1 Russian Federation, IPC B65D 88/00.** Tank for the transportation of viscous products : No. 2018104341 : application 05.02.2018 : publ. 23.08.2018 / A. N. Balalaev, A. V. Zhebanov, M. A. Parenjuk, I. O. Anannikov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State University of Railways" (SAMGUPS). – EDN RKTDSU.

7 **Voron, O. A.** Using the method of updating technical solutions to create a model of functional interaction of autonomous refrigerated wagon systems / O. A. Voron // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 2(82). – P. 86–94. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_2_86.

8 **Voron, O. A.** Aspects of improving the rail transportation of perishable goods as part of a continuous refrigeration chain / O. A. Voron, I. G. Morchiladze // Transport of the Russian Federation. – 2014. – No. 1(50). – P. 40–45. – ISSN 1994-831X.

9 **Kogan, V. B.** Theoretical foundations of typical processes of chemical technology / V. B. Kogan. – Leningrad : Chemistry, 1977. – 592 p.

10 **Povkh, I. L.** Technical hydromechanics / I. L. Povkh. – Leningrad : Mechanical engineering, 1976. – 502 p.

11 **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва : Энергия. – 1977. – 344 с.

12 **Ксенофонтова, В. А.** Обобщенная математическая модель процессов перевозок грузов / В. А. Ксенофонтова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 158–167. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-2-158.

13 **Коршак, А. А.** Ресурсосберегающие методы и технологии при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов / А. А. Коршак. – Уфа : Дизайн Полиграф-Сервис, 2006. – 191 с.

11 **Mikheev, M. A.** Fundamentals of heat transfer / M. A. Mikheev, I. M. Mikheeva. – Moscow : Energy. – 1977. – 344 p.

12 **Ksenofontova, V. A.** Generalized mathematical model of cargo transportation processes / V. A. Ksenofontova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 2(82). – P. 158–167. – DOI 10.46973/0201-727X-2021-2-158.

13 **Korshak A. A.** Resource-saving methods and technologies in the transportation and storage of oil and petroleum products / A. A. Korshak. – Ufa : Design Polygraph Service, 2006. – 191 p.

V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov

HEATING OF FROZEN PETROLEUM PRODUCTS DURING UNLOADING FROM TANKERS FOR VARIOUS PURPOSES IN WINTER CONDITIONS

Abstract. The subject of the paper is due to necessity to organize the transportation of the solidified bulk cargo on the territory of the Russian Federation at subzero temperatures. Such cargoes include boiler and naval fuel oil, cracking residues, heavy petroleum oils, tar and oil bitumen, etc. A method is considered that provides the creation of primary channels in the solidified mass of petroleum product with the possibility of using both a steam heating system and an electric heating system equipped with linear heating elements. The device provides rapid erosion of the solidified fraction carried out almost simultaneously with unloading. The proposed measures aimed at increasing the stability of the movement of a tank car or a tank car, as well as reducing the time and thermal energy costs when unloading solidified bulk cargo are easily feasible.

Keywords: tank wagon, tank car, transportation of solidified cargo, heating of viscous cargo, unloading at subzero temperatures.

For citation: Moiseev, V. I. Heating of frozen petroleum products during unloading from tankers for various purposes in winter conditions / V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 169–176. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_169.

Сведения об авторах

Моисеев Владимир Иванович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (РГУПС),

кафедра «Математика и моделирование»,
доктор технических наук, доцент, профессор,
e-mail: moiseev_v_i@list.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

Moiseev Vladimir Ivanovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS),

Chair «Mathematics and Modeling»,
Doctorate of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor,
e-mail: moiseev_v_i@list.ru

Zhebanov Alexander Vladimirovich

Samara State Transport University (SSTU),

Chair «Wagons»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: zhebanov@inbox.ru

В. А. Соломин, В. В. Штанке

СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ КОЛЕСНЫХ ПАР ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МАГНИТОИНДУКЦИОННЫМИ ДАТЧИКАМИ

Аннотация. Повышение надежности и гарантирование бесперебойной работы железной дороги – это задача, решение которой лежит в области функциональных возможностей магнитоиндукционных датчиков. Результаты данного исследования получены на основе многолетнего опыта эксплуатации магнитоиндукционных датчиков в системах железнодорожной автоматики (ЖАТ). Был изучен алгоритм идентификации дефекта колеса, основанного на выделении полезного сигнала, а также определение сигнала, соответствующего определенному типу дефекта. Результаты исследования позволили сформулировать план модернизации магнитоиндукционных датчиков с перспективой объединения их в систему мониторинга, которая будет непрерывно диагностировать техническое состояние поверхности качения колес подвижного состава при движении над датчиком. Внедрение данной методики анализа позволит диагностировать изъяны железнодорожных колесных пар непосредственно на маршруте следования поезда и гарантирует снижение аварийности на железных дорогах нашей страны. Также разрабатываются алгоритмы сигналов, соответствующих конкретному дефекту, и внедрение разработанного программного обеспечения для расширения функциональных возможностей магнитоиндукционных датчиков.

Ключевые слова: магнитоиндукционный датчик, мониторинг состояния колеса, износ колесной пары, функциональная диагностика, анализ сигналов.

Для цитирования: Соломин, В. А. Способ диагностики дефектов колесных пар подвижного состава магнитоиндукционными датчиками / В. А. Соломин, В. В. Штанке // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 177–187. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_177.

Введение

Анализ физических процессов взаимодействия чувствительного элемента магнитоиндукционного датчика с проходящим над ним колесом позволяет увеличить потенциал функциональной диагностики и мониторинга систем магнитоиндукционных датчиков как наиболее распространённого и надежного элемента системы железнодорожной автоматики, который требует дальнейшего развития и совершенствования. Сегодня существует достаточно аналогов датчиков счета осей, предназначенных для определения факта прохода колеса, например, путевого датчик для определения положения оси колеса и счета осей [1]. Достижимый технический результат – определение оси колеса и счет осей подвижного состава, позволяющий проводить измерения с высокой точностью независимо от скорости движения подвижного состава, обеспечивается размещением в корпусе путевого датчика катушек индуктивности, генератора канала счета осей с колебательными контурами и детекторами положительных и отрицательных сигналов. Определение положения оси колеса, направление движения, скорость, а также подавление помех от тяговых токов происходит как по амплитуде, так и по полярности выходного сигнала за счет использования дифференциальной схемы включения катушек индуктивности и использования в датчике фильтров нижних частот. Внешний вид путевого датчика представлен на рис. 1.

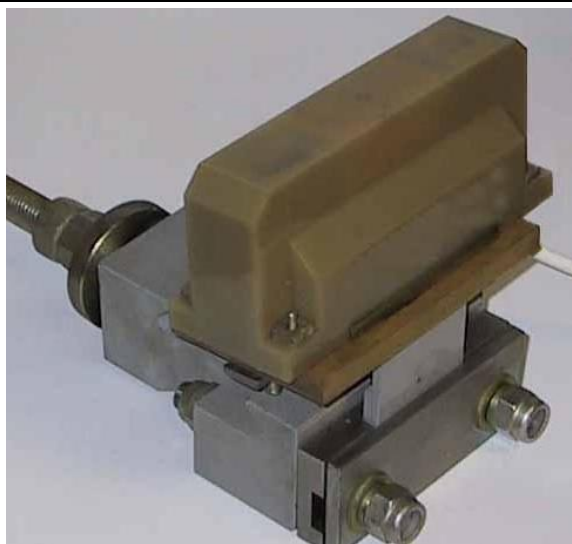


Рис. 1. Путь датчик для определения положения оси колеса и счета осей

Недостатками данного устройства являются сложность конструкции предлагаемого путевого датчика, небольшой объем выполняемых задач и необходимость настройки датчика после его установки на рельс. В статье предлагается и рассматривается более совершенный способ счета и диагностики колесных пар подвижного состава.

Исследование способов регистрации прохождения колесных пар

Более точную диагностику обеспечивает способ регистрации прохождения колесных пар подвижного состава амплитудными детекторами датчиков [2], при котором определяются факт прохода колесной пары, направление движения и скорость колеса, осуществляется счет осей с учетом направления движения, и выполняется непрерывный самоконтроль исправности системы и положения колеса относительно рельса. Способ позволяет анализировать выходное напряжение амплитудных детекторов датчиков при отсутствии колесных пар (рис. 2) и во время прохождения колесных пар (рис. 3) и одновременно диагностировать изменение частоты генерации автогенераторов. Если частота понизилась до определенного заданного значения, то это свидетельствует о том, что прошла реборда колеса, которую необходимо учитывать при счете колесных пар, а если частота повысилась, то это означает, что прошел объект не из металла, и изменение напряжения на выходе амплитудных детекторов в этом случае не учитывается.

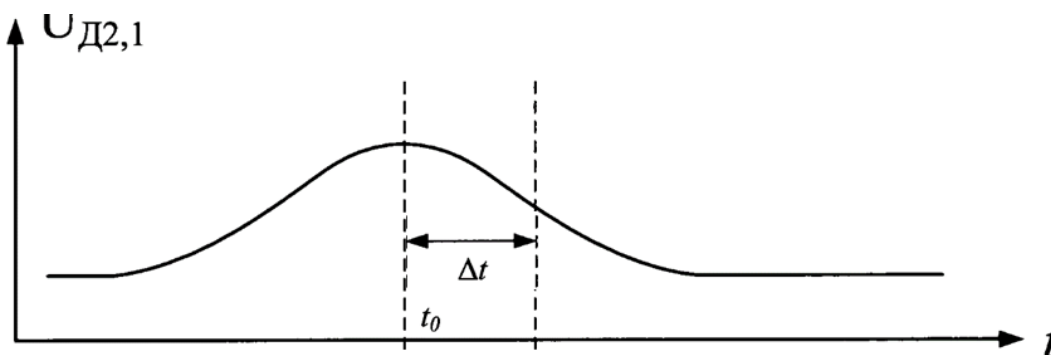


Рис. 2. Отсутствие изменения фазы напряжения на выходе датчика при отсутствии колесной пары $U_{д1}$ (В) [2]

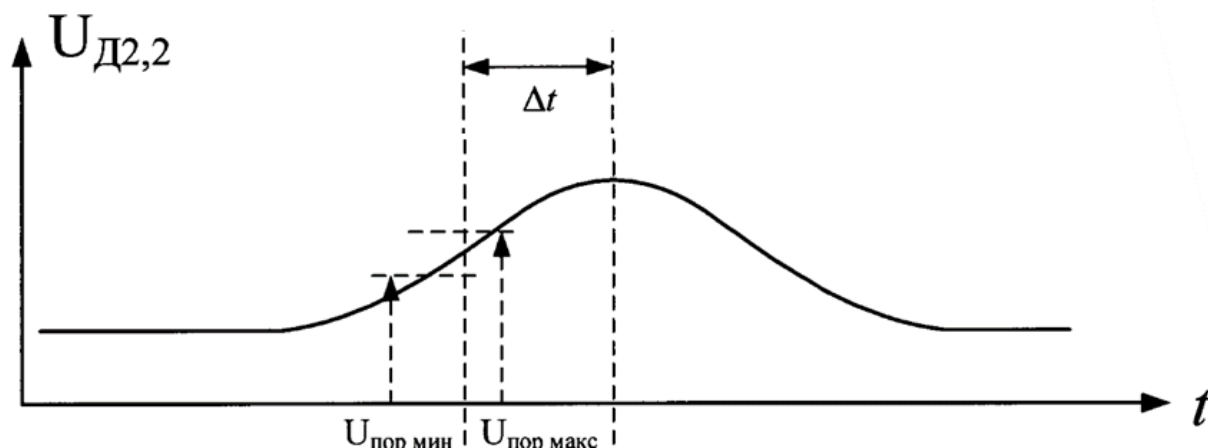


Рис. 3. Изменение фазы напряжения датчика при фиксации прохода колесной пары $U_{д2}$ (В) [2], зафиксированные всплески напряжения в промежуток времени Δt (с) при проходе реборды колесной пары

Путевой датчик содержит два электронных автогенератора, первый и второй амплитудные детекторы, контроллер, устройство гальванической развязки и узел передачи данных.

Недостатками данного путевого датчика являются избыточное количество оборудования, большое количество проводов для передачи данных на пост, значительная вероятность сбоев при работе и возможность ложного учета колесных пар при прохождении над датчиками элементов металлического оборудования подвижного состава, что приводит к снижению надежности функционирования данной системы.

Предлагаемый нами вариант анализа технического состояния колесной пары при подсчете количества осей магнитоиндукционными датчиками включает метод объемной диагностики и является в настоящее время одним из наиболее надежных средств технической диагностики и контроля подвижного состава и требует установки всего двух датчиков. Это показано на рис. 4.



Рис. 4. Установка датчиков для объемной диагностики колес проходящего поезда и счета осей

Алгоритм идентификации дефектов основан на свойстве чувствительности магнитоиндукционного датчика. Проведен анализ функции чувствительности амплитуды напряжения ΔU (В) в интервале времени Δt (с) в электромеханической системе «колесо – рельс – датчик магнитоиндукционный» [3] для технической диагностики состояния поверхности качения колеса подвижного состава при его перемещении над датчиком. Более высокой чувствительностью обладает магнитоиндукционный датчик, имеющий удлиненный магнитный сердечник, что обеспечивает повышенную выходную мощность сигнала и помехозащищенность для обнаружения дефектов как снаружи, так и внутри колесной пары при проходе колеса над датчиками. Указанный результат достигается при использовании способа

объемной диагностики технического состояния колесных пар при прохождении железнодорожного вагона над датчиками.

В исследовании моделировались ситуации для обнаружения дефектов на поверхности качения колесной пары, когда датчик (Д1) расположен внутри колеи, и для обнаружения «волочащихся» деталей и перекошенных тележек датчиком (Д2), расположенным снаружи колеи. Конструктивное расположение датчиков относительно рельса приведено на рис. 5.

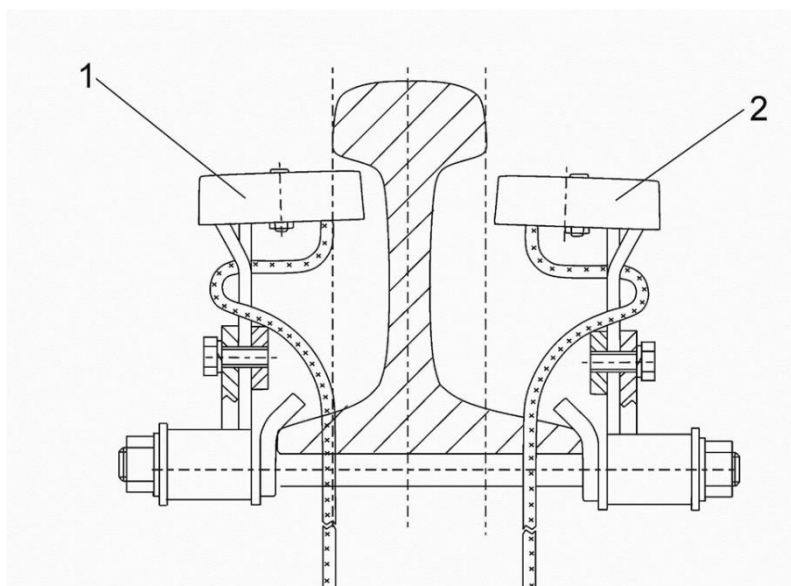


Рис. 5. Расположение датчиков относительно рельса:

1 – головка датчика 1 (внутри колеи); 2 – головка датчика 2 (снаружи колеи)

В головках датчиков 1 и 2 находятся по две катушки индуктивности, позволяющих уменьшить влияние скачков тягового тока и других внешних помех, влияющих на формирование полезного выходного сигнала [4].

Регистрируемый объект (колесо) проходит над поверхностью чувствительного элемента головки датчика в продольном направлении X (пройденный путь), с боковым отклонением Y и вертикальным отклонением Z (вертикальная нагрузка колеса на рельс) [5]. Эти отклонения при прохождении колеса над чувствительным элементом датчика варьируются в широких пределах. На рис. 6 схематично представлено взаимодействие датчика с проходящим над ним колесом.

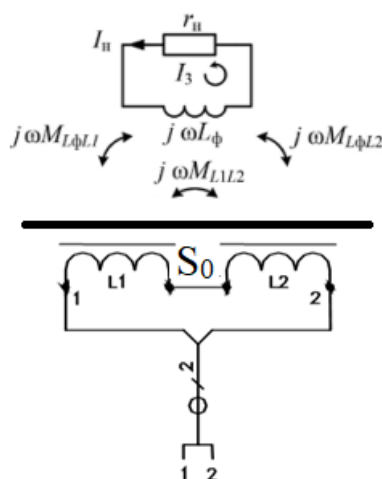


Рис. 6. Схематичное представление взаимодействия датчика при проходе над ним колеса [4]:

$j\omega L_\Phi$ – комплекс индуктивного сопротивления катушек;

$j\omega ML_\Phi$ – комплекс сопротивления взаимной индукции катушек

При проследовании колеса в любом направлении формируется одинаковый двухполярный импульс ЭДС, амплитуда которого пропорциональна, а длительность его обратно пропорциональна скорости

движения колеса или производной магнитного потока по перемещению и определяется выражением (1).

$$e = -WS \frac{\Delta B}{\Delta t}, \quad (1)$$

где W – число витков обмотки; S – эквивалентная площадь катушки; ΔB – магнитная индукция потока, пронизывающего эквивалентную площадь катушки; Δt – время прохождения колеса.

ЭДС сигнала на выходе является практически синусоидальной при симметрии относительно точки контакта датчика с колесом. Наличие дефекта в колесе вносит элемент различного вида помехи и синусоидальность этой кривой нарушается из-за появления высших гармоник.

Чувствительность датчика к изменению положения колеса по координате X (м) [3] имеет вид:

$$S_{0(x)} = K_{и} \frac{d\Phi(x)}{dx}, \quad (2)$$

где S_0 – это площадь чувствительности датчика (головки); $K_{и}$ – коэффициент искажения, который зависит от параметров сигналов датчика; $d\Phi(x)$ – величина магнитного потока в единицу времени по dx – бесконечно малое перемещение колеса над датчиком [6].

Это выражение (2) зависимости чувствительности датчика от перемещения колеса во время движения состава с постоянной V (м/с) скоростью.

Коэффициент искажения сигнала датчика определяется по формуле (3)

$$K_{и} = \frac{\Delta A_{имп}}{\Delta T_{имп}} = \frac{A_{max} - A_{min}}{T_{max} - T_{min}}, \quad (3)$$

где $\Delta A_{имп}$ – разность амплитуд напряжения (В); $\Delta T_{имп}$ – интервал времени (с) между максимальным и минимальным значениями амплитуды напряжения.

Методика проведения исследования заключается в следующем. При прохождении колеса железнодорожного вагона измеряют выходной сигнал первого магнитного датчика Д1, размещенного внутри железнодорожной колеи, затем при дальнейшем проследовании колеса измеряют выходной сигнал второго магнитного датчика Д2, размещенного снаружи железнодорожной колеи. На основе MATLAB анализируют спектр выходного сигнала и определяют наличие искажений выходного сигнала от каждого датчика (рис. 7).

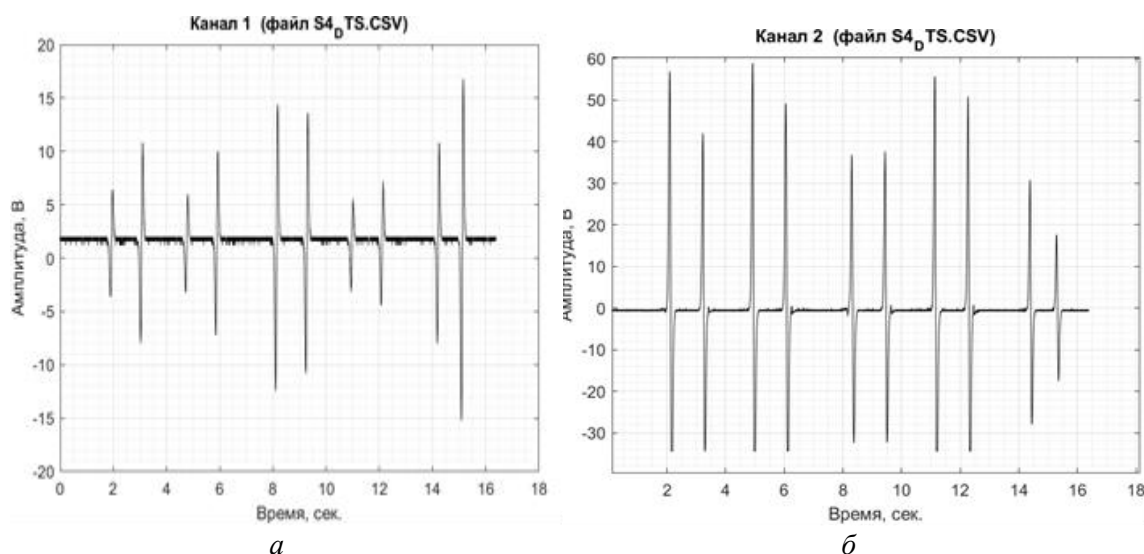


Рис. 7. Напряжение выходного сигнала:
 a – датчика Д1, канал 1; b – датчика Д2, канал 2

Видно, что при расположении датчиков внутри (Д1) и снаружи (Д2) колеи выходное напряжение датчика Д2, который находится ближе к гребню колеса, выше, а сам сигнал более четкий. Искажений в кривых напряжений нет.

При проследовании колеса был зафиксирован его изъян (рис. 8).

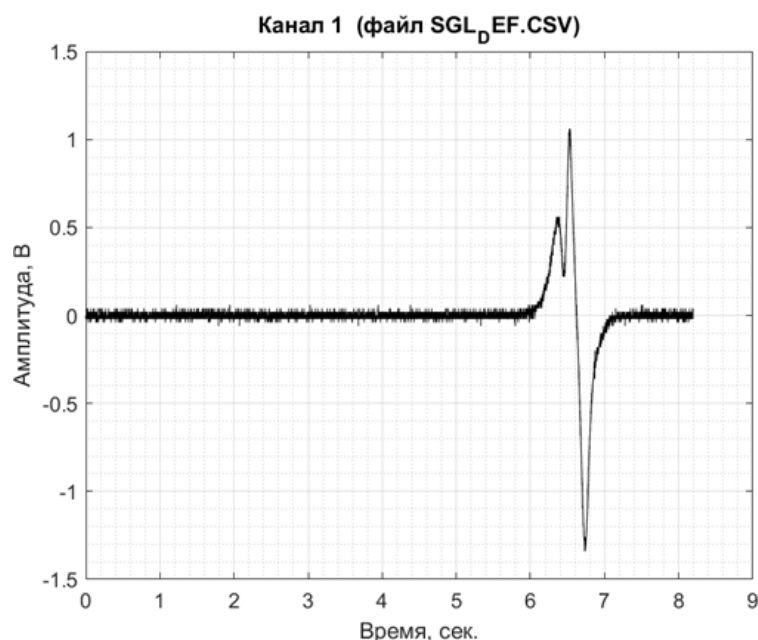


Рис. 8. Выходной сигнал датчика при наличии изъяна гребня колеса

Максимальная амплитуда напряжения сигнала датчика составила 1В, минимальная (помеха) – 0,6 В, время фиксации помехи 6,3 с, начало появления нормального сигнала через 6,6 с. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что величина коэффициента искажения составила 1,6 %, что свидетельствует о дефекте колеса, износе гребня. Результаты наших экспериментальных исследований сведены в таблицу.

При проследовании колеса, на котором имеется «наплыв», сигнал датчика показан на рис. 9.

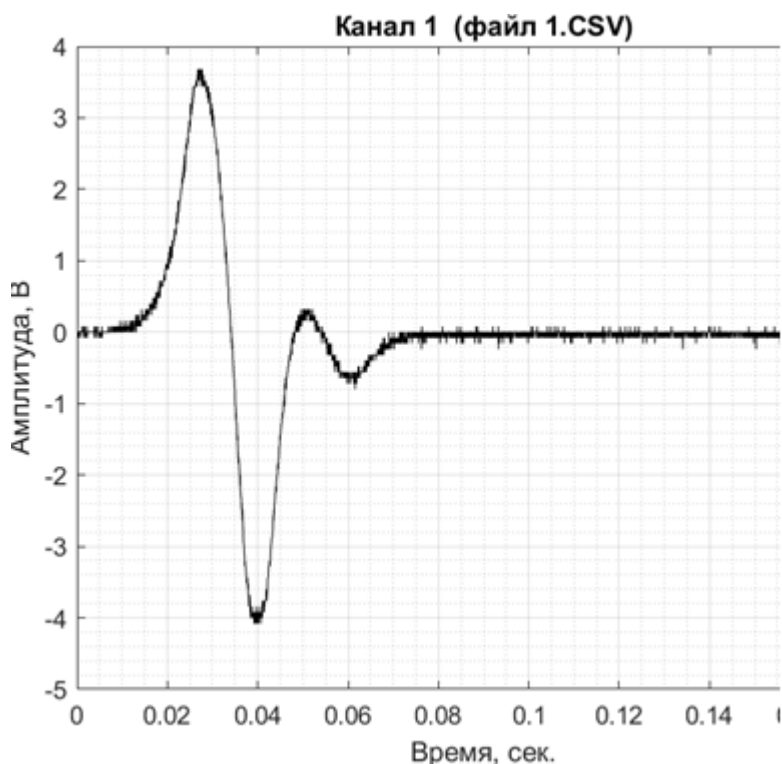


Рис. 9. Сигнал при «наплыве» на гребне колеса

Максимальная амплитуда напряжения сигнала датчика составила 4В, наплыв металла фиксируется и проявляется как искажение сигнала после прохода колеса. Время фиксации наплыва металла на колесе составляет 0,3 мс. Величина коэффициента искажения K_n не превышает 4 %, что в таблице свидетельствует о наплыве металла на гребне колеса.

Искажения сигналов датчиков в зависимости от дефектов колеса

Вид дефекта	Диапазон значений коэффициента гармонических искажений, соответствующий виду дефекта	С какого датчика снимаются показания для определения дефекта
Износ гребня	До 3,5 %	Д1
Наплыв на гребне	До 5,5 %	Д1
Волочащиеся детали	До 7 %	Д2
Перекошенная тележка	До 4 %	Д2

В лабораторных условиях нами были получены данные о диагностировании следующих дефектов колеса: отклонение реборды от продольной оси симметрии, истончение (износ) гребня колеса, различные внутренние наплывы металла на ободе колеса. С помощью специальных методов были смоделированы различные виды дефектов колесной пары, начиная от износа обода колеса до перекоса тележки [7]. Данные исследования были получены в результате лабораторных испытаний, проводимых в испытательном комплексе научно-внедренческого центра «Безопасности транспорта».

Исходя из диапазона чувствительности магнитоиндукционных датчиков, мы получили наглядную функциональную зависимость величины регистрируемого сигнала датчика (выходного напряжения В) от переменных параметров проходящего колеса в определенный период времени (с) при равномерном движении со скоростью V_k 3 м/с. На рис. 10 зафиксирован момент прохода колеса с изъяном (с дефектом). Изъян зафиксирован на второй колесной паре на 15-й секунде.

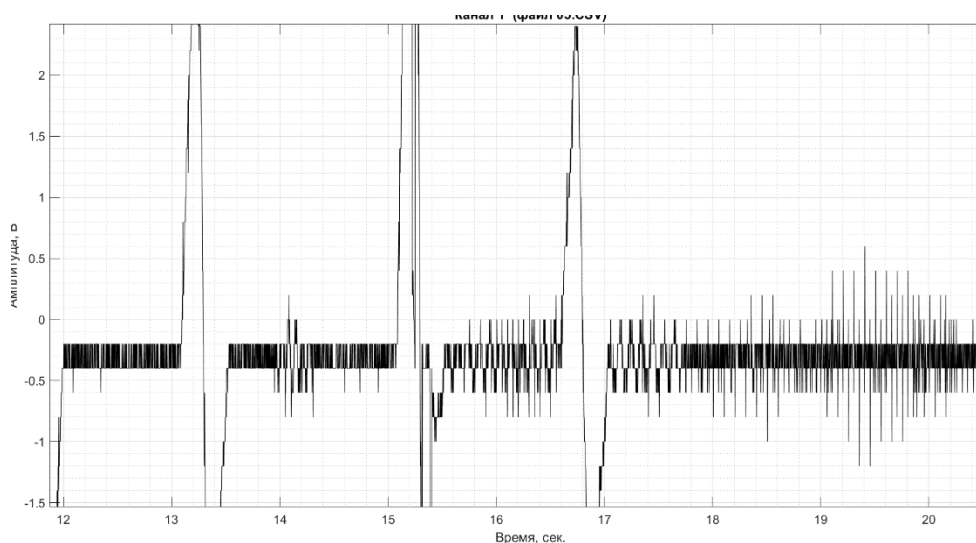


Рис. 10. Определение дефекта на второй колесной паре

Представим дефект на второй колесной паре более наглядно на отдельном графике (рис. 11). На основании экспериментальных данных вычисляем значение K_n и определяем, что отклонение 2 % соответствует изъяну на гребне.

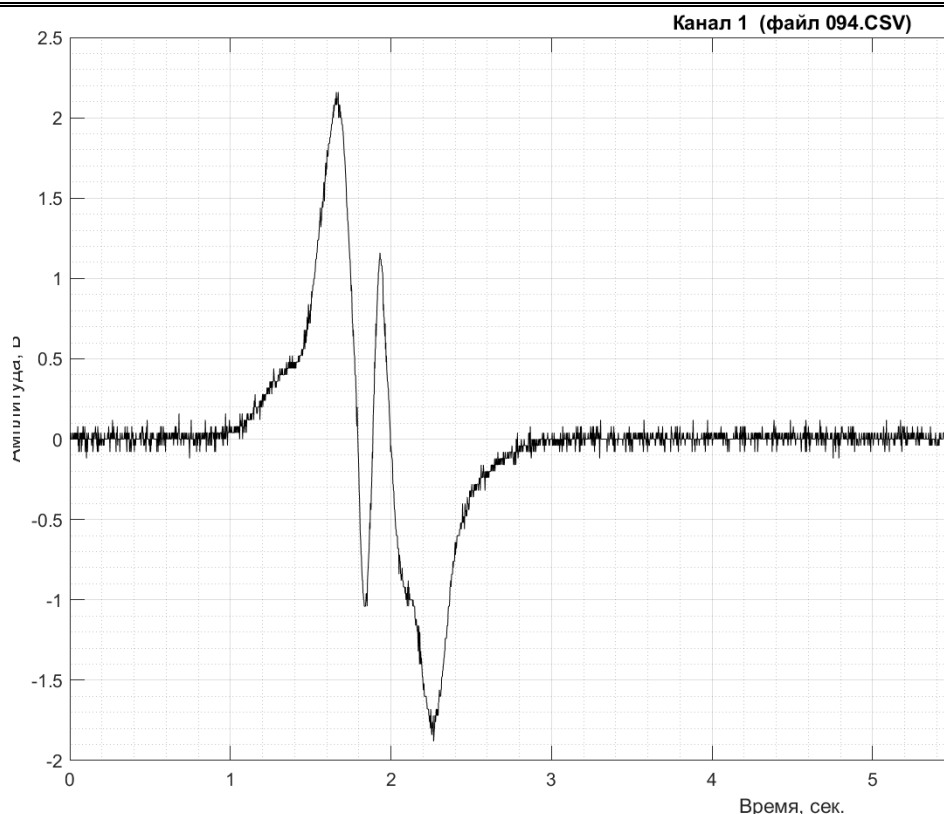


Рис. 11. Определение дефекта на второй колесной паре

Используя методологию нашего исследования, основанную на изменении величины и характера амплитуды выходного напряжения магнитоиндукционного датчика в момент прохождения дефектной колесной пары, мы впервые получили зависимость искаженного сигнала напряжения датчика от дефектов колеса [8]. На основе исследования взаимодействия датчика с железнодорожным колесом и построении упрощенной математической модели выявления дефектов, можно отработать алгоритм обнаружения дефектов на практике, даже при условии минимального износа колеса и рельса. Это обеспечит требуемые показатели надежности обнаружения и регистрации дефекта. В итоге будет повышена безопасность движения железнодорожного транспорта при использовании более простой и надежной системы оборудования ЖАТ [9]. Расширены функциональные возможности магнитоиндукционных датчиков, которые теперь способны обеспечить не только счет колесных пар, но и определять их дефекты.

Согласно исследованиям [10] в среднем все тележки грузовых вагонов имеют непараллельную установку колесных пар, что со временем приводит к увеличению износа гребней колес и рельсов. Возможность выявления на раннем этапе типа деформаций профилей качения колес и, как следствие, интенсивность износа рельсов позволяет устанавливать частоту технического обслуживания колесной пары; оптимизировать параметры рессорной подвески; разработать специальный профиль качения колеса для поддержания постоянной конусности колесной пары во время эксплуатации; подобрать материалы и методы смазки, минимизирующие износ, и повысить за счет этих мероприятий срок службы железнодорожного подвижного состава.

Выводы

1 Магнитоиндукционные датчики предложенной конструкции автономны от источников электрической энергии, экономичны и надежны в эксплуатации, имеют повышенный выходной сигнал, передаваемый на устройства железнодорожной автоматики, осуществляющие его оцифровку и трансляцию информации в центр ее обработки, что обеспечивает точный учет осей колесных пар.

2 Предложен способ установки двух магнитоиндукционных датчиков, при котором один датчик устанавливается внутри рельсовой колеи, а второй – снаружи. Этот способ расширяет функциональные особенности магнитоиндукционного датчика и позволяет дополнительно выявлять дефекты колеса и колесной пары.

3 Новый способ установки магнитоиндукционных датчиков внутри и снаружи рельсовой колеи позволил выявлять такие дефекты, как износ гребня колеса, наплыв металла на поверхности катания и перекося тележки вагона, что получило экспериментальное подтверждение при натуральных и лабораторных испытаниях.

4 На основе исследований разработана унифицированная программа системы обнаружения дефектов колесных пар условиях эксплуатации, при которой своевременно определяется необходимость проведения деповского ремонта, что повышает безопасность движения поездов.

Список литературы

1 Патент № 2206469 Российская Федерация, МПК В61L 1/16. Путь датчик для определения положения оси колеса и счета осей / В. И. Омеляненко, Б. Г. Волченко, В. Г. Волченко, О. А. Лысенко. – № 2000117475/28 ; заявл. 05.07.2000 ; опубл. 20.06.2003.

2 Патент RU 2564553C2. Способ регистрации прохождения колесных пар подвижного состава и устройство для его осуществления / И. Г. Тильк, В. В. Ляной, В. Л. Логинов [и др.]. – № 2013156196/11 ; заявл. 17.12.2013 ; опубл. 10.10.2015.

3 Петров, К. С. Математическая модель функции чувствительности магнитоиндукционного датчика на основе астигматического подхода для идентификации дефектов поверхности катания колесных пар в процессе движения их над датчиком / К. С. Петров, В. В. Петров // Известия Транссиба. – 2022. – № 1(49). – С. 111–122. – ISSN 2220-4245.

4 Ляной, В. В. Разработка математической модели для исследования параметров индуктивного датчика железнодорожного колеса / В. В. Ляной // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 3(35). – С. 4–13. – ISSN 2079-0392.

5 А. с. 1477610 СССР, кл. В 61 L 1/04, 1987. Датчик Штанке магнитный помехоустойчивый ШМП12. А. Э. Штанке (СССР). – № 4627448/27-11 ; заявл. 27.12.88 ; опубл. 23.12.90, Бюл. № 47. – 4 с. : ил.

6 Петров, К. С. Математическая модель магнитоиндукционного датчика осей подвижного состава железнодорожного транспорта на основе стигматического подхода / К. С. Петров, А. С. Окишев, В. В. Петров // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 131–140. – ISSN 2220-4245.

7 Шилер, А. В. Пути снижения напряженного состояния элементов механической системы «колесная пара – рельсовая колея» : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шилер Александр Валерьевич // ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта». – Москва, 2019. – 365 с.

References

1 Patent No. 2206469 Russian Federation, IPC B61L 1/16. Track sensor for determining the position of the wheel axis and counting axles / V. I. Omelianenko, B. G. Volchenko, V. G. Volchenko, O. A. Lysenko. – No. 2000117475/28 ; application 05.07.2000 ; publ. 20.06.2003.

2 Patent RU 2564553C2. A method for registering the passage of wheel pairs of rolling stock and a device for its implementation / I. G. Tilk, V. V. Lyany, V. L. Loginov [et al.]. – No. 2013156196/11 ; application 17.12.2013 ; publ. 10.10.2015.

3 Petrov, K. S. A mathematical model of the sensitivity function of a magnetoinduction sensor based on an astigmatic approach for identifying defects in the rolling surface of wheel pairs during their movement over the sensor / K. S. Petrov, V. V. Petrov // Izvestiya Transsiba. – 2022. – No. 1(49). – P. 111–122. – ISSN 2220-4245.

4 Lyany, V. V. Development of a mathematical model for studying the parameters of an inductive sensor of a railway wheel / V. V. Lyany // Bulletin of the Ural State University of Railways. – 2017. – No. 3(35). – P. 4–13. – ISSN 2079-0392.

5 A. S. 1477610 USSR, cl. B 61 L 1/04, 1987. The Stancke magnetic noise-resistant sensor SHMP12. A. E. Shtanke (USSR). – No. 4627448/27-11 ; appl. 27.12.88 ; publ. 23.12.90, Bul. No. 47. – 4 p. : illustration.

6 Petrov, K. S. Mathematical model of magnetoinduction sensor of axes of railway rolling stock on the basis of a stigmatic approach / K. S. Petrov, A. S. Okishev, V. V. Petrov // Izvestiya Transsiba. – 2020. – No. 2 (42). – P. 131–140. – ISSN 2220-4245.

7 Shiler, A. V. Ways to reduce the stress state of the elements of the mechanical system "wheelset – rail track" : specialty 05.22.07 "Rolling stock of railways, train traction and electrification" : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / A. V. Shiler // Federal State Educational Institution "Russian University of Transport". – Moscow, 2019. – 365 p.

8 **Петров, К. С.** Математическая модель функции чувствительности магнитоиндукционного датчика на основе астигматического подхода для идентификации дефектов поверхности катания колесных пар в процессе движения их над датчиком / К. С. Петров, В. В. Петров // Известия Транссиба. – 2022. – № 1(49). – С. 111–122. – ISSN 2220-4245.

9 **Сакало, В. И.** Контактные задачи железнодорожного транспорта / В. И. Сакало, В. С. Коссов. – Москва : Машиностроение, 2004. – 495 с. – ISBN 5-217-03211-1.

10 Исследование влияния состояния тележек грузовых вагонов на боковой износ гребней колес по результатам математического моделирования и обследования вагонов в эксплуатации / А. М. Орлова, В. С. Лесничий, Е. И. Артамонов // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Наука и прогресс транспорта. – 2008. – ISSN 2307-3489.

11 **Петров, К. С.** Разработка системы магнитоиндукционных датчиков для диагностирования износа гребней колесных пар подвижного состава / К. С. Петров, Е. В. Кондратенко, В. В. Петров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2022. – № 8. – С. 585–596. – ISSN 0021-3454.

12 **Саидова, А. В.** Прогноз износа профилей колес с использованием динамических моделей / А. В. Саидова, А. М. Орлова // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3. – С. 51–53. – ISSN 1994-831X.

8 **Petrov, K. S.** A mathematical model of the sensitivity function of a magnetoinduction sensor based on an astigmatic approach for identifying defects in the rolling surface of wheel pairs during their movement over the sensor / K. S. Petrov, V. V. Petrov // Izvestiya Transsiba. – 2022. – No. 1(49). – P. 111–122. – ISSN 2220-4245.

9 **Sakalo, V. I.** Contact problems of railway transport / V. I. Sakalo, V. S. Kossov. – Moscow : Mashinostroenie, 2004. – 495 p. – ISBN 5-217-03211-1.

10 Investigation of the influence of the state of freight carts on the lateral wear of wheel ridges based on the results of mathematical modeling and inspection of wagons in operation / A. M. Orlova, V. S. Lesnichy, E. I. Artamonov // Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport. Science and progress of transport. – 2008. – ISSN 2307-3489.

11 **Petrov, K. S.** Development of a system of magnetoinduction sensors for diagnosing the wear of the ridges of wheel pairs of rolling stock / K. S. Petrov, E. V. Kondratenko, V. V. Petrov // Izvestia of Higher Educational Institutions. Instrumentation. – 2022. – No. 8. – P. 585–596. – ISSN 0021-3454.

12 **Saidova, A. V.** Forecast of wear of wheel profiles using dynamic models / A. V. Saidova, A. M. Orlova // Transport of the Russian Federation. – 2013. – No. 3. – P. 51–53. – ISSN 1994-831X.

V. A. Solomin, V. V. Shtanke

A METHOD FOR DIAGNOSING DEFECTS IN WHEEL SETS OF ROLLING STOCK BY MAGNETOINDUCTION SENSORS

Abstract. Increasing reliability and guaranteeing uninterrupted operation of the railway is an objection where its solution lies in the field of functionality of magnetic induction sensors. The results of this study were obtained on the basis of many years of experience in operating magnetic induction sensors in railway automation systems (RAS). An algorithm for identifying a wheel defect based on isolating a useful signal, as well as determining a signal corresponding to a certain type of defect, was studied. The results of the study made it possible to formulate a plan for the modernization of magnetic induction sensors with the prospect of combining them into a monitoring system that will continuously diagnose the technical condition of the rolling surface of rolling stock wheels when moving over the sensor. The introduction of this analysis technique will make it possible to diagnose flaws in railway wheel sets directly on the train route and guarantee a reduction in the accident rate on the railways of our country. Algorithms for signals corresponding to a specific defect are also being developed, and the implementation of developed software to expand the functionality of magnetic induction sensors is being developed.

Keywords: magnetic induction sensor, wheel condition monitoring, wheel set wear, functional diagnostics, signal analysis.

For citation: Solomin, V. A. A method for diagnosing defects in wheel sets of rolling stock by magnetoinduction sensors / V. A. Solomin, V. V. Shtanke // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 177–187. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_177.

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

Штанке Вероника Валериевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
начальник Научно-внедренческого центра «Безопасность транспорта»,
e-mail: Arnold.shtanke@yandex.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

Shtanke Veronika Valeryevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Head of the Scientific and Innovation Center «Transport Safety»,
e-mail: Arnold.shtanke@yandex.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 519.862.6, 624.014, 621.332.31

DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_188

*Л. А. Астраханцев, М. П. Базилевский, О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий***РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Аннотация. Рассмотрена разработка математических моделей напряженно-деформированного состояния металлических опор контактной сети железных дорог. В качестве математического аппарата использованы методы теории планирования эксперимента. Напряженно-деформированное состояние характеризуется максимальным напряжением в элементе по Мизесу, максимальным продольным нормальным сжатым и растянутым напряжением, деформацией элемента. Входными переменными выступают сжимающая/растягивающая сила, наличие повреждения на элементе, его длина и площадь поперечного сечения, дополнительная сила в поперечном направлении. Проведен полный факторный эксперимент из 32 опытов. Опыты проведены с использованием программного комплекса конечноэлементного моделирования Femap. По результатам опытов с помощью эконометрического пакета Gretl построены четыре математических модели регрессионного типа. С их помощью выявлены факторы, оказывающие наиболее сильное влияние на напряженно-деформированное состояние.

Ключевые слова: контактная сеть, опоры, железная дорога, напряженно-деформированное состояние, теория планирования эксперимента, математическая модель.

Для цитирования: Разработка математических моделей напряженно-деформированного состояния металлических опор контактной сети железных дорог методами теории планирования эксперимента / Л. А. Астраханцев, М. П. Базилевский, О. В. Лобанов, В. П. Ступицкий // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 188–195. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_188.

Введение

Эффективным инструментом в научных исследованиях является теория планирования эксперимента (ТПЭ) [1, 2], основная задача которой – выбор числа и условий проведения опытов, методов математической обработки их результатов для принятия решений. ТПЭ широко применяется в различных отраслях науки, требующих проведения контролируемых исследований: в физике, химии, биологии, инженерии, экономике и т.д. Так, например, в [3] с помощью ТПЭ построены математические модели расчета оптимального напряжения системы внешнего электроснабжения газовых месторождений, в [4] – модель влияния параметров воздушной среды рабочих помещений на интенсивность испарения опасных химических веществ с поверхности пролива, в [5] – модель влияния сырья на получение комплексного CO₂-экстракта, в [6] – модели зависимости величин токов поврежденного асинхронного генератора от расположения точки короткого замыкания внутри обмотки статора, в [7] – модель однофазного асинхронного электродвигателя для судовых систем автоматизации, в [8] – модель влияния некоторых факторов на глубину реза при лазерной резке, в [9] благодаря математической модели, созданной на основе регрессионного анализа, появляется возможность определять потенциалы заземляющих устройств при различных поездных ситуациях, в [10] проанализирован случайный тяговый процесс и выявленные значимые факторы на тяговое электропотребление.

Одной из основных целей стратегии развития холдинга открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2030 года является увеличение скорости движения поездов и повышение их массы с сохранением эффективности и безопасности движения поездов [11]. В связи с этим повышаются требования к своевременному определению изменения технического состояния устройств контактной сети.

Одним из основных элементов контактной сети являются опоры. Отказ опоры контактной сети и потери ею несущей способности могут сопровождаться непредсказуемыми последствиями, которые оказывают влияние на безопасность движения поездов. Правильно оценить состояние и остаточный ресурс устройств контактной сети без привлечения специализированных организаций – сложнейшая задача для персонала дистанций электроснабжения.

Существующие методы диагностики металлических опор контактной сети [12] не учитывают необходимость определения изменения факторов, которые влияют на остаточную несущую способность. Актуальной задачей становится разработка новых методик диагностики опорных конструкций.

Анализ статистических данных показывает увеличение дефектов, связанных с металлическими конструкциями. Одними из самых распространенных повреждений металлических опор являются погнутости, которые представляют собой деформацию элементов конструкции [13]. Сложность влияния данного дефекта на оценку технического состояния заключается в определении режима работы элемента, на котором находится повреждение. Согласно указанию по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети [14], дефекты, расположенные на конструкциях с работой на сжатие, имеют меньший допуск на величину погнутости. Это связано с тем, что сжатые элементы быстрее теряют состояние равновесия и, как правило, с отрицательной динамикой развития состояния, что приводит к нарушению целостности конструкции. К сожалению, современные методики не учитывают изменение состояния, нетипичные повреждения опорных конструкций и способ оценки остаточной несущей способности.

В связи с этим целью данной работы является разработка на основе методов ТПЭ математических моделей влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние отдельных элементов металлических опорных конструкций контактной сети железных дорог.

Отбор входных и выходных переменных

Для правильной оценки технического состояния в процессе эксплуатации необходимо понимать причины возникновения повреждений. На контактной сети имеется большое количество факторов, вызывающих появление повреждений опорных конструкций. Все эти факторы можно разделить на три группы: климатические, эксплуатационные и случайные. Но, к сожалению, количественно оценить перечисленные факторы проблематично.

Рассматривая металлическую ферменную опору (рис. 1), можно пояснить, что нагрузка, действующая на нее, изменяется под воздействием внешних факторов.

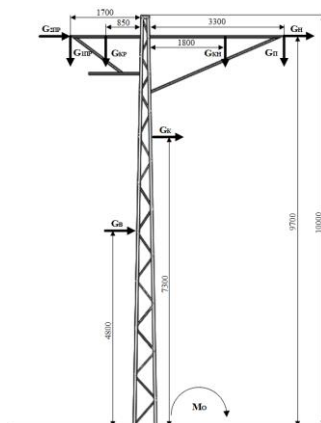


Рис. 1. Схема опоры М6/10

На расчетной схеме плечи сил приведены в соответствии с размерами опоры, размерами типовых консолей и типовых кронштейнов, также представлены нагрузки, которые приложены к опоре в процессе эксплуатации:

$G_{оп}$ – вертикальная нагрузка от веса контактной подвески, Н;

G_k – нагрузка от изменения направления проводов, Н;

$G_{кн}$ – нагрузка от веса консоли, Н;

$G_{кр}$ – нагрузка от веса кронштейна, Н;

$G_{1пр}$ – вертикальная нагрузка от веса проводов, расположенных на кронштейне, Н;

$G_{2пр}$ – нагрузка от давления ветра на провода, расположенные на кронштейне, Н;

G_v – нагрузка от давления ветра на поверхность опоры, Н;

G_n – суммарная горизонтальная нагрузка от давления ветра на несущий трос и контактный провод, Н;

M_0 – момент в основании опоры, возникающий из-за работы грунта, Н/м.

Все представленные нагрузки изменяются под действием климатических факторов, процесса движения поездов и режима работы устройств контактной сети. При этом возникают сложности с определением степени их влияния на несущую способность. Что в свою очередь может привести к появлению повреждений или разрушению конструкции.

Для решения данной проблемы рассмотрим влияние факторов на отдельные элементы конструкций, а именно: раскосов, поясов и фрагментов стоек металлических опор контактной сети. И в первую очередь необходимо выявить, какие параметры будут изменять их напряжено-деформированное состояние.

Рассмотрим основные влияющие параметры фрагмента металлической опоры (стойка, раскос или пояс):

1 Внешняя продольная сила или сумма действующих сил. Основной фактор, влияющий на внутренние напряжения в элементах металлических конструкций.

2 Наличие дефектов на конструкции. Один из них – это дефект типа погнутость конструктивных элементов, возникающий в следствие нарушений в процессе эксплуатации или случайных механических повреждений. Данный дефект в свою очередь может повысить внутреннее напряжение в элементе и возможно меняет его характер.

3 Геометрические размеры конструктивного элемента. К ним будут относиться: длина элемента, его поперечное сечение, а именно форма и площадь. От этих факторов будет зависеть величина и распределение внутреннего напряжения.

Таким образом, для построения математических моделей было принято решение использовать следующие управляющие входные переменные:

x_1 – сжимающая или растягивающая сила, которая действует на металлический элемент конструкции, Н;

x_2 – наличие повреждения на элементе;

x_3 – длина исследуемого элемента, мм;

x_4 – площадь поперечного сечения, мм²;

x_5 – влияние дополнительной силы в поперечном направлении, Н.

В качестве выходных переменных, характеризующих напряженно-деформированное состояние металлических опор контактной сети, были выбраны следующие:

y_1 – максимальное напряжение в элементе по Мизесу, МПа;

y_2 – максимальное продольное нормальное сжатое напряжение, МПа;

y_3 – максимальное продольное нормальное растянутое напряжение, МПа;

y_4 – деформация элемента, мм.

Планирование эксперимента

Проводился полный факторный эксперимент типа 2^5 , т.е. каждый фактор рассматривался лишь на верхнем и нижнем уровне. Общее число опытов в этом случае составило 32. Опыты проводились с использованием программного комплекса конечноэлементного моделирования Femap [15]. Программа позволяет выполнять расчеты статических напряжений и деформаций, устойчивости, определения собственных частот и форм колебаний, анализа тепловых установившихся и переходных процессов, а также задач статики и динамики в нелинейной постановке для широкого класса машиностроительных и других конструкций.

Femap позволяет достоверно определять изменения внутренних напряжений в элементах и при этом сохранять высокий уровень повторяемости исследования. Для проведения опытов сначала была создана трехмерная модель (рис. 2) фрагмента стойки металлической опоры, а затем осуществлялось разбиение на конечные элементы.

Характеристики материала были приняты для стали марки 09Г2С, из которой изготавливалась опора. Материал опорной металлоконструкции моделировался изотропной средой. Были заданы следующие характеристики материала:

- модуль упругости $E = 210000$ МПа – отношение напряжения к деформации сжатия (удлинения);
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,28$ – абсолютная величина отношения поперечной и продольной относительной деформации образца материала;
- плотность материала $\rho = 7,89 \cdot 10^{-9}$ т/мм³.

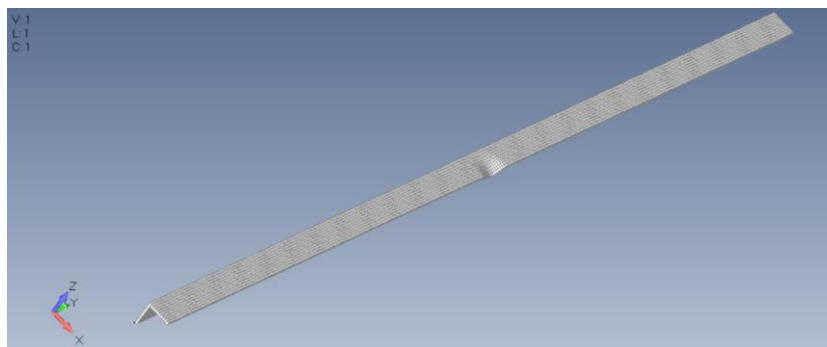


Рис. 2. Модель фрагмента металлической опоры с повреждением

В системе Femap в каждом опыте сначала задавались значения входных переменных x_1, x_2, x_3, x_4 и x_5 , после чего фиксировались значения выходных переменных y_1, y_2, y_3, y_4 . Значение переменных брались из фактически используемых элементов и измеренной нагрузки на них. Условия проведения опытов представлены в таблице.

Условия проведения опытов

Характеристика плана	$x_1, \text{Н}$	x_2	$x_3, \text{мм}$	$x_4, \text{мм}^2$	$x_5, \text{Н}$
Нижний уровень x_j^-	-10000	0	1	1	0
Верхний уровень x_j^+	10000	1	2	2	100
Нулевой уровень x_j^0	0	0,5	1,5	1,5	50
Интервал варьирования λ_j	10000	0,5	0,5	0,5	50

В таблице нулевые уровни находятся по формулам $x_j^0 = \frac{x_j^+ + x_j^-}{2}$, $j = \overline{1,5}$, а интервалы варьирования – по формулам $\lambda_j = \frac{x_j^+ - x_j^-}{2}$, $j = \overline{1,5}$.

После проведения опытов осуществлялось кодирование входных переменных по формулам $z_j = \frac{x_j - x_j^0}{\lambda_j}$, $j = \overline{1,5}$:

$$z_1 = \frac{x_1}{10000}, z_2 = \frac{x_2 - 0,5}{0,5}, z_3 = \frac{x_3 - 1,5}{0,5}, z_4 = \frac{x_4 - 1,5}{0,5}, z_5 = \frac{x_5 - 50}{50}.$$

При таком кодировании переменные z_j , $j = \overline{1,5}$ будут принимать значения «-1» на нижнем уровне, и «+1» – на верхнем.

После чего с помощью метода наименьших квадратов для каждой выходной переменной оценивалась регрессионная модель следующего вида:

$$y_i = b_0 + \sum_{j=1}^{15} b_j z_{ij} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1,32}, \quad (1)$$

где $z_6 = z_1 z_2$, $z_7 = z_1 z_3$, $z_8 = z_1 z_4$, $z_9 = z_1 z_5$, $z_{10} = z_2 z_3$, $z_{11} = z_2 z_4$, $z_{12} = z_2 z_5$, $z_{13} = z_3 z_4$, $z_{14} = z_3 z_5$, $z_{15} = z_4 z_5$ – взаимодействия переменных; b_0, b_1, \dots, b_{15} – неизвестные параметры; $\varepsilon_i, i = \overline{1, n}$ – ошибки аппроксимации. Для оценивания моделей (1) применялся эконометрический пакет Gretl [16].

Завершив оценивание, для каждой модели была реализована процедура исключения незначимых по t -критерию Стьюдента [16] коэффициентов при входных переменных. Уровень значимости α задавался равным 0,1. В результате были построены следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 = & 150,419 - 12,028 z_1 + 12,228 z_2 + 27,117 z_3 - 80,807 z_4 + 82,833 z_5 - \\ & - 12,028 z_9 - 19,582 z_{13} + 33,773 z_{14} - 60,291 z_{15}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_2 = & 120,075 + 29,21 z_1 + 20,233 z_2 + 20,537 z_3 - 61,611 z_4 + 68,117 z_5 - \\ & - 17,133 z_8 - 14,182 z_{13} + 29,77 z_{14} - 50,822 z_{15}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_3 = & -129,427 + 36,023 z_1 - 15,971 z_2 - 27,057 z_3 + 69,816 z_4 - 77,468 z_5 - \\ & - 11,752 z_8 + 13,956 z_9 + 19,03 z_{13} - 36,291 z_{14} + 59,027 z_{15}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_4 = & 33,177 + 25,563 z_3 - 27,155 z_4 + 32,762 z_5 - \\ & - 21,048 z_{13} + 25,484 z_{14} - 27,037 z_{15}. \end{aligned} \quad (5)$$

В моделях (2)–(5) в скобках под коэффициентами указаны наблюдаемые значения t -критерия Стьюдента, подтверждающие значимость переменных.

Значения коэффициентов детерминации R^2 моделей (2)–(5) равны 0,9604, 0,9410, 0,9541 и 0,9065 соответственно. Все эти значения, за исключением модели (5), довольно близки к единице, поэтому можно сделать вывод о достаточно высоком качестве построенных регрессий. Графики фактических и расчетных по моделям (2)–(5) значений выходных переменных в зависимости от номера опыта представлены на рис. 3.

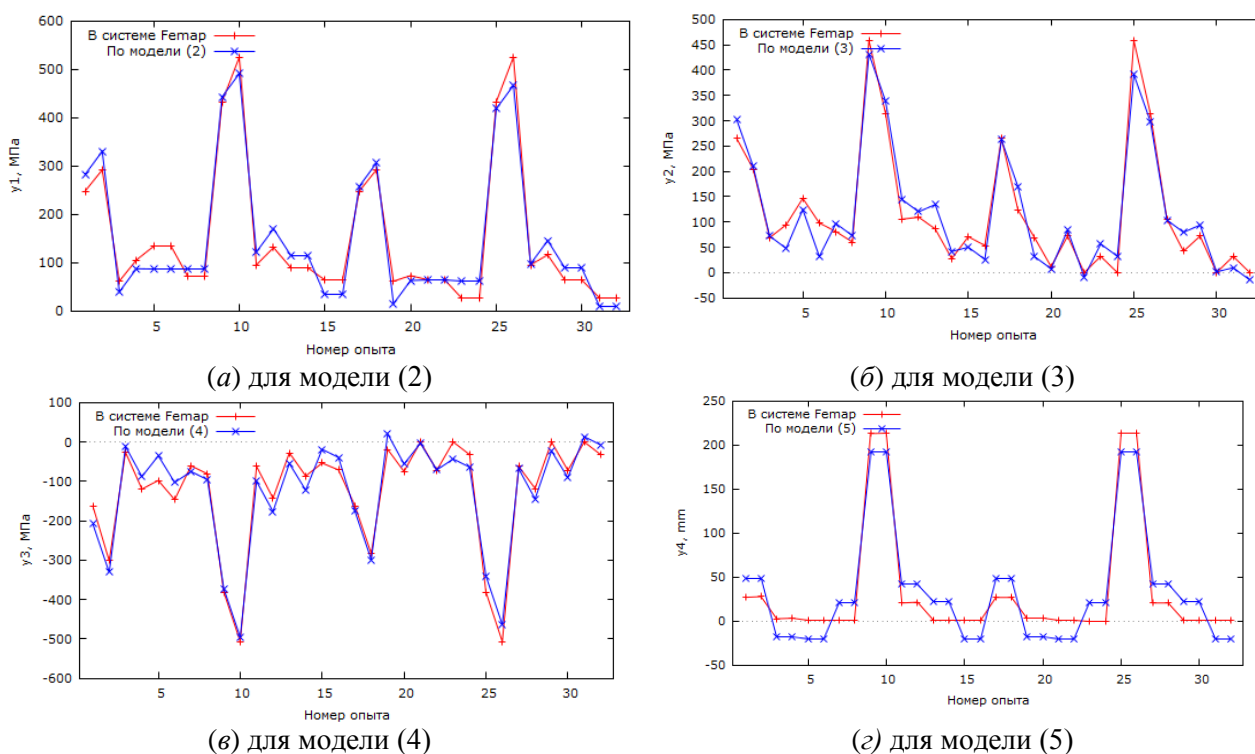


Рис. 3. Графики фактических и расчетных по моделям значений выходных переменных

Из рис. 3 видно, что расчетные по моделям значения выходных переменных практически совпадают с фактическими, полученными в системе Femar.

Заключение

В работе построены в достаточной мере точные математические модели (2)–(5) зависимости напряженно-деформированного состояния металлических опор контактной сети железных дорог от различных факторов. Достоинством построенных моделей является то, что, в отличие от расчетов с помощью Femar, в распоряжение исследователя поступают аналитические выражения, которые можно анализировать и с помощью которых можно мгновенно получить прогнозы напряженно-деформиро-

ванного состояния металлических опор в зависимости от входных величин. В связи с этим уменьшаются трудозатраты на проведение диагностики и отсутствует необходимость в моделировании каждого элемента и повреждения. Установлено, что во всех моделях наиболее сильное влияние на напряженно-деформированное состояние оказывает влияние дополнительной силы в поперечном направлении (x_5), площадь поперечного сечения стойки опоры (x_4), а также их взаимодействие (x_4x_5). Эти модели могут быть использованы в процессе диагностики для определения остаточного ресурса металлических опорных конструкций. Следующим этапом в исследовании будет разработка методики диагностики, основанная на построенных математических моделях зависимости напряженно-деформированного состояния. Модель, в свою очередь, может позволить перейти на систему обслуживания по фактическому техническому состоянию металлических конструкций контактной сети. Это позволит повысить безопасность и надежность движения поездов.

Список литературы

- 1 **Казakov, В. Г.** Планирование экспериментальных исследований и статистическая обработка данных. Основы научных исследований в промышленной теплоэнергетике / В. Г. Казakov, П. В. Луканин, Е. Н. Громова. – Санкт-Петербург : ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 95 с. – ISBN 978-5-91646-274-6.
- 2 **Гефан, Г. Д.** Основы теории эксперимента / Г. Д. Гефан, Н. К. Ширяева. – Иркутск : ИРГУПС, 2017. – 136 с. – EDN: YUPVHV.
- 3 **Богачков, И. М.** Математические модели расчета оптимального напряжения системы внешнего электроснабжения газовых месторождений, полученные с применением теории планирования эксперимента / И. М. Богачков // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 1(50). – С. 4–9. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-4-9.
- 4 Планирование эксперимента при исследовании загрязнения воздушной среды производственных помещений / Т. Н. Швецова-Шиловская, О. В. Полехина, Д. Е. Иванов, Ф. И. Скворцов // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25. – № 3. – С. 152–159. – DOI 10.25743/ICT.2020.25.3.016.
- 5 **Каминир, О. Н.** Исследование антиоксидантных свойств комплексного CO₂-экстракта методом математического планирования эксперимента / О. Н. Каминир, Г. И. Касьянов, О. В. Косенко // Биотехнологические, экологические и экономические аспекты создания безопасных продуктов питания специализированного назначения : материалы Международной научно-практической конференции, Краснодар, 22 мая 2020 г. – 2020. – С. 265. – ISBN 978-5-8333-0952-0.
- 6 **Соболь, А. Н.** Применение теории планирования эксперимента для анализа неисправностей автономных асинхронных генераторов гибридных электростанций / А. Н. Соболь, А. А. Андреева // The Scientific Heritage. – 2020. – № 53-1. – С. 57–63. – EDN EXNNGD.
- 7 **Каракаев, А. Б.** Разработка математической модели однофазного асинхронного электродвигателя для судовых систем автоматизации методами планирования эксперимента / А. Б. Каракаев,

References

- 1 **Kazakov, V. G.** Experimental research planning and statistical data processing. Fundamentals of scientific research in industrial thermal power engineering / V. G. Kazakov, P. V. Lukanin, E. N. Gromova. – Saint Petersburg : HSE SPbGUPTD, 2021. – 95 p. – ISBN 978-5-91646-274-6.
- 2 **Gefan, G. D.** Fundamentals of experimental theory / G. D. Gefan, N. K. Shiryayeva. – Irkutsk : ISTU, 2017. – 136 p. – EDN: YUPVHV.
- 3 **Bogachkov, I. M.** Mathematical Models for Calculating the Optimal Voltage of the External Electricity Supply System for Gas Fields Obtained Using the Experiment Planning Theory / I. M. Bogachkov // Electrotechnical systems and complexes. – 2021. – No. 1(50). – P. 4–9. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-4-9.
- 4 Planning an experiment in the study of air pollution in industrial premises / T. N. Shvetsova-Shilovskaya, O. V. Polekhina, D. E. Ivanov, F. I. Skvortsov // Computational Technologies. – 2020. – Vol. 25. – No. 3. – P. 152–159. – DOI 10.25743/ICT.2020.25.3.016.
- 5 **Kaminir, O. N.** Research of antioxidant properties of complex CO₂ extract by the method of mathematical experiment planning / O. N. Kaminir, G. I. Kasyanov, O. V. Kosenko // Biotechnological, ecological and economic aspects of creating safe food for specialized purposes: materials of the International Scientific and Practical Conference, Krasnodar, May 22, 2020. – 2020. – P. 265. – ISBN 978-5-8333-0952-0.
- 6 **Sobol, A. N.** Application of planning theory experiment for fault analysis autonomous asynchronous generators of hybrid power plants / A. N. Sobol, A. A. Andreeva // The Scientific Heritage. – 2020. – No. 53-1. – P. 57–63. – EDN EXNNGD.
- 7 **Karakayev, A. B.** Development of a mathematical model of a single-phase asynchronous electric motor for ship automation systems by methods of experiment planning / A. B. Karakayev,

А. В. Костенко // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – № 1. – С. 154–164. – DOI 10.34046/aumsuomt94/24.

8 **Полях, Д. М.** Применение метода планирования эксперимента для изучения некоторых факторов, влияющих на глубину реза при лазерной резке / Д. М. Полях, М. И. Шейх-Заде, И. Д. Сефедин // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2019. – № 2. – С. 267–270. – EDN ONEGQQ.

9 **Алексеева, П. В.** Разработка математической модели защитных потенциалов металлических подземных сооружений с учетом влияния электрифицированного железнодорожного транспорта / П. В. Алексеева, К. В. Авдеева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(88). – С. 239–246. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_239.

10 **Чирков, В. К.** Исследование случайного процесса тягового электропотребления / В. К. Чирков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1. – С. 169–173. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_169.

11 Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года («Белая книга» ОАО «РЖД») / ОАО «РЖД». – Москва, 2011. – 340 с.

12 **Селедцов, Э. П.** Эксплуатация опор контактной сети / Э. П. Селедцов, Е. А. Баранов. – Москва : Транспорт, 1970. – 96 с.

13 Определение остаточной несущей способности металлических опорных конструкций контактной сети / В. П. Ступицкий, И. А. Худонов, В. А. Тихомиров, О. В. Лобанов // Известия Транссиба / Омский государственный университет путей сообщения. – Омск. – 2019. – № 3(39). – С. 88–99. – EDN LTKJFW.

14 Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети № 1047/р / Департамент электрификации и электрообеспечения ОАО «РЖД». – Москва, 2022. – 116 с.

15 Расчет несущей способности металлической решетчатой опоры контактной сети при кручении верхней части методом конечных элементов в САПР Femap / В. П. Ступицкий, И. А. Худонов, В. А. Тихомиров, О. В. Лобанов // Транспорт Урала / Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург. – 2021. – № 1(68). – С. 99–102. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-99-102.

16 **Базилевский, М. П.** Эконометрика (продвинутый уровень) / М. П. Базилевский, Г. Д. Гефан. – Иркутск : ИрГУПС, 2016. – 76 с. – EDN YUPXML.

A. V. Kostenko // Operation of sea transport. – 2020. – No. 1. – P. 154–164. – DOI 10.34046/aumsuomt94/24.

8 **Poliakh, D. M.** Application of the method of experiment planning for studying some factors influencing machine cut depth at laser-beam cutting / D. M. Poliakh, M. I. Sheikh-Zade, I. D. Sefedin // Scientific Notes of the Crimean Engineering Pedagogical University. – 2019. – No. 2. – P. 267–270. – EDN ONEGQQ.

9 **Alekseeva, P. V.** Development of a mathematical model to maintain the protective potentials of metal underground structures taking into account the influence of the electrified railway transport / P. V. Alekseeva, K. V. Avdeeva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 4. – P. 239–246. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_4_239.

10 **Chirkov, V. K.** Study of random process traction electric consumption / V. K. Chirkov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1. – P. 169–173. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_169.

11 Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 ("White Book" of JSC "Russian Railways") / JSC "Russian Railways". – Moscow, 2011. – 340 p.

12 **Seledtsov, E. P.** Operation of overhead line supports / E. P. Seledtsov, E. A. Baranov. – Moscow : Transport, 1970. – 96 p.

13 Determination of residual bearing capacity of metal support structures of the contact network / V. P. Stupitsky, I. A. Khudonogov, V. A. Tikhomirov, O. V. Lobanov // Izvestiya Transsib / Omsk State University of Railways. – Omsk. – 2019. – No. 3(39). – P. 88–99. – EDN LTKJFW.

14 Instructions for maintenance and repair of support structures of the overhead line No. 1047/r / Department of Electrification and Power Supply of JSC "Russian Railways". – Moscow, 2022. – 116 p.

15 Calculation of bearing capacity of metal lattice catenary pole at torsion of the upper part by finite element method in Femap CAD / V. P. Stupitsky, I. A. Khudonogov, V. A. Tikhomirov, O. V. Lobanov / Transport of the Urals / Ural-Siberian State University. – Yekaterinburg. – 2021. – No. 1(68). – P. 99–102. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-99-102.

16 **Bazilevsky, M. P.** Econometrics (advanced level) / M. P. Bazilevsky, G. D. Gefan. – Irkutsk : ISTU, 2016. – 76 p. – EDN YUPXML.

L. A. Astrakhantsev, M. P. Bazilevsky, O. V. Lobanov, V. L. Stupitskiy

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF METAL SUPPORTS OF THE RAILWAY OVERHEAD LINE BY METHODS OF EXPERIMENTAL PLANNING THEORY

Abstract. The paper is devoted to the development of mathematical models of the stress-strain state of metal supports of the railway overhead line. The methods of the theory of experimental planning are used as a mathematical apparatus. The stress-strain state is characterized by the maximum Mises stress in the element, the maximum longitudinal normal compressed and stretched stress, and the deformation of the element. The input variables are the compressive/tensile force, the presence of damage on the element, its length and cross-sectional area, additional force in the transverse direction. A complete factorial experiment of 32 experiments was conducted. The experiments were carried out using the Femap finite element modeling software package. Based on the results of the experiments, four regression-type mathematical models were constructed using the Gretl econometric package. With their help, the factors that have the strongest influence on the stress-strain state have been identified.

Keywords: overhead line, supports, railway, stress-strain state, theory of experiment planning, mathematical model.

For citation: Development of mathematical models of the stress-strain state of metal supports of the railway overhead line by methods of experimental planning theory / L. A. Astrakhantsev, M. P. Bazilevsky, O. V. Lobanov, V. L. Stupitskiy // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 188–195. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_188.

Сведения об авторах

Астраханцев Леонид Алексеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроэнергетика транспорта»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Базилевский Михаил Павлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Математика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: mik2178@yandex.ru

Лобанов Олег Викторович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроэнергетика транспорта»,
аспирант,
e-mail: oleg.6965@mail.ru

Ступицкий Валерий Петрович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроэнергетика транспорта»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: dokasvp@mail.ru

Information about the authors

Astrakhantsev Leonid Alekseevich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electrical Power Industry of Transport»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Bazilevsky Mikhail Pavlovich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Mathematics»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: mik2178@yandex.ru

Lobanov Oleg Viktorovich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electrical Power Industry of Transport»,
Postgraduate Student,
e-mail: oleg.6965@mail.ru

Stupitskiy Valeriy Petrovich

Irkutsk State Transport University (ISTU),
Chair «Electrical Power Industry of Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associated Professor,
e-mail: dokasvp@mail.ru

Н. С. Почес, В. Н. Малышев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НОВЫХ КЕРАМОПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Аннотация. Работа посвящена исследованию новых керамополимерных покрытий, сформированных методом микродугового оксидирования (МДО), при трении в экологически безопасных смазочных материалах, в качестве которых использовали полиальфаолефин (ПАО), полиэтиленгликоль (ПЭГ) и диизотридецил адипат (ДИТА). Формирование покрытий производили в слабощелочном электролите с добавлением суспензии фторопласта при использовании циклического режима. Для улучшения прочности сцепления фторопласта с оксидной матрицей производили дополнительную термическую обработку. Полученные керамополимерные покрытия состоят из оксидной матрицы с внедренными в нее частицами фторопласта. Проведенные испытания показали, что новые керамополимерные покрытия имеют улучшенные триботехнические характеристики относительно традиционных МДО-покрытий при трении как по стали, так и по одноименной поверхности.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, керамополимерные покрытия, триботехнические характеристики, экологически безопасные смазочные материалы.

Для цитирования: Почес, Н. С. Исследование триботехнических характеристик новых керамополимерных покрытий в экологически безопасных смазочных материалах / Н. С. Почес, В. Н. Малышев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 196–203. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_196.

Введение

Современные экологические вызовы требуют комплексного подхода к разработке и производству машин и оборудования. Постоянное повышение нагрузок и скоростей в машинах и оборудовании является главным направлением развития техники и технологии. При этом существует запрос на снижение затрат энергии и ресурсов, вызванных потерями на трение и износ. Уменьшение габаритов конструкций неизбежно ведет к постоянному увеличению их удельной мощности. В связи с этим узлы трения работают в особо тяжелых условиях [1].

Большинству этих требований удовлетворяют керамические материалы. Однако ввиду сложности механической обработки и, как следствие, их повышенной стоимости применение конструкционной керамики в некоторых узлах трения нецелесообразно [2].

Альтернативой керамическим материалам является применение износостойких керамических покрытий. Одним из относительно новых и перспективных методов создания износостойких покрытий является микродуговое оксидирование (МДО), называемое также плазменно-электролитическим оксидированием (ПЭО). С помощью данного метода можно получать покрытия с широким набором свойств, включающих такие характеристики, как износо-, тепло-, коррозионностойкость, электроизоляция и др., что позволяет применять данную технологию в различных отраслях промышленности [3–5].

Структурно-фазовый состав слоев МДО-покрытий зависит от многих факторов: от параметров процесса (величин токов и напряжений, характера режимов проведения процесса), состава применяемого электролита. Модификация состава электролита входит в число наиболее перспективных и эффективных путей улучшения свойств покрытия. Одним из направлений исследования является добавление в электролит различных твердых частиц различной природы с целью внедрения и встраивания их в структуру покрытия или заполнения ими пор, что наделяет МДО-покрытия новыми функциональными возможностями [6].

Наиболее перспективным с практической точки зрения является добавление в электролит для микродугового оксидирования частиц фторопласта (политетрафторэтилена, ПТФЭ) ввиду его превосходных антифрикционных свойств. Фторопласт активно используют в качестве пропитки при изготовлении антифрикционных материалов на основе пористой металлокерамики [7]. Добавление фторопла-

ста в электролит для микродугового оксидирования открывает широкие возможности для формирования композиционных оксидополимерных покрытий, состоящих из каркаса оксидной матрицы, заполненного включениями частиц политетрафторэтилена.

Другим направлением в решении экологических вызовов является определение некоторых аспектов, влияющих на экосистему, и попытки уменьшения их влияния или полного устранения. В этой связи внимание привлекает производство и применение смазочных материалов, так как они оказывают существенное влияние на процессы трения и изнашивания в зоне трения.

К функциям смазочных материалов относятся снижение трения и изнашивания, а также увеличение нагрузочной способности пар трения. В отдельных случаях относительное движение двух трущихся поверхностей возможно только в присутствии смазочного материала. Кроме того, смазочный материал защищает трущиеся поверхности от коррозии и перегрева в зоне контакта [8].

Разработка смазочных материалов стала важнейшей частью совершенствования машинного оборудования и соответствующих технологий. Это сопряжено со многими областями знаний, в некоторых случаях междисциплинарных, не учитывая которые разработка и применение смазочных материалов не смогли бы быть успешными.

Ужесточение экологических норм и законов непосредственно касается и рынка смазочных материалов, поскольку их влияние на биосферу и человека весьма комплексно и определяется многими факторами, проявляясь на всех этапах – от производства до утилизации вторичного сырья. Поэтому современным решением в этой области является разработка и применение экологически безопасных смазочных материалов [9].

В связи с вышеперечисленным перспективным является создание износостойких покрытий методом микродугового оксидирования с последующим их применением с экологически безопасными смазочными материалами, что позволит получать современные пары трения с повышенными триботехническими характеристиками и незначительным влиянием на состояние окружающей среды.

Целью работы является исследование триботехнических характеристик новых керамополимерных покрытий в экологически безопасных смазочных материалах.

Основная часть

Образцы для испытаний были выполнены из алюминиевых сплавов Д16 и В95, которые для обеспечения плоскостности подвергались предварительной обработке, включавшей притирку образцов с помощью смеси порошка оксида алюминия и керосина на чугунной плите. После выполнения операции микродугового оксидирования производилась повторная притирка образцов с применением алмазной пасты АСМ 28/40 ПОСМ.

Для проведения испытаний формировались два типа покрытий: традиционное МДО-покрытие и новое керамополимерное покрытие.

Традиционные МДО-покрытия формировались в анодно-катодном режиме с применением электролита, включавшего щелочь (KOH) и жидкое стекло (Na_2SiO_3). Толщина сформированных МДО-покрытий составляла 130–140 мкм.

Формирование керамополимерных покрытий проводилось в электролите, содержащем щелочь (KOH) и гексаметафосфат натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$), а также смесь суспензии фторопласта (Ф-4Д) и пеногасителя (ПС-1). Процесс микродугового оксидирования производился преимущественно в анодно-катодном режиме с циклическим чередованием его с анодным. Чередование анодно-катодного и анодного режимов обусловлено необходимостью введения частиц фторопласта в структуру МДО-покрытия и распределения их не только в поверхностном слое, но и в толще самого покрытия для обеспечения сохранения антифрикционных свойств в процессе работы. При включении анодного режима частицы фторопласта обволакиваются глобулами ПАВ (часть суспензии Ф-4Д), которые имеют отрицательный заряд. Вследствие электрофореза происходит более активное движение обволаоченных частиц к поверхности обрабатываемой детали, при этом резко возрастает концентрация частиц фторопласта вблизи оксидируемой поверхности, что способствует встраиванию частиц фторопласта в структуру формируемого покрытия [10].

По окончании процесса микродугового оксидирования производилась термообработка сформированного МДО-покрытия с включениями частиц фторопласта при температуре 380–400 °С в течение 30 минут для увеличения адгезии частиц фторопласта в структуре покрытия и снижения общей пористости.

Полученные керамополимерные покрытия исследовались на металлографических шлифах, а также с помощью энергодисперсионной приставки для микроанализа EDAX TRIDENT XM4 электронного микроскопа.

Для оценки триботехнических характеристик новых керамополимерных покрытий были проведены испытания по схеме трения «кольцо – кольцо» с использованием машины трения МТ-393. В рамках данных исследований испытывали пары трения МДО-покрытий по стали ШХ15 и по одноименной поверхности – МДО по МДО.

В качестве образцов для данной схемы испытаний использовались:

- верхнее кольцо из алюминиевых сплавов, выбранных для исследования, размерами $\text{Ø}28 \times 18 \times 6$ мм;
- нижнее кольцо размером $\text{Ø}35 \times 22 \times 2,5$ мм из стали ШХ15 и кольцо с размерами $\text{Ø}35 \times 22 \times 8$ из алюминиевых сплавов, выбранных для исследования.

При испытании по схеме «кольцо – кольцо» нагрузка на образец составляла 700 Н, скорость вращения шпинделя 750 об/мин, время единичного цикла испытания 60 мин.

В качестве смазочной среды применялись базовые синтетические масла на основе полиэтиленгликоля (ПЭГ), полиальфаолефинов (ПАО), диизотридецил адипата (ДИТА).

Перед испытанием образцы подвергались чистке в ультразвуковой ванне в изопропанол и петролейном эфире (по 10 минут на каждый). Затем производилось контрольное взвешивание массы до испытаний. Те же операции выполнялись после испытаний.

По окончании испытаний проводилось определение:

- среднего коэффициента трения за все время испытаний и в течение отдельных интервалов времени с стандартным отклонением;
- величины весового износа образцов.

Толщина сформированных керамополимерных покрытий после притирки с алмазной пастой на алюминиевом сплаве Д16 составила 90 мкм, а на алюминиевом сплаве В95 – 100 мкм.

Металлографический анализ показал, что частицы фторопласта распределены по толщине покрытия сравнительно равномерно, не скапливаясь на поверхности (рис. 1).



Рис. 1. Строение керамополимерных покрытий (увеличение $\times 500$)

По данным исследования, в общей толщине покрытия участки фторопласта занимают 34 %. Средний диаметр участков фторопласта составил 36 мкм.

Подтверждением наличия включений фторопласта в толще МДО-покрытия являются результаты анализа химического состава с помощью энергодисперсионной приставки для микроанализа EDAX TRIDENT XM4 электронного микроскопа (рис. 2). Из этих данных следует, что частицы фторопласта встраиваются в структуру формируемого МДО-покрытия.

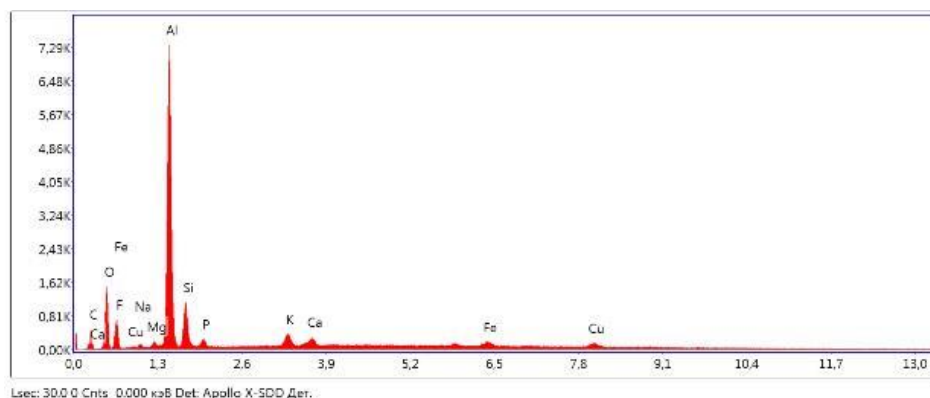


Рис. 2. Спектр участка керамополимерного МДО-покрытия

Сравнение результатов, полученных при испытании пар трения «МДО – сталь ШХ15», представлено на рис. 3.

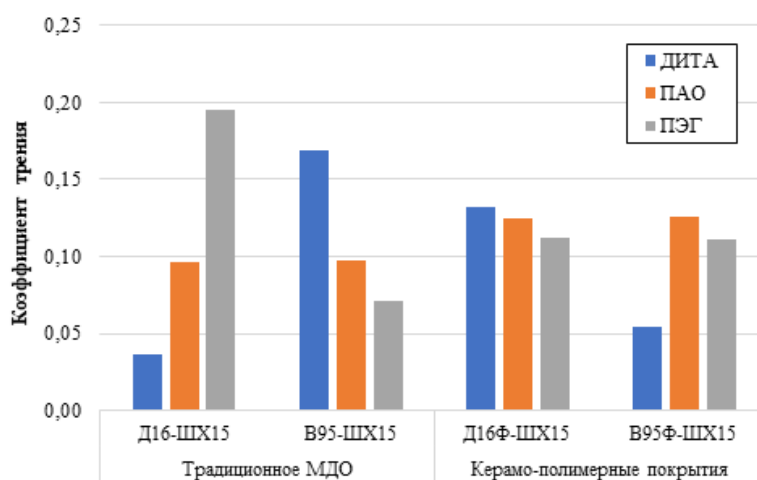


Рис. 3. Средние значения коэффициентов трения после триботехнических испытаний пар трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15»

Анализ полученных данных показывает, что пары трения с традиционными МДО-покрытиями на алюминиевом сплаве Д16 при трении в масле ДИТА показали лучшие значения коэффициента трения, среднее значение которого составило 0,036.

Худший результат по значениям коэффициента трения был получен в масле ПЭГ с покрытиями, сформированными на сплаве Д16, величина коэффициента трения составила 0,195.

Полученные значения коэффициентов трения в парах с керамополимерными покрытиями, сформированными на алюминиевом сплаве Д16 при испытании в масле ПЭГ и на алюминиевом сплаве В95 при испытании в масле ДИТА, имеют средние значения коэффициентов трения ниже на 115 % для покрытий на сплаве Д16 и на 221 % для покрытий на сплаве В95 по сравнению с традиционными МДО-покрытиями, а полученные значения составляют от 0,071 и от 0,055 соответственно.

Оценка износа производилась как для образцов с МДО-покрытием, так и стального контртела. Сравнение полученных значений массового износа представлено на рис. 4.

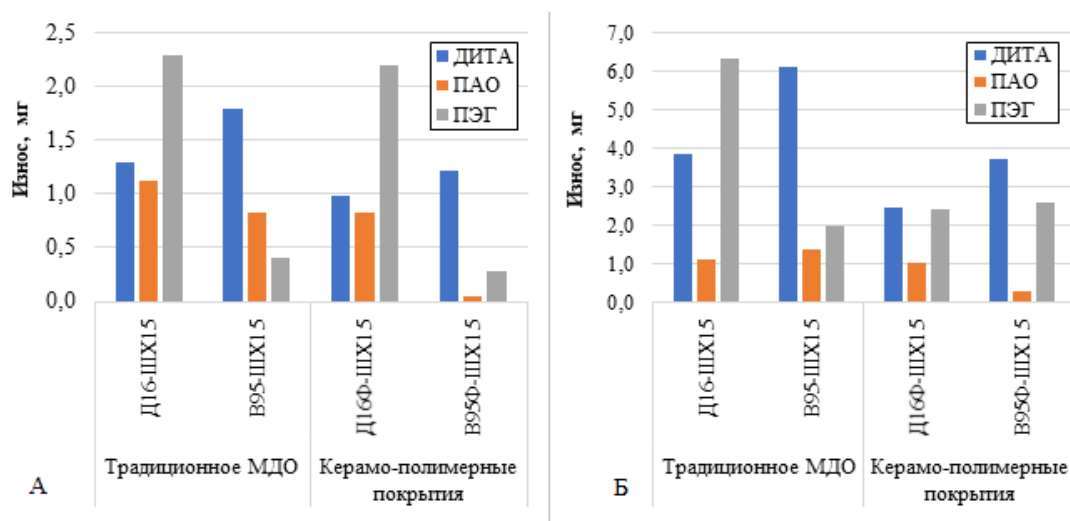


Рис. 4. Средние значения износа после испытаний в экологических маслах пар трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15»:

А – износ верхнего кольца (МДО-покрытие); *Б* – износ нижнего кольца (сталь ШХ15).

В общем случае керамополимерные покрытия показали лучшую износостойкость в сравнении с традиционными МДО-покрытиями. Наименьший износ был получен на керамополимерных покрытиях, сформированных на алюминиевом сплаве В95 в масле ПАО. Снижение износа в сравнении с традиционными МДО-покрытиями на этом же сплаве составило 129 %. В остальных случаях снижение износа керамополимерных покрытий относительно традиционных МДО-покрытий составило от 31,3 до 47,5 %. В то же время снижение износа стальных колец (контртел) в парах трения с керамополимерными покрытиями составило величину в диапазоне 57,1–623 %.

Сравнение средних значений коэффициента трения, полученных при испытании пар трения «МДО – МДО», приведено на рис. 5.

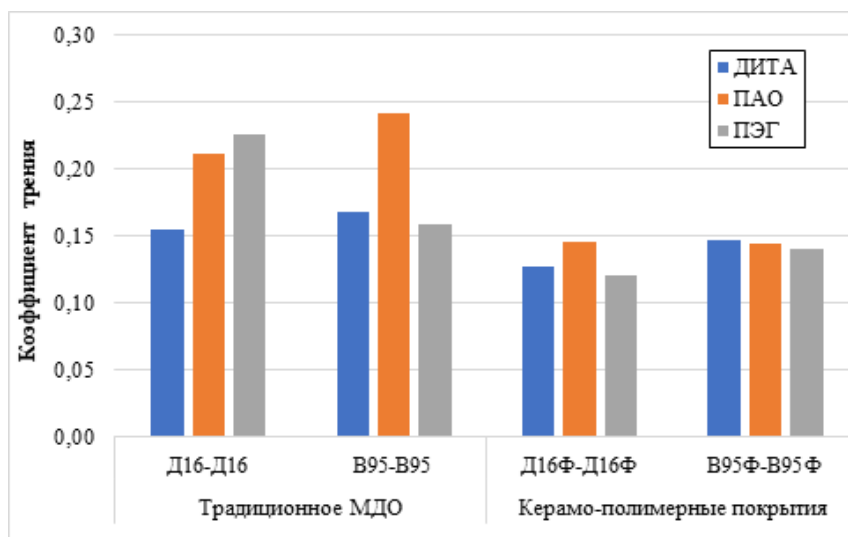


Рис. 5. Средние значения коэффициентов трения после испытаний в экологических маслах пар трения «МДО-покрытие – МДО-покрытие»

Из результатов следует, что пары трения с керамополимерным покрытием показали наименьшие значения коэффициента трения в масле ПЭГ. Для покрытий, сформированных на сплаве Д16, значение коэффициента трения составило 0,120, а для аналогичных покрытий на сплаве В95 это значение составило 0,140.

В масле ПАО керамополимерные покрытия также показали низкий коэффициент трения относительно традиционных МДО-покрытий, величина коэффициента трения составила 0,146 для покрытий, сформированных на сплаве Д16, для аналогичных покрытий на сплаве В95 – 0,144. В целом коэффициент трения керамополимерных покрытий ниже на 14,8–89,0 % по сравнению с коэффициентом трения для МДО-покрытий, полученных традиционным способом.

Полученные значения массового износа верхнего и нижнего колец после испытания пар трения «МДО-покрытие – МДО-покрытие» представлены на рис. 6.

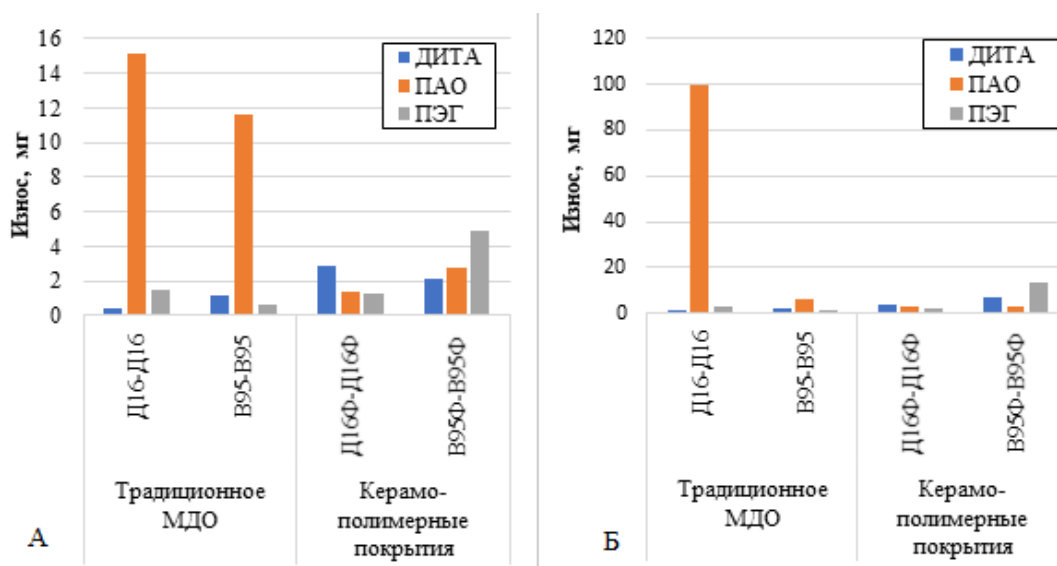


Рис. 6. Средние значения износа после испытаний в экологических маслах пар трения «МДО-покрытие – МДО-покрытие»:
А – износ верхнего кольца; *Б* – износ нижнего кольца.

Износ керамополимерных покрытий в целом находится на уровне традиционных МДО-покрытий. Так, в масле ПЭГ величина износа керамополимерного покрытия, сформированного на сплаве Д16, ниже на 58,6 % для нижнего кольца и на 86,7 % для верхнего кольца.

Самые высокие значения износа показали традиционные МДО-покрытия в масле ПАО. В этом случае произошло даже разрушение сформированного покрытия до материала подложки. Поскольку разрушение происходило практически сразу на старте испытания, то данное явление, по всей видимости, связано с большим значением молекулярной составляющей коэффициента трения в трибосистеме «МДО – масло ПАО – МДО», ввиду чего образуются высокие сдвиговые напряжения, разрушающие покрытие. В то же время керамополимерные покрытия в масле ПАО не были разрушены, что указывает на положительное влияние частиц фторопласта в покрытии.

Выводы

По результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

- 1 Использование метода формирования покрытий с циклическим режимом формирования способствует тому, что частицы фторопласта равномерно распределены по всей толщине керамополимерных покрытий.
- 2 Керамополимерные покрытия в парах трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15» показали снижение износа от 31 до 47,5 % при относительно равных значениях коэффициента трения (в сравнении с традиционными МДО-покрытиями).
- 3 Для пары трения, составленной из одноименной поверхности (МДО-покрытие – МДО-покрытие), в зависимости от применяемой смазки характерно снижение коэффициента трения от 14,8 до 89,0 %.

Список литературы

- 1 Елагина, О. Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учебное пособие / О. Ю. Елагина. – Москва : Логос, Университетская книга, 2009. – 488 с. – ISBN 978-5-98704-450-6.
- 2 Соколик, Ю. Н. Модифицированные керамические материалы и твердые сплавы для узлов трения, работающих в условиях ограниченной смазки / Ю. Н. Соколик, С. А. Вашарин,

References

- 1 Elagina, O. Yu. Technological methods for improving the wear resistance of machine parts : a textbook / O. Yu. Elagina. – Moscow : Logos, University book, 2009. – 488 p. – ISBN 978-5-98704-450-6.
- 2 Sokolik, Yu. N. Modified ceramic materials and hard alloys for friction units operating in conditions of limited lubrication / Yu. N. Sokolik,

С. Ю. Курочкин // Насосы. Турбины. Системы. – 2019. – № 3(32). – С. 43–54. – ISSN 2226-177X.

3 **Малышев, В. Н.** Трибология поверхностей, упрочненных микродуговым оксидированием. Износо-, коррозионно- и теплостойкие покрытия / В. Н. Малышев. – Москва : Palmarium Academic Publishing, 2012. – 410 с. – ISBN 978-3-8473-9597-3.

4 **Малышев, В. Н.** Модифицирование поверхностного слоя деталей методом микродугового оксидирования : состояние, возможности, перспективы / В. Н. Малышев // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2014. – № 1. – С. 5–20. – ISSN 2071-8152.

5 **Эпельфельд, А. В.** Технология и оборудование микродугового оксидирования / А. В. Эпельфельд // Квалификация и качество. – 2002. – № 4. – С. 33–37.

6 **Малышев, В. Н.** Исследование трения и изнашивания МДО-покрытий в условиях смазки базовыми маслами / В. Н. Малышев, Н. С. Почес // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18, № 5(209). – С. 232–236. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-5-232-236.

7 **Ганз, С. Н.** Антифрикционные химически стойкие материалы в машиностроении / С. Н. Ганз, В. Д. Пархоменко. – Москва : Машиностроение, 1965. – 148 с.

8 **Манг, Т.** Смазки. Производство, применение, свойства. Справочник / Т. Манг, У. Дрезель ; перевод с английского под редакцией В. М. Школьников. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : ЦОП «Профессия», 2015. – 944 с.

9 **Евдокимов, А. Ю.** Экологические аспекты химмотологии смазочных материалов / А. Ю. Евдокимов, И. Г. Фукс, И. Р. Облащикова. – Москва : ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. Губкина, 2001. – 198 с.

10 **Патент № 2787330 С1 РФ**, МПК C25D 11/02, C25D 15/00. Способ получения композиционных покрытий на вентильных металлах и их сплавах / В. Н. Малышев, Н. С. Почес. – № 2022127763 ; заявл. 26.10.2022 ; опублик. 09.01.2023, Бюл. № 1. – 12 с.

S. A. Vasharin, S. Yu. Kurochkin // Pumps. Turbines. Systems. – 2019. – No. 3(32). – P. 43–54. – ISSN 2226-177X.

3 **Malyshev, V. N.** Tribology of surfaces hardened by microarc oxidation. Wear-, corrosion- and heat-resistant coatings / V. N. Malyshev. – Moscow : Palmarium Academic Publishing, 2012. – 410 p. – ISBN 978-3-8473-9597-3.

4 **Malyshev, V. N.** Modification of the surface layer of parts by the method of microarc oxidation : state, possibilities, prospects / V. N. Malyshev // Quality management in the oil and gas complex. – 2014. – No. 1. – P. 5–20. – ISSN 2071-8152.

5 **Epelfeld, A. V.** Technology and equipment for microarc oxidation / A. V. Epelfeld // Qualification and quality. – 2002. – No. 4. – P. 33–37.

6 **Malyshev, V. N.** Study of friction and wear of MAO coatings under conditions of lubrication with base oils / V. N. Malyshev, N. S. Poches // Strengthening technologies and coatings. – 2022. – Vol. 18, No. 5(209). – P. 232–236. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-5-232-236.

7 **Ganz, S. N.** Antifriction chemically resistant materials in mechanical engineering / S. N. Ganz, V. D. Parkhomenko. – Moscow : Mashinostroenie, 1965. – 148 p.

8 **Mang, T.** Lubricants. Production, application, properties. Handbook / T. Mang, W. Drezel ; translated from English edited by V. M. Shkolnikov. – 2nd ed. – Saint Petersburg : TsOP “Professiya”, 2015. – 944 p.

9 **Evdokimov, A. Yu.** Ecological aspects of chemmotology of lubricants / A. Yu. Evdokimov, I. G. Fuchs, I. R. Olashchikov. – Moscow : State Unitary Enterprise Publishing House “Oil and Gas” of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2001. – 198 p.

10 **Patent RU2787330C1**. C25D 11/02, C25D 15/00. Method for obtaining composite coatings on valve metals and their alloys / V. N. Malyshev, N. S. Poches. – Application no. 2022127763; applied 21.10.2020 ; publ. 29.06.2021, Bull. No. 1. – 12 p.

N. S. Poches, V. N. Malyshev

STUDY OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF NEW CERAMIC-POLYMER COATINGS IN ENVIRONMENTALLY SAFE LUBRICANTS

Abstract. This work is devoted to the study of new ceramic-polymer coatings formed by microarc oxidation (MAO) method during friction in environmentally saved lubricants using polyalphaolefin (PAO), polyethylene glycol (PEG) and diisotridecyl adipate (DITA). The coatings were formed in a weakly alkaline electrolyte with the addition of a fluoroplastic suspension using a cyclic mode. To improve the adhesion strength of fluoroplastic to the oxide matrix, additional heat treatment was performed. The resulting ceramic-polymer coatings consist of an oxide matrix with fluoroplastic particles embedded in it. Tests have shown that new

ceramic-polymer coatings have improved tribological characteristics relative to traditional MAO coatings at the friction both to steel and to the eponymous surface.

Keywords: microarc oxidation, ceramic-polymer coatings, tribotechnical characteristics, environmentally safe lubricants.

For citation: Poches, N. S. Study of tribotechnical characteristics of new ceramic-polymer coatings in environmentally safe lubricants / N. S. Poches, V. N. Malyshev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 196–203. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_196.

Сведения об авторах

Почес Никита Сергеевич

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, кафедра «Трибология и технологии ремонта нефтегазового оборудования», ассистент, e-mail: nikitapoches@gmail.com

Малышев Владимир Николаевич

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, кафедра «Трибология и технологии ремонта нефтегазового оборудования», доктор технических наук, профессор, e-mail: vmal@inbox.ru

Information about the authors

Poches Nikita Sergeevich

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Chair «Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment», Lecture, e-mail: nikitapoches@gmail.com

Malyshev Vladimir Nikolaevich

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Chair «Tribology and Repair Technologies of Oil and Gas Equipment», Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: vmal@inbox.ru

А. В. Харитонов, Е. К. Рыбников

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В УЗЛЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СВЯЗИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ И РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ГИДРОБЛОКА С ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЙ УПРУГО-ВЯЗКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Аннотация. Рассмотрена возможность применения в узле связи буксового рычага с рамой тележки скоростного электропоезда гидроблока, имеющего частотно-зависимую характеристику радиальной горизонтальной жесткости. Конструкция гидроблока позволяет комбинировать низкие значения продольной жесткости при движении в кривых участках пути с высокими значениями продольной жесткости, необходимыми для устойчивости движения с высокой скоростью. С увеличением скорости движения железнодорожного экипажа частота горизонтальных колебаний колесной пары увеличивается, что приводит к возрастанию динамической жесткости гидроблока и обеспечению высокой критической скорости экипажа. Движение в кривых участках пути, напротив, осуществляется с меньшими скоростями движения и частотами колебаний колесной пары. Подбор оптимальных параметров гидроблока позволяет обеспечить как высокий запас устойчивости, так и уменьшение угла набегания колесной пары при движении в кривых участках пути и, как следствие, снижение износа поверхностей колеса и рельса.

Ключевые слова: математическое моделирование, гидроблок, скоростной электропоезд, динамическая жесткость, универсальный механизм.

Для цитирования: Харитонов, А. В. Возможность применения в узле горизонтальной связи колесной пары и рамы тележки гидроблока с частотно-зависимой упруго-вязкой характеристикой / А. В. Харитонов, Е. К. Рыбников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 204–214. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_204.

Введение

Подсистема «колесная пара – рельсовая колея» является автономной колебательной системой за счет положительной связи между координатами бокового отхода (y) и поворота (φ^z) вокруг оси Z (извилистое движение). Частота и длина волны гармонических горизонтальных колебаний отхода и виляния колесной пары в режиме качения без проскальзывания описываются следующими выражениями [1, 2]:

$$f_{\text{кп}} = \frac{V}{2\pi} \sqrt{\frac{i}{r_0 \cdot S}},$$

$$L_{\text{кп}} = 2\pi \sqrt{\frac{r_0 \cdot S}{i}},$$

где $f_{\text{кп}}$ – частота синусоидальных колебаний колесной пары, Гц;

V – поступательная скорость движения, м/с;

i – угол конической поверхности катания колеса (конусность);

r_0 – радиус основного круга катания колесной пары при ее центральной установке в колею, м;

S – половина расстояния между кругами катания колесной пары, м;

$L_{\text{кп}}$ – длина волны виляния колесной пары, м.

В связи с вышеизложенным колебания колесной пары имеют постоянную собственную длину волны, значение которой задается величинами конусности поверхностей катания колес, шириной колесной колеи и радиусом поверхностей катания колес. Собственная частота колебаний этой системы зависит от скорости поступательного движения и увеличивается по мере её роста.

Движение по прямому участку пути осуществляется с высокими скоростями, соответственно колебания колесной пары будут характеризоваться высокими частотами. Движение в кривых участках пути, напротив, осуществляется с меньшими скоростями движения, определяемыми радиусом кривой и возвышением наружного рельса. Таким образом, целесообразной является конструкция продольной

связи колесной пары и рамы тележки, обеспечивающая частотно-зависимую характеристику упруго-диссипативных параметров, а именно, низкие значения жесткости в области низких частот и высокие значения жесткости при высоких частотах возмущения. Это позволит преодолеть конфликт между высокой устойчивостью и характеристиками движения в кривой, настроить первичную подвеску под конкретные нужды каждого участка пути.

Наибольшее распространение получила конструкция упругой связи колесной пары и рамы тележки через резинометаллический шарнир – сайлентблок [3]. Данный шарнир представляет собой классический элемент из стали и резины с линейной жесткостью. При быстром или медленном сжатии результирующая жесткость сайлентблока такого типа остается практически одинаковой и на различных сериях электропоездов может варьироваться в достаточно широких пределах от 10 до 54 МН/м на одну буксу. Передача тяговых усилий в данной конструкции осуществляется через односторонний поводок (рычаг). Основным преимуществом конструкции с односторонне расположенным поводком является возможность поворота букс с колесной парой вокруг оси Z , что способствует уменьшению угла набегания при прохождении кривых участков пути.

Для достижения наилучших характеристик движения в кривой и высокой устойчивости в прямых участках пути возможно применение в узле связи колесной пары и рамы тележки гидроблока (рис. 1) с частотно-зависимой характеристикой радиальной горизонтальной жесткости [4]. Данное явление достигается за счет добавления в классическую конструкцию резинометаллического шарнира внутренних камер, заполненных гидравлической жидкостью. Соединение этих камер через канал, служащий регулятором потока, добавляет в узел функцию демпфера. Радиальная горизонтальная жесткость узла становится чувствительной к скорости, с которой жидкость перетекает из одной камеры в другую (отсюда возникает явление частотно-зависимой радиальной жесткости). В области низких частот возмущения радиальную жесткость гидроблока определяет эластомерный упругий элемент, а перетекающая из одной полости в другую гидравлическая жидкость не препятствует деформациям упругого элемента (рис. 2, *а*). Высокочастотное возбуждение блокирует перетекание жидкости между камерами, из-за чего итоговая радиальная горизонтальная жесткость возрастает (рис. 2, *б*). Вышеуказанная конструкция гидроблока реализована компанией Bruno MeierSchwab Schwebungstechnik AG, Адлисвилль (Швейцария) [5].

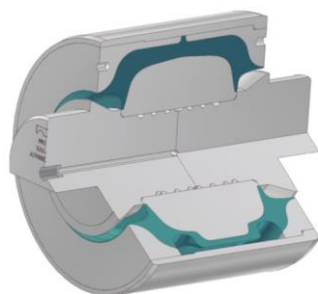


Рис. 1. Общий вид гидроблока

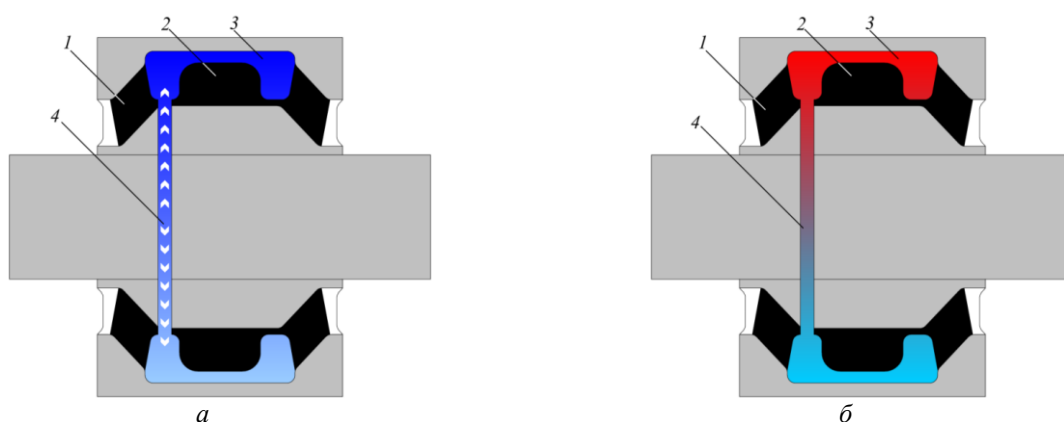


Рис. 2. Принцип работы гидроблока при низкочастотном возбуждении (*а*) и при высокочастотном возбуждении (*б*):

1 – эластомерный упругий элемент; 2 – упругий ограничитель деформации;
3 – камера с гидравлической жидкостью; 4 – соединительный канал

Таким образом, целью данной работы является численное исследование узла связи колесной пары и рамы тележки в виде гидроблока с частотно-зависимой радиальной жесткостью и обоснование эффективности его применения на подвижном составе.

Основная часть

Математическое описание поведения данного элемента соответствует расчетной схеме, представленной на рис. 3. Схема представляет собой параллельное соединение упругого элемента и элемента Максвелла (последовательное соединение жесткости и диссипации). Подобная математическая модель рассматривается авторами в работе [6] в качестве упруго-защищенного гидравлического гасителя колебаний в 1-й ступени рессорного подвешивания электровозов.

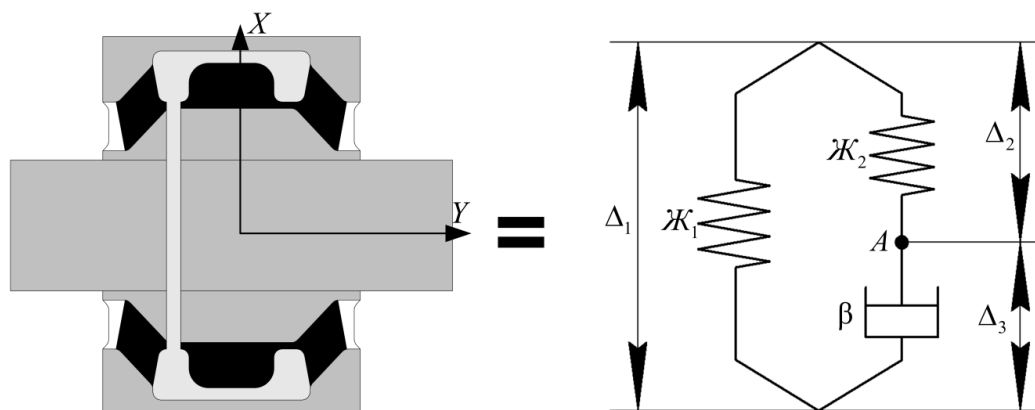


Рис. 3. Расчетная схема для моделирования работы гидроблока

Составим систему дифференциальных уравнений, позволяющую определить суммарную силу F_{Σ} , возникающую в узле, используя подходы, примененные при выводе формул для параллельного и последовательного соединения пружин, а также расчетную схему на рис. 3. Сила F_{Σ} определяется как сумма упругой силы $F_{y1} = \mathcal{K}_1 \cdot \Delta_1$ и диссипативной силы $F_{д3} = \beta \cdot \dot{\Delta}_3$.

$$F_{\Sigma} = F_{y1} + F_{д3} = \mathcal{K}_1 \cdot \Delta_1 + \beta \cdot \dot{\Delta}_3, \quad (1)$$

где Δ_1 – перемещение между верхней и нижней точками схемы, м;
 $\dot{\Delta}_3$ – скорость перемещения между нижней точкой схемы и точкой A, м/с;
 \mathcal{K}_1 – жесткость первого упругого элемента, кН/м;
 β – коэффициент демпфирования диссипативного элемента, кНс/м.

В выражении (1) неизвестна величина $\dot{\Delta}_3$, можно выразить ее из следующего условия:

$$F_{y2} = F_{д3} = \mathcal{K}_2 \cdot \Delta_2 = \beta \cdot \dot{\Delta}_3,$$

где Δ_2 – перемещение между верхней точкой схемы и точкой A, м;
 \mathcal{K}_2 – жесткость второго упругого элемента, кН/м.

Деформацию упругого элемента Δ_2 можно вычислить, используя следующее выражение:

$$\Delta_1 = \Delta_2 + \Delta_3,$$

Δ_3 – перемещение между нижней точкой схемы и точкой A, м.

Запишем систему уравнений, решая которую можно найти силу F_{Σ} :

$$\begin{cases} F_{\Sigma} = \mathcal{K}_1 \cdot \Delta_1 + \beta \cdot \dot{\Delta}_3, \\ \mathcal{K}_2 \cdot \Delta_2 = \beta \cdot \dot{\Delta}_3, \\ \Delta_1 = \Delta_2 + \Delta_3. \end{cases} \quad (2)$$

Упругие и диссипативные свойства такого комплекта можно найти на основе рассмотрения выражения эквивалентной динамической жесткости $\mathcal{K}_{\text{дин}}(j\omega)$, которую можно вычислить при решении системы уравнений (2) в частотной области по следующему выражению:

$$\mathcal{K}_{\text{дин}}(j\omega) = \mathcal{K}_1 + \frac{j\omega\beta \cdot \mathcal{K}_2}{j\omega\beta + \mathcal{K}_2}. \quad (3)$$

Для исследований в настоящей работе были приняты три комбинации параметров гидроблока, входящих в выражение (3), согласно реальным реализованным характеристикам гидроблока, а именно:

- 1) $\mathcal{K}_1 = 3100$ кН/м, $\mathcal{K}_2 = 26900$ кН/м, $\beta = 2400$ кН/м;
- 2) $\mathcal{K}_1 = 3700$ кН/м, $\mathcal{K}_2 = 31300$ кН/м, $\beta = 4000$ кН/м;
- 3) $\mathcal{K}_1 = 4400$ кН/м, $\mathcal{K}_2 = 35600$ кН/м, $\beta = 5000$ кН/м.

Согласно принятым упруго-диссипативным параметрам были построены зависимости упругой и диссипативной составляющих динамической жесткости гидроблока в зависимости от частоты возмущения (рис. 4).

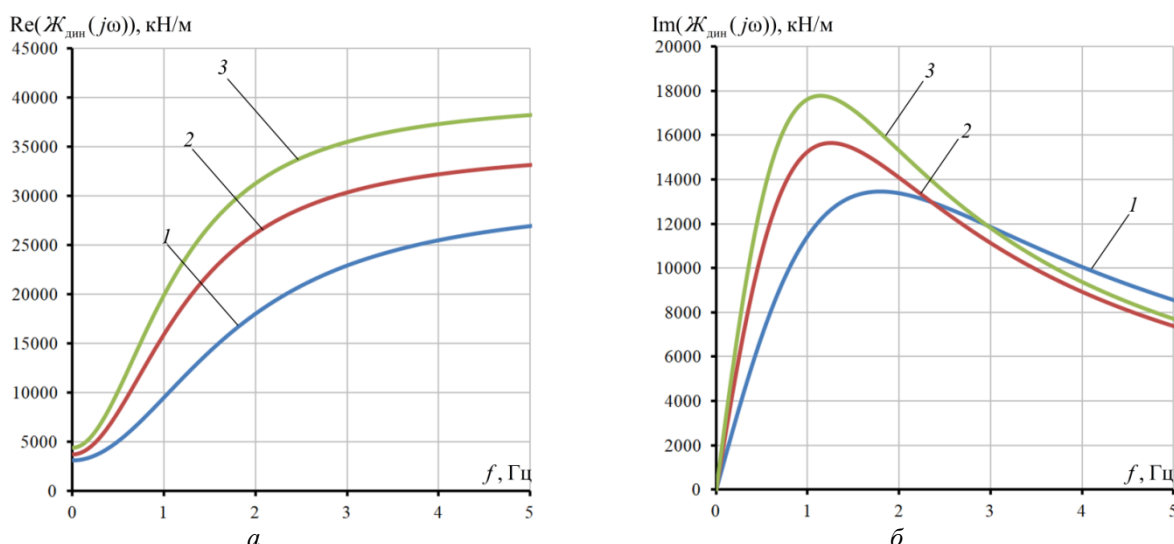


Рис. 4. Упругая составляющая динамической жесткости модели гидроблока (а) и диссипативная составляющая динамической жесткости модели гидроблока (б):

1 – при первой комбинации параметров; 2 – при второй комбинации параметров;
3 – при третьей комбинации параметров

Графики динамической жесткости гидроблока в зависимости от частоты при принятых значениях жесткостей показывают, что вещественная составляющая динамической жесткости (рис. 4, а) плавно увеличивается с ростом частоты, а мнимая составляющая этой жесткости (рис. 4, б) плавно изменяется от нуля до максимального значения, а затем уменьшается снова до нуля.

Для численного исследования эффективности гидроблока с частотно-зависимой упруго-диссипативной характеристикой в качестве узла связи колесной пары и рамы тележки была использована модель моторного вагона скоростного электропоезда в программном комплексе «Универсальный механизм» (УМ), которая была ранее разработана и верифицирована автором статьи в работе [7]. Массово-инерционные и упруго-диссипативные параметры модели вагона электропоезда соответствуют одному из вариантов скоростного электропоезда ЭВС1 на 250 км/ч с коммерческим названием «Сапсан».

В данную модель электропоезда в 1-й ступени рессорного подвешивания (рис. 5) в продольном направлении, параллельно существующему упругому элементу, был добавлен элемент Максвелла – упруго-диссипативный элемент [8], в соответствии с расчетной схемой рассматриваемого узла (рис. 3). Жесткости связи колесной пары и рамы тележки по остальным направлениям остались без изменений (поперечная жесткость связи составляет 5000 кН/м).

На первом этапе исследовалась устойчивость движения экипажа с гидроблоком в 1-й ступени рессорного подвешивания. Для расчета критической скорости экипажа использовался модуль «Многовариантные расчеты», реализованный в УМ. При этом задается выборка исследуемых скоростей движения и контролируемые переменные – поперечные перемещения колесных пар. В результате расчета строится зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) поперечных перемещений колесных пар от заданных скоростей движения [9].

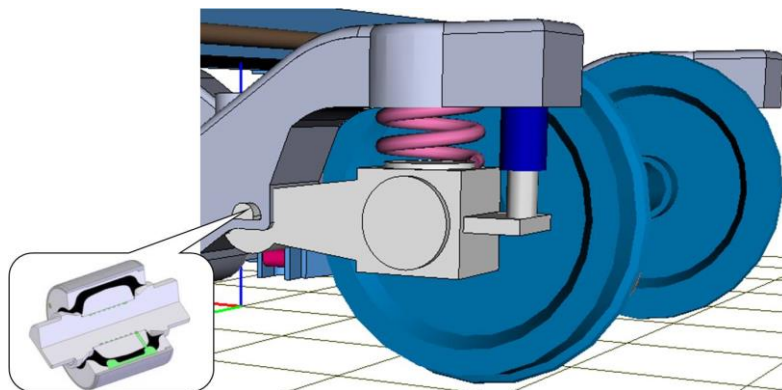


Рис. 5. Общий вид модели 1-й ступени рессорного подвешивания с гидроблоком в УМ

На рис. 6 видно, что критическая скорость экипажа для трех комбинаций параметров узла связи составила примерно 370 км/ч. Из этого можно сделать вывод, что гидроблок с принятыми параметрами обеспечивает устойчивость на высоких скоростях, аналогичную существующей конструкции связи колесной пары и рамы тележки электропоезда без гидроблока.

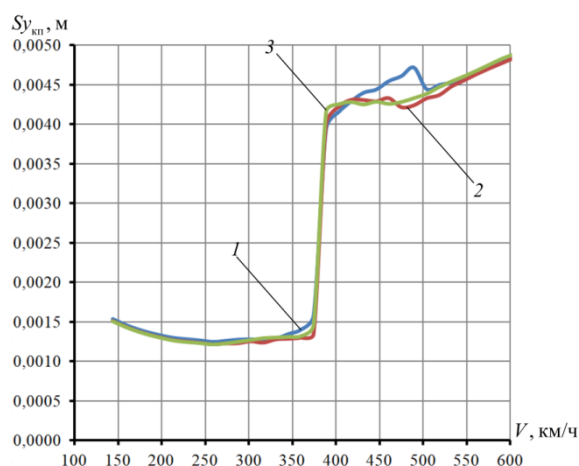


Рис. 6. Результаты исследования устойчивости движения:
1 – при первой комбинации параметров; 2 – при второй комбинации параметров;
3 – при третьей комбинации параметров

Далее получены зависимости от скорости движения средних значений абсолютных максимумов случайных процессов колебаний виляния первой колесной пары модели моторного вагона с гидроблоком и модели моторного вагона электропоезда без гидроблока (рис. 7). Очевидно, что при меньшей продольной жесткости узла связи колесной пары и рамы тележки колесная пара будет вилять интенсивней и с большей амплитудой. В модели электропоезда без гидроблока значение линейной продольной жесткости принималось равным 54000 кН/м, что значительно выше, чем значения динамической продольной жесткости гидроблока при соответствующих скоростях движения.

Для оценки эффективности применения гидроблока исследовалось движение в кривой с радиусом $R = 650$ м, возвышением наружного рельса $h_p = 120$ мм с постоянными скоростями движения 40, 60 и 80 км/ч. Оценивались реализации случайных процессов боковых сил Y_6 , действующих в точках контакта колеса и рельса, угла набегания колесных пар $\gamma_{кп}$, а также показателя износа T_γ .

Угол набегания – это угол между осью набегающей колесной пары и нормалью к кривой в точке набегания. Угол набегания является одним из показателей, характеризующих степень износа поверхности катания колесной пары при движении в кривых участках пути. Чем меньше угол набегания, тем в большей степени колесная пара занимает радиальное положение в кривой, в идеальном случае, когда колесная пара занимает радиальное положение, $\gamma_{\text{кп}} = 0$. Близкого к нулю значения угла набегания возможно достичь за счет применения одноосных тележек либо за счет применения специальных механизмов рулевого управления колесной парой (РУКП).

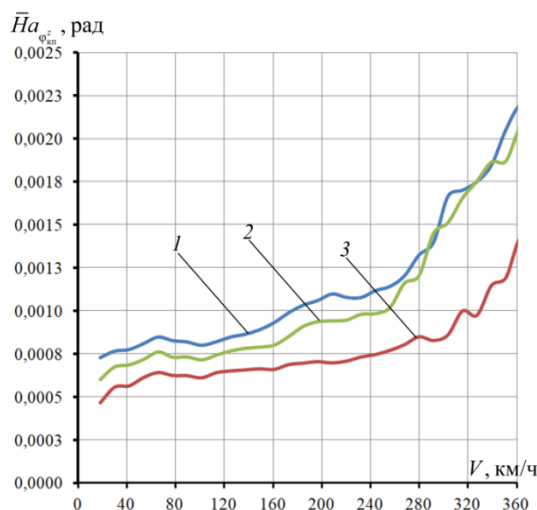


Рис. 7. Зависимость от скорости движения средних значений абсолютных максимумов случайного процесса колебаний виляния первой колесной пары при движении по прямой:

1 – при первой комбинации параметров; 2 – при третьей комбинации параметров;

3 – конструкция электропоезда-прототипа

Износ колёс рельсового экипажа можно оценить путём анализа изменения показателя износа T_γ , который является встроенной переменной в УМ [10]. Параметр T_γ представляет собой рассеянную энергию между колесом и рельсом на пройденный метр пути и выражается в джоулях на метр или в ньютонах. T_γ определяется произведением касательной силы (силы Крипа) и относительной скорости скольжения в точке контакта колеса по следующей формуле:

$$T_\gamma = T_x \xi_x + T_y \xi_y,$$

где T_x, T_y – продольная, поперечная касательные силы Крипа в точке контакта колеса и рельса;

ξ_x, ξ_y – продольная, поперечная относительные скорости скольжения в точке контакта колеса и рельса соответственно.

Сравнение реализаций случайных процессов при принятых параметрах для двух моделей экипажей при движении в кривой с $R = 650$ м представлены на рис. 8–11. Согласно рис. 8–9 боковые силы экипажа без гидроблока выше, чем у электропоезда, оборудованного гидроблоком, примерно на 13–37 % в зависимости от скорости движения. Также, согласно рис. 10, наблюдается уменьшение угла набегания колесной пары, что свидетельствует о приближении колесной пары к радиальной установке по колее. Помимо этого, наблюдается значительное снижение показателя износа (рис. 11), примерно на 35–45 %.

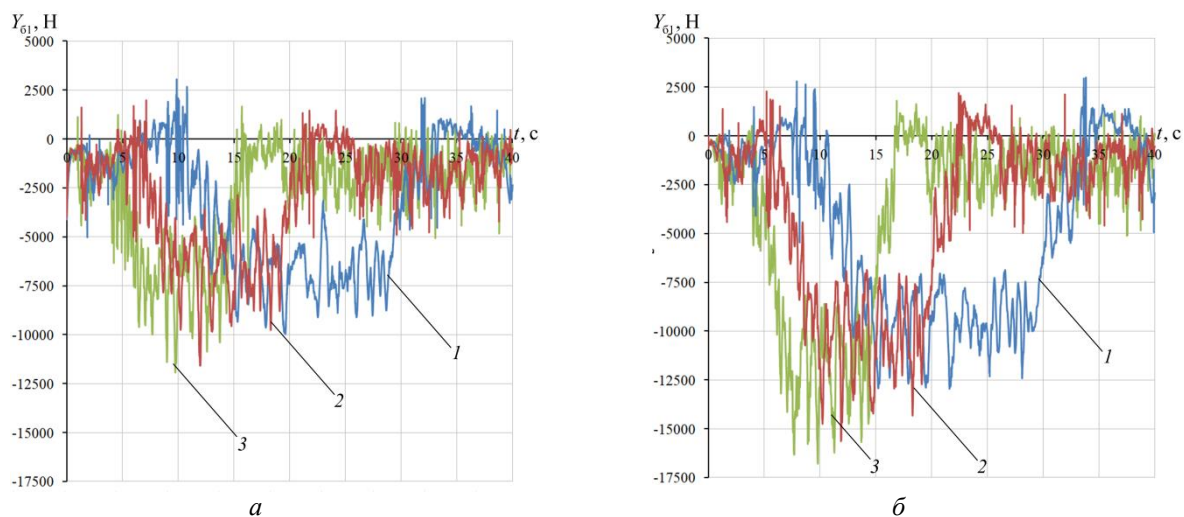


Рис. 8. Изменение боковой силы первой колесной пары, действующей на наружный рельс моторного вагона с гидроблоком (а) и моторного вагона без гидроблока (б):
1 – $V = 40$ км/ч; 2 – $V = 60$ км/ч; 3 – $V = 80$ км/ч

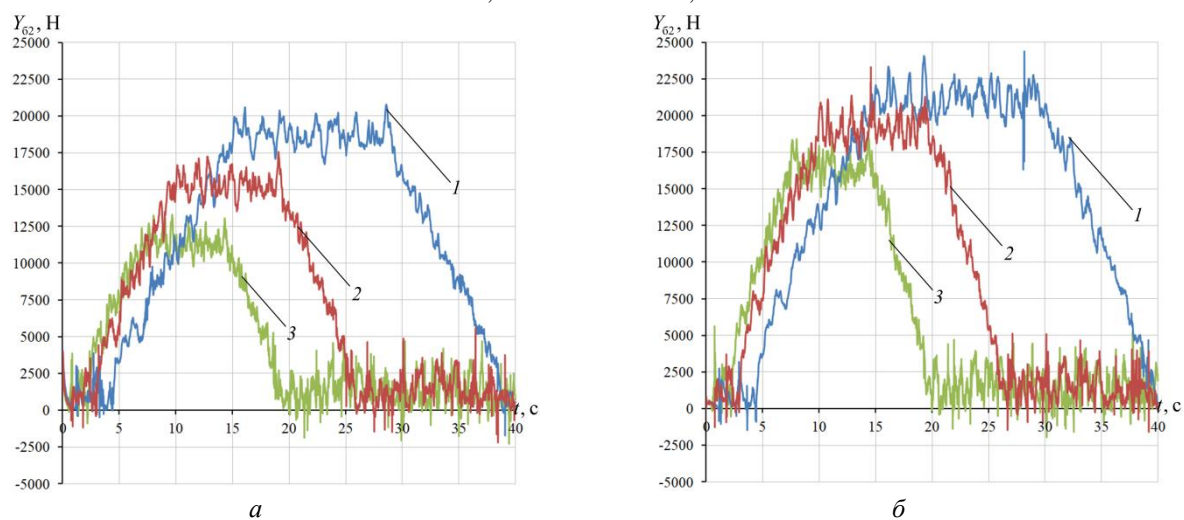


Рис. 9. Изменение боковой силы первой колесной пары, действующей на внутренний рельс моторного вагона с гидроблоком (а) и моторного вагона без гидроблока (б):
1 – $V = 40$ км/ч; 2 – $V = 60$ км/ч; 3 – $V = 80$ км/ч

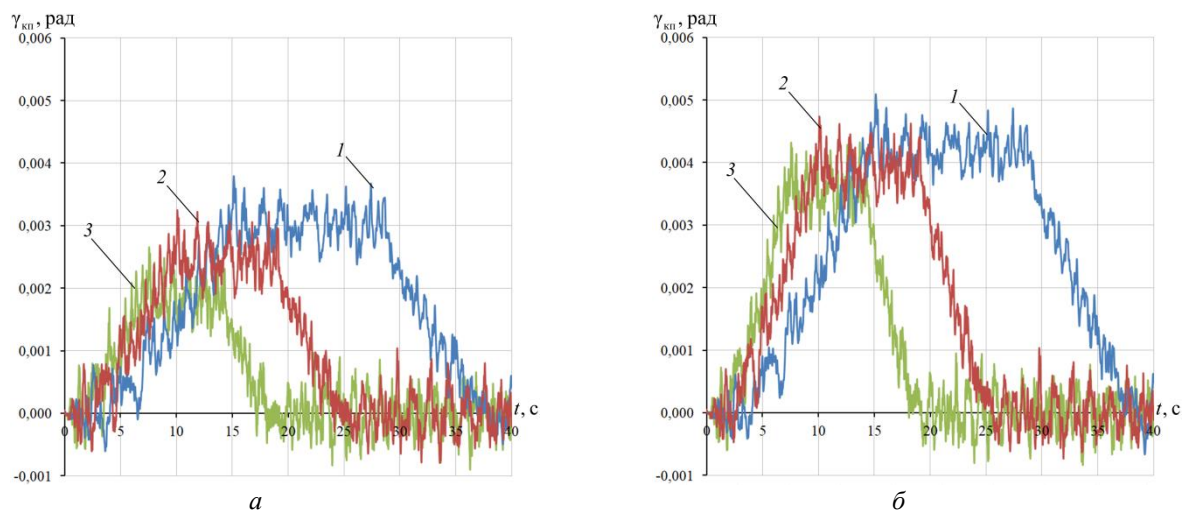


Рис. 10. Изменение угла набегания первой колесной пары моторного вагона с гидроблоком (а) и моторного вагона без гидроблока (б):
1 – $V = 40$ км/ч; 2 – $V = 60$ км/ч; 3 – $V = 80$ км/ч

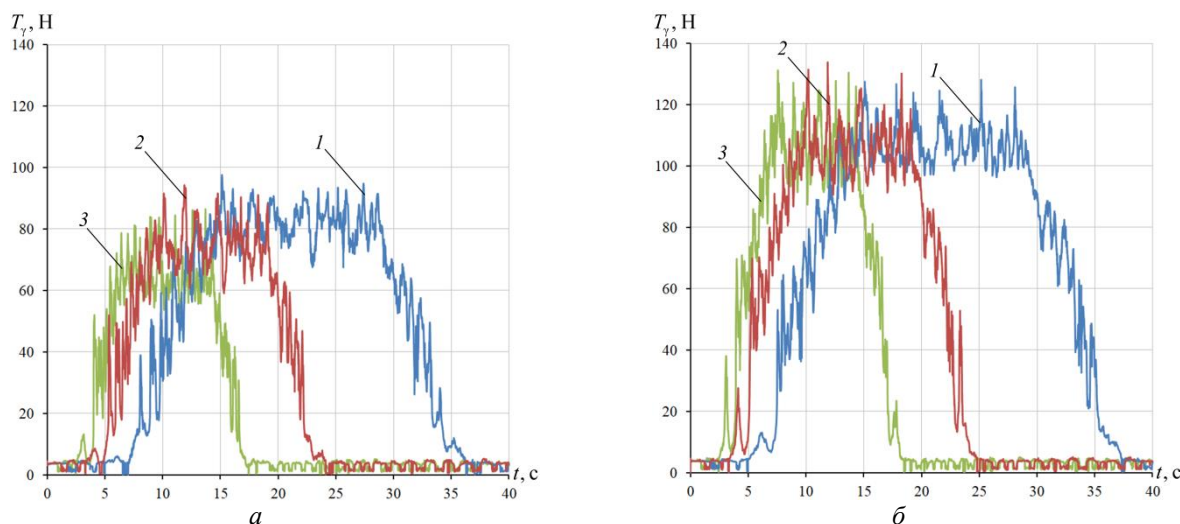


Рис. 11. Изменение показателя износа первой колесной пары моторного вагона с гидроблоком (а) и моторного вагона без гидроблока (б):
 1 – $V = 40$ км/ч; 2 – $V = 60$ км/ч; 3 – $V = 80$ км/ч

Для скоростных и высокоскоростных магистралей кривые участки пути выполняются с большим радиусом. Поэтому выполнено исследование движения экипажа в кривой с радиусом $R = 1500$ м, возвышением наружного рельса $h_p = 140$ мм с постоянной скоростью движения 150 км/ч. Оценивались средние значения абсолютных максимумов случайных процессов вышерассмотренных параметров, сравнение для двух экипажей приведено в виде диаграмм на рис. 12–13.

Как видно на рис. 12, боковая сила, действующая на внутренний рельс, ниже на 34 % у экипажа с гидроблоком. Согласно рис. 13, а, углы набегания колесных пар рассматриваемых моделей экипажей практически равны. Согласно рис. 13, б, показатель износа колесной пары ниже у экипажа с гидроблоком на 39 % относительно экипажа без гидроблока. Таким образом, можно сделать вывод, что применение гидроблока в 1-й ступени рессорного подвешивания показывает свою эффективность как в кривых малого радиуса, так и большого радиуса.

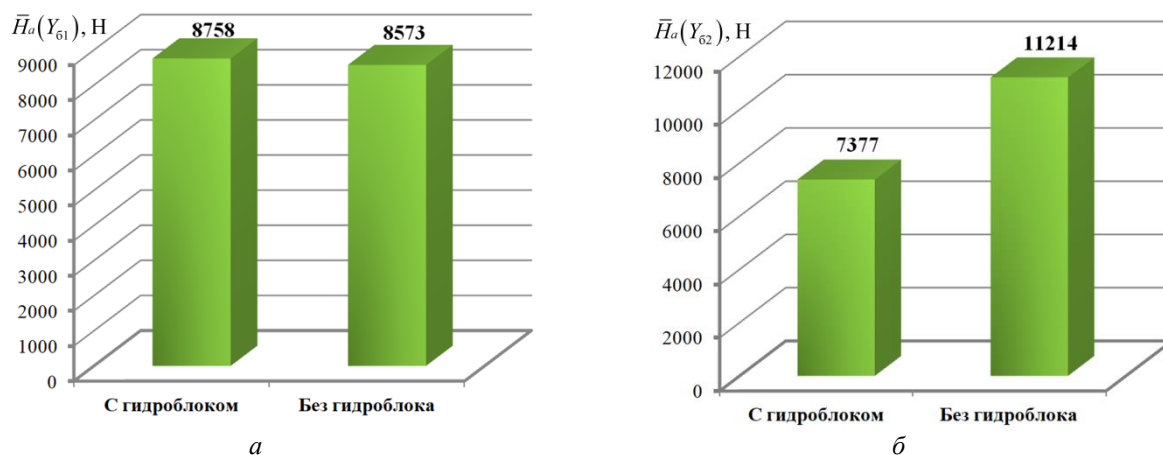


Рис. 12. Среднее значение абсолютных максимумов случайного процесса боковой силы первой колесной пары, действующей на наружный рельс (а) и действующей на внутренний рельс (б) при движении в кривой с $R = 1500$ м и $V = 150$ км/ч

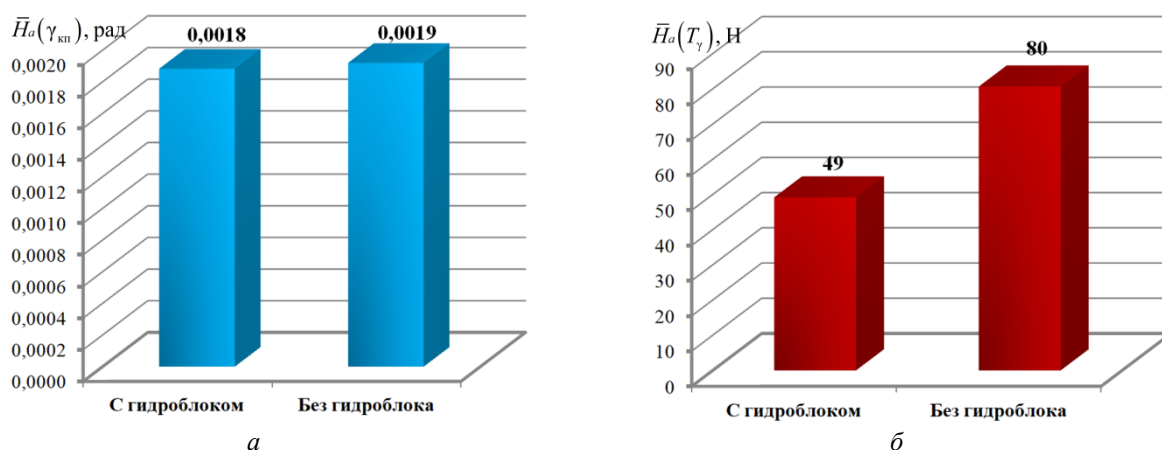


Рис. 13. Среднее значение абсолютных максимумов случайного процесса угла набегания (а) и показателя износа (б) первой колесной пары при движении в кривой с $R = 1500$ м и $V = 150$ км/ч

Заключение

1 Конструкция гидроблока с частотно-зависимой характеристикой жесткости позволяет комбинировать низкие значения продольной жесткости при движении в кривых участках пути с высокими значениями продольной жесткости, необходимыми для устойчивости движения с высокой скоростью.

2 Снижение продольной жесткости связи колесной пары и рамы тележки приводит к увеличению поперечных и угловых перемещений колесной пары при движении по прямому участку пути, однако способствует значительному снижению боковых и рамных сил, а также показателя износа в кривых участках пути, что снижает износ поверхностей катания колеса и рельса.

3 Параметры гидроблока могут быть оптимизированы по трем параметрам: нижняя граница жесткости будет преобладающей при низкочастотном возмущении, верхняя граница жесткости преобладает при высоких частотах.

Список литературы

1 Механическая часть тягового подвижного состава : учебник / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.]; под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Альянс, 2013. – 439 с. – ISBN 978-5-91872-025-7.

2 Гарг, В. Динамика подвижного состава / В. Гарг, Р. В. Дуккипати ; пер. с англ. К. Г. Бомштейна ; под ред. Н. А. Панькина. – Москва : Транспорт, 1988. – 392 с. – ISBN 5-277-00226-X.

3 Высокоскоростные поезда «Сапсан» В1 и В2 : учебное пособие / под ред. А. В. Ширяева. – Москва : ОАО «Российские железные дороги», 2013. – 522 с. – ISBN 978-5-89035-737-3.

4 Hiensch, M. Improving track-friendliness of rolling stock / M. Hiensch, P. Wiersma. – IHHA – 2015. – Conference. – 9 p.

5 International Rail Vehicle Conference Dresden February 23 to 25, 2011, Session 21. Hydraulic axle link bearing (HALL) for a wide application in the rail vehicle sector. – URL: <https://pdfslide.net/business/2107-cordts-meier.html?page=35> (дата обращения: 20.12.2022).

6 Савоськин, А. Н. Применение упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний в рес-

References

1 Traction rolling stock hardware: textbook / I. V. Biryukov, A. N. Savos'kin, G. P. Burchak [et al.]; Reprinted I. V. Biryukov. – Moscow : AlyanS, 2013. – 440 p. – ISBN 978-5-91872-025-7.

2 Garg, V. Dynamics of Railway Vehicle Systems / V. Garg, R. V. Dukkupati; Transl. from Eng. by K. G. Bomshtein; edited by N. A. Pan'kin. – Moscow : Transport, 1988. – 392 p. – ISBN 5-277-00226-X.

3 Sapsan High-Speed Trains V1 and V2: textbook / Shiryayev A. V. (ed.). – Moscow : Russian Railways JSC, 2013. – 522 p. – ISBN 978-5-89035-737-3.

4 Hiensch, M. Improving track-friendliness of rolling stock / M. Hiensch, P. Wiersma. – IHHA – 2015. – Conference. – 9 p.

5 International Rail Vehicle Conference Dresden February 23 to 25, 2011, Session 21. Hydraulic axle link bearing (HALL) for a wide application in the rail vehicle sector. – URL: <https://pdfslide.net/business/2107-cordts-meier.html?page=35> (date of accessed: 12/20/2022).

6 Savoskin, A. N. Application of an elastic-protected hydraulic vibration dampener in spring suspension of locomotives / A. N. Savoskin,

сорном подвешивании локомотивов / А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская, П. Ю. Иванов // Вестник ВНИИЖТ. – 2022. – № 2(81). – С. 134–147. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-2-134-147.

7 Харитонов, А. В. Динамическая модель скоростного электропоезда и ее верификация / А. В. Харитонов // Известия Транссиба. – 2023. – № 2(54). – С. 29–42. – ISSN 2220-4245.

8 Руководство пользователя Universal mechanism 9. Механическая система как объект моделирования. – URL: http://www.universal-mechanism.com/download/90/rus/02_um_technical_manual.pdf (дата обращения: 20.12.2022).

9 Руководство пользователя Universal mechanism 9. Моделирование динамики железнодорожных экипажей. – URL: http://www.universal-mechanism.com/download/90/rus/08_um_loco.pdf (дата обращения: 20.12.2022).

10 Руководство пользователя Universal mechanism 9. Программа моделирования. – URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/04_um_simulation_program.pdf (дата обращения: 20.12.2022).

N. S. Lavlinskaya, P. Y. Ivanov // Russian railway science journal. – 2022. – No. 2(81). – P. 134–147. – DOI 10.21780/2223-9731-2022-81-2-134-147.

7 Kharitonov, A. V. Dynamic model of a high-speed electric train and its verification / A. V. Kharitonov // Journal of Transsib Railway Studies. – 2023. – No. 2(54). – P. 29–42. – ISSN 2220-4245.

8 Universal Mechanism 9. Mechanical system as a modeling object. – URL: http://www.universal-mechanism.com/download/90/rus/02_um_technical_manual.pdf (date of access: 12.20.2022).

9 Universal Mechanism 9 User Manual. Railway Cab Vehicle Dynamic Simulation. – URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/08_um_loco.pdf (date of access: 12.20.2022).

10 Universal Mechanism 9 Simulation program. URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/04_um_simulation_program.pdf (date of access: 12.20.2022).

A. V. Kharitonov, E. K. Rybnikov

THE POSSIBILITY OF USING A HYDROBLOCK WITH A FREQUENCY-DEPENDENT ELASTIC-VISCOUS CHARACTERISTIC IN A HORIZONTAL COUPLING UNIT OF A WHEELSET AND A TROLLEY FRAME

Abstract. The paper considers the possibility of using a axle lever with a trolley frame of a high-speed electric train in the communication node instead of a traditional rubber-metal hinge with a conditionally constant longitudinal stiffness - a hydroblock having a frequency-dependent characteristic of radial horizontal stiffness. This design of the hydroblock allows you to combine low values of longitudinal stiffness when moving in curved sections of the track with high values of longitudinal stiffness necessary for stability of movement at high speed. With an increase in the speed of movement of the railway crew, the frequency of horizontal vibrations of the wheelset increases, which leads to an increase in the dynamic rigidity of the hydroblock and ensuring a high critical speed of the crew. On the contrary, movement in curved sections of the track is carried out with lower movement speeds and vibration frequencies of the wheelset. The selection of optimal parameters of the hydroblock makes it possible to provide both a high margin of stability and a decrease in the angle of approach of the wheelset when driving in curved sections of the track, and as a result, a decrease in wear on the surfaces of the wheel and rail.

Keywords: mathematical modeling, hydroblock, high-speed electric train, dynamic rigidity, universal mechanism.

For citation: Kharitonov, A. V. The possibility of using a hydroblock with a frequency-dependent elastic-viscous characteristic in a horizontal coupling unit of a wheelset and a trolley frame / A. V. Kharitonov, E. K. Rybnikov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 204–214. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_204.

Сведения об авторах**Харитонов Антон Витальевич**

Проектно-конструкторско-технологическое
бюро по нормированию – филиал ОАО «РЖД»,
ведущий технолог отдела ОНлок,

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
аспирант,

e-mail: anton.har@mail.ru

Рыбников Евгений Константинович

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)),
кафедра «Электропоезда и локомотивы»,
кандидат технических наук, профессор,
e-mail: rek40@mail.ru

Information about the authors**Kharitonov Anton Vitalievich**

Design and Technological Bureau for Rationing
– Branch of RZD «Russian Railways»,
Leading Technologist of the ONlok Department,

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Electric Trains and Locomotives»,
Postgraduate Student,

e-mail: anton.har@mail.ru.

Rybnikov Evgeny Konstantinovich

Russian University of Transport (RUT (MIIT)),
Chair «Electric Trains and Locomotives»,
Candidate of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: rek40@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК РГУПС»

1 **Материалы статей** представляют в виде текстов, отформатированных и распечатанных на лазерном или струйном принтере (пригодных для сканирования) на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) в одном экземпляре. Рекомендуемый объем статьи – 5–15 страниц.

Одновременно представляют электронную версию статьи, выполненной в текстовом редакторе Word for Windows, шрифт Times New Roman, 11 pt, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание по ширине, абзацный отступ – 1,25 см, все поля – 2 см.

2 На первой странице должны быть указаны:

- **УДК** – в левом верхнем углу;
- интервал;
- **инициалы и фамилии авторов** – по центру, курсивом;
- интервал;
- **название статьи** – заглавными буквами, полужирным шрифтом, по центру, без переносов;
- интервал;
- **аннотация** (80–150 слов);
- **ключевые слова** (5–10 слов);
- интервал;
- **текст статьи** – печатается с переносами.
- интервал;
- **список литературы** на русском и английском языках (не менее 10 источников).

3 **Статья** должна содержать вводную часть, цель научной разработки, основную часть и выводы. Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и готов для макетирования и верстки журнала на компьютере.

4 **Буквы** латинского алфавита набирают курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – прямым шрифтом. Математические символы \lim , \ln , \arg , const , \sin , \cos , \min , \max и т.д. набирают прямым шрифтом. Аббревиатуры следует расшифровывать при их первом упоминании в тексте.

5 **Формулы.** Большие формулы необходимо разбить на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при работе в формульном редакторе каждая строка – отдельный объект). Располагать формулы следует по центру строки.

Буквы J и I, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (ноль) должны различаться по начертанию.

Тире, дефис, знак «минус» обозначают соответствующими знаками. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Номер формулы следует печатать в Word отдельно от формул, в круглых скобках по правому краю.

Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТам.

6 **Рисунки и фотографии**, выполненные четко и контрастно в формате *.tif, *.jpg, *.png, с разрешением не менее 300 точек на дюйм, следует размещать в порядке их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки в тексте и подрисовочная подпись обязательны.

7 **Таблицы** следует размещать по мере упоминания в статье. Ссылки на таблицы в тексте и названия таблиц обязательны.

8 **Список литературы** приводят общим списком в конце статьи и составляют в соответствии с последовательностью ссылок в тексте, которые обозначают арабскими цифрами в квадратных скобках. Литературу оформляют только согласно ГОСТ Р 7.0.100-2018. При наличии у статьи цифрового идентификатора объекта (DOI) его указание обязательно.

Статья должна быть обязательно подписана всеми авторами.

9 **Материалы, прилагаемые к статье**, должны содержать следующие сведения (на русском и английском языках):

- Название статьи (заглавными буквами, полужирным шрифтом).
- Фамилия, имя, отчество автора (полностью, без сокращений).
- Место работы каждого автора в именительном падеже.
- Ученая степень, ученое звание, должность.
- E-mail.
- Аннотация (краткое содержание статьи, включающее 3–4 предложения).
- Ключевые слова.

Условия и порядок публикации статей в журнале

- 1** Статья должна быть оформлена по прилагаемым требованиям.
- 2** Автор имеет право опубликовать в номере одну статью.
- 3** Автор может прислать статью в адрес редакции:
 - по почте;
 - по электронной почте;
 - принести в редакцию и передать ответственному секретарю (гл. корпус, ком. Д 107).
- 4** Статья, представляемая в редакцию, должна соответствовать тематике издания.

Тематика журнала охватывает основные проблемы транспорта, а также энергетики, машиностроения и управления. Публикуются статьи по следующим секциям:

- машиностроение;
- подвижной состав, безопасность движения и экология;
- информационные технологии, автоматика и телекоммуникации;
- управление и логистика на транспорте;
- железнодорожный путь и транспортное строительство;
- транспортная энергетика;
- моделирование систем и процессов.

5 Редакционная коллегия принимает для публикации статьи после тщательной научной экспертизы.

Для публикации отбирают статьи, которые представляют научный интерес и являются новой ступенью в разработке данной проблемы. Статьи публицистического плана не принимаются.

6 На заседании редколлегии принимают решение о возможности публикации статьи только при наличии положительной рецензии.

7 Все расходы по подготовке к публикации и изданию журнала оплачивает университет, в том числе и почтовые расходы при пересылке журнала авторам.

Краткая информация о журнале

Научно-технический журнал «Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения» («Вестник РГУПС») зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-77245 от 20 ноября 2019 г. Журнал имеет международный стандартный сериальный номер (ISSN 0201-727X), присвоенный Книжной палатой Российской Федерации.

Учредителем и издателем является Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Главный редактор журнала – академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В.И. Колесников.

В состав редакционной коллегии входят ведущие ученые РГУПС, а также других транспортных и академических университетов Северо-Кавказского региона, Москвы, Санкт-Петербурга, Республики Беларусь, Чешской Республики, Польши, Франции.

Журнал выходит с периодичностью 4 номера в год, т.е. каждый квартал.

С апреля 2004 года «Вестник РГУПС» включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук» (решение Президиума ВАК № 6/4 от 06.02.2004 г.). Журнал вошел во все последующие редакции Перечня.

«Вестник РГУПС» – подписное издание. С 2004 года журнал был включен в каталог подписных изданий агентства «Роспечать». Также включен в каталог подписных изданий Объединённого каталога «Пресса России» (www.pressa-rg.ru под индексом 53720).

Подписаться на журнал можно через агентство подписки «Урал-Пресс» и агентство «АРЗИ», распространяется журнал на территории Российской Федерации. Подписку можно оформить на квартал, на полгода или на год.

Журнал «Вестник РГУПС» бесплатно рассылается всем отраслевым вузам, в ряд вузов Министерства образования и науки России, центральным и зональным научно-техническим библиотекам, НИИ информации.

Почтовый адрес редакции:

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

**№ 3 (91)
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 21.09.2023.
Дата выхода в свет 22.09.2023.
Печать офсетная.
Знак информационной продукции 16+.

Формат 60×84/8.
Усл. печ. л. 25,33.
Тираж 510 экз.
Цена свободная.

Бумага офсетная.
Изд. № 54.
Заказ № 55.

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.**