

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 3(35)

2018

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. Овчаренко Сергей Михайлович – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. Галиев Ильхам Исламович – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. Шантаренко Сергей Георгиевич – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. Черемисин Василий Титович – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. Бокарев Сергей Александрович – профессор кафедры «Мосты» СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. Ведрученко Виктор Родионович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
7. Глинка Тадеуш – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
8. Горюнов Владимир Николаевич – зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
9. Дёмин Юрий Васильевич – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
10. Зыкина Анна Владимировна – зав. кафедрой «Прикладная математика и фундаментальная информатика» ОмГТУ, д.ф.-м.н., профессор (Омск).
11. Каргапольцев Сергей Константинович – ректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
12. Косарев Александр Борисович – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
13. Лю Цзянькунь – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
14. Лебедев Виталий Матвеевич – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
15. Парамонов Александр Михайлович – профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, д.т.н., доцент (Омск).
16. Сидоров Олег Алексеевич – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
17. Солоненко Владимир Гельевич – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
18. Файзибаев Шерзод Сабирович – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТашИИТа, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
19. Харламов Виктор Васильевич – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. Galiev Ilkham Islamovich – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. Shantarenko Sergey Georgievich – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. Cheremisin Vasily Titovich – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. Bokaryov Sergey Alexandrovich – professor of the department «Bridges» of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. Vedruchenko Victor Rodionovich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
7. Glinka Tadeusz – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
8. Goryunov Vladimir Nikolaevich – head of the department «Power supply of industrial enterprises» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
9. Demin Yuri Vasilyevich – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
10. Zykina Anna Vladimirovna – head of the department «Applied mathematics and fundamental computer science» of OmSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
11. Kargapol'tcev Sergey Konstantinovich – rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
12. Kosarev Alexander Borisovich – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
13. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
14. Lebedev Vitaliy Matveyevich – professor of the department «Heat-power» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
15. Paramonov Alexander Mikhailovich – professor of the department «Heat-power» of OmSTU, D. Sc., associate professor (Omsk).
16. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
17. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
18. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons» of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
19. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

- Антипин Д. Я., Шорохов С. Г., Бондаренко О. И. Нагруженность пассажирского поезда при аварийном соударении с автомобилем на железной дороге 2
- Войтенко В. А. Шумовые характеристики дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой 10
- Давыдов Ю. А., Пляскин А. К., Дроглов Д. Ю. Исследование противобоксочной системы с уравнивателями 19
- Иванов В. С., Мельниченко О. В. Теоретическое исследование электромагнитных процессов инвертора на базе тиристорных и IGBT-транзисторов электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения 28
- Мальцева А. В., Утепбергенова С. М., Ли В. Н. Влияние формы полоза на аэродинамические характеристики скоростного токоприемника 45
- Михеев В. А. Внедрение инновационных вагонов как средство повышения эксплуатационной эффективности локомотивного парка 54
- Нехаев В. А., Сафронова М. Ю. Новый подход к построению квазиинвариантной виброзащитной системы 61
- Рауба А. А., Дюндин В. В. Оценка влияния механических свойств материалов на несущую способность в соединении «Колесный центр – бандаж» 70
- Харламов В. В., Попов Д. И., Стретенцев А. И. Способ диагностирования состояния коммутации коллекторных электрических двигателей 81

Транспортная энергетика

- Бурков А. Т., Ермачков Г. Р., Рыжков А. В. Совершенствование методики прогнозирования показателей системы токосъема при увеличении скоростей движения 91
- Доманов К. И., Черемисин В. Т., Галиев И. И. Тяговые возможности электровазодвойного питания 2ЭВ120 при следовании на лимитирующих подъемах Среднесибирского хода 101
- Кандаев В. А., Авдеева К. В., Уткина А. В. Определение электрических величин в системе проводников в условиях электрифицированного железнодорожного транспорта постоянного тока с применением преобразования Хартли 111
- Рожицкий Д. Б., Филаткин М. С., Рыбак А. А. К вопросу определения расхода энергии электроотопительными агрегатами, не оборудованными приборами учета 126

Путь и искусственные сооружения

- Квашук С. В., Смышляев Б. Н., Трунев В. Г. Инженерно-геологические и геотехнические аспекты строительства и эксплуатации Кузнецовского тоннеля на Дальневосточной железной дороге 135

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Король Р. Г., Гарлицкий Е. И. Оценка пропускной способности ванинского транспортного узла с помощью имитационного моделирования 144

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ))»

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

Д. Я. Антипин, С. Г. Шорохов, О. И. Бондаренко

Брянский государственный технический университет (БГТУ), г. Брянск, Российская Федерация

НАГРУЖЕННОСТЬ ПАССАЖИРСКОГО ПОЕЗДА ПРИ АВАРИЙНОМ СОУДАРЕНИИ С АВТОМОБИЛЕМ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Аннотация. Проведен анализ статистики и последствий продольных аварийных соударений пассажирских поездов с препятствиями на железных дорогах России, предложены основные пути повышения пассивной безопасности отечественного железнодорожного подвижного состава при аварийных соударениях. Оценены возможности современных методов исследования динамики рельсовых экипажей, обеспечивающих исследование нагруженности транспортных средств при их соударении. На основе их анализа для исследования принят метод твердотельного компьютерного моделирования. Разработаны твердотельные компьютерные модели аварийных соударений пассажирского поезда с препятствием в виде грузового автомобиля на нерегулируемом переезде. С использованием разработанных моделей исследованы процессы взаимодействия поезда с автомобилем при соударениях с различными скоростями, оценены величины динамических усилий, возникающих в межвагонных соединениях. По результатам моделирования даны рекомендации по снижению нагруженности поезда при продольных аварийных соударениях с препятствиями, которые могут быть использованы при проектировании инновационного пассажирского подвижного состава повышенной безопасности при соударениях, а также для модернизации эксплуатируемых вагонов и локомотивов отечественного производства. Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-2881.2018.8.

Ключевые слова: нагруженность, поезд, аварийное соударение, препятствие, пассивная безопасность, сценарий соударения.

Dmitry Ya. Antipin, Sergey G. Shorokhov, Olga I. Bondarenko

Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, the Russian Federation

LOADING OF PASSENGER TRAINS IN CASE OF EMERGENCY COLLISION WITH A CAR ON THE RAILROAD

Abstract. On the basis of the analysis of statistics of the incidents which have occurred on the railroads of Russia and connected with collisions of trains with obstacles, the most probable scenarios of development of an emergency situation are allocated. Modern methods of investigation of kinematics and dynamics of vehicles are analyzed. By methods of solid-state computer modeling the estimation of the dynamic loadings acting on the locomotive and passenger cars at collision of the passenger train with an obstacle in the form of the lorry on the railway crossing is carried out. For this purpose solid-state computer model of a passenger train and a cargo car. The obtained results indicate a high dynamic load of the locomotive in a collision. At the same time, passenger cars are affected by low dynamic loads that do not lead to damage to the load-bearing structures of passenger cars. The obtained results can be used in the creation of modern passenger rolling stock, characterized by high demands on safety in emergency situations. The work was carried out within the grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists MK-2881.2018.8.

Keywords: load, train, emergency collision, obstruction, passive safety, collision script.

Современный этап функционирования железнодорожного транспорта России неразрывно связан с широким внедрением инноваций и высоких технологий, влияющих на прогрессивное развитие транспортного комплекса страны. В основе прогрессивного развития железнодорожного комплекса лежит внедрение инновационных технологий в сфере производства подвижного состава, направленных на повышение безопасности пассажирских перевозок, в том числе в аварийных ситуациях.

Развитие высокоскоростного железнодорожного сообщения на сети железных дорог России обеспечивает повышенную мобильность населения страны, повышает престиж железнодорожного транспорта, но в то же время может стать причиной увеличения числа аварийных ситуаций, связанных с соударениями подвижного состава с препятствиями на пути следования.

ния поездов, что связано в первую очередь со снижением культуры вождения автотранспортных средств. По статистике [1] наиболее вероятными авариями являются соударения поездов с мобильными транспортными средствами на переездах и железнодорожным подвижным составом на путях. По данным служб мониторинга открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») за семь с половиной лет наблюдения аварийные соударения на железнодорожных переездах с мобильными транспортными средствами составляют примерно 86 % (75 % на неохраняемых и 11 % на охраняемых переездах) от общего количества случаев. Примерно 13 % аварийных столкновений происходит с грузовыми вагонами при выполнении маневровых работ и около 1 % – с другими препятствиями на пути движения [1].

В подобных аварийных ситуациях на подвижной состав воздействуют высокие динамические усилия, которые могут привести к появлению значительных пластических деформаций и разрушению вагонов и локомотивов, а также стать причиной тяжелого травмирования пассажиров и членов обслуживающей бригады поезда [2]. Снизить последствия подобных аварийных ситуаций можно повышением пассивной безопасности железнодорожного подвижного состава за счет его оснащения многоуровневыми системами пассивной безопасности [3 – 5].

Системы пассивной безопасности устанавливаются на подвижном составе с целью снижения его динамической нагруженности при аварийных соударениях поездов с препятствиями и уменьшения пластического деформирования несущих конструкций. Основу современных систем пассивной безопасности составляют крэш-элементы, которые обеспечивают поглощение кинетической энергии удара при собственном пластическом деформировании при аварийном соударении поезда с препятствием с повышенными скоростями.

Разработке систем пассивной безопасности предшествует этап оценки динамических усилий, воспринимаемых подвижным составом при соударении с препятствиями. Определение таких усилий возможно на основе анализа наиболее вероятных аварийных ситуаций при изучении последствий соударений, результатов натурных экспериментов или данных имитационного компьютерного моделирования [6, 7].

Оценка последствий аварийных соударений дает приближенные результаты, характеризующиеся высокой погрешностью. Проведение натурных экспериментальных исследований затруднено в силу необходимости разрушения большого количества единиц подвижного состава, что связано со значительными материальными и временными затратами. Кроме того, подобные методы не позволяют учесть сочетание большого количества внешних факторов при проведении натурных экспериментов. Методы компьютерного моделирования позволяют учесть недостатки других методов и провести за ограниченное время большое количество имитационных экспериментов по оценке поведения подвижного состава при соударениях с различными препятствиями. Данные, полученные при моделировании, учитываются на этапе проектирования подвижного состава, что позволяет обеспечить необходимый запас прочности несущей конструкции до начала эксплуатации. Достоверность получаемых при моделировании результатов обеспечивается их верификацией данными натурных экспериментов, проводимых в ограниченном объеме при сертификационных испытаниях.

С целью защиты пассажирского железнодорожного подвижного состава при аварийных соударениях поездов с препятствиями в 2013 г. был принят межгосударственный стандарт ГОСТ 32410-2013, регламентирующий пассивную безопасность отечественного пассажирского подвижного состава [8], согласно которому при проектировании систем пассивной безопасности рассматриваются два наиболее вероятных сценария продольных аварийных соударений поездов с препятствиями:

- соударение поезда с мобильным транспортным средством на переезде;
- соударение поезда с железнодорожным подвижным составом на путях.

Поскольку согласно статистике наиболее вероятны соударения поездов с мобильными транспортными средствами, в работе в качестве объекта исследования рассматривается ава-

рийное соударение пассажирского поезда с грузовым автомобилем на переезде. Условия анализируемого соударения соответствуют требованиям стандарта. Исследование проводилось методами твердотельного компьютерного имитационного моделирования. Инструментом исследования являлся программный комплекс «Универсальный механизм».

Системы эксплуатации пассажирского железнодорожного подвижного состава предполагают следующие схемы пассажирских поездов:

- одиночный локомотив (при следовании из депо к сцепу из пассажирских вагонов);
- локомотив в сцепе с пассажирскими вагонами (при движении по станциям и перегонам).

В связи с этим в работе рассматривались два сценария аварийного соударения:

сценарий 1 – соударение одиночного локомотива с автомобилем на нерегулируемом переезде (рисунок 1);

сценарий 2 – соударение сцепы из локомотива и четырех пассажирских вагонов с автомобилем на нерегулируемом переезде (рисунок 2).

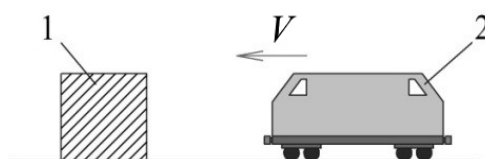


Рисунок 1 – Схема аварийного соударения по сценарию 1: 1 – препятствие; 2 – локомотив

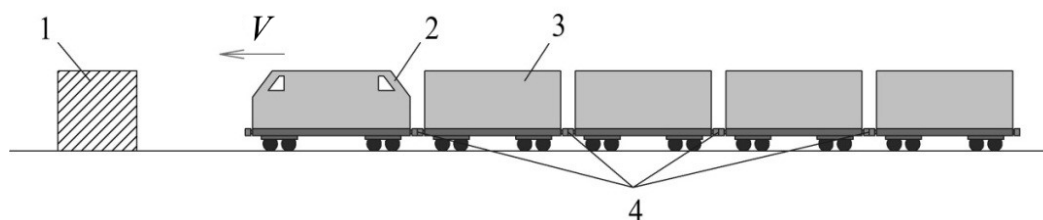


Рисунок 2 – Схема аварийного соударения по сценарию 2: 1 – препятствие; 2 – локомотив; 3 – пассажирский вагон; 4 – межавгонные соединения

Для моделирования аварийного соударения по сценарию 1 разработаны твердотельные компьютерные модели пассажирского поезда и препятствия в виде грузового автомобиля, которые представляются абсолютно твердыми телами, соединенными между собой с помощью силовых и контактных элементов, а также вращательных и обобщенных шарниров [9].

В качестве примера на рисунке 3 приведены характеристики упругого и диссипативного элементов, описывающих работу поглощающего аппарата Р5П. В таблице 1 приведены параметры контактных силовых элементов, описывающих взаимодействие элементов сцепных устройств единиц подвижного состава между собой.

Верхняя рессора при сцепленных вагонах обеспечивает плотное взаимное прижатие накладок рамки, в результате чего создается дополнительная сила трения при вертикальных и горизонтальных смещениях упругих площадок во время движения поезда. Рабочий прогиб верхней рессоры равен полному ходу буфера (155 мм). Усилие сопротивления рессоры при полном сжатии составляет 3,27 кН, при сцеплении автосцепок – 1,37 кН. Масса буфера – 188 кг.

Компьютерная модель локомотива представляет собой систему абсолютно твердых тел, моделирующих кузов, ходовые части, автосцепное устройство. В качестве локомотива рассматривался магистральный пассажирский двухсекционный электровоз постоянного тока ЧС7. Компьютерная модель препятствия моделируется неподвижным твердым телом массой 10 т, обладающим одной поступательной степенью свободы, направленной по оси железно-

дорожного пути. При моделировании рассматриваются соударения поезда с препятствием в диапазоне скоростей от 10 до 72 км/ч с шагом 10 км/ч.

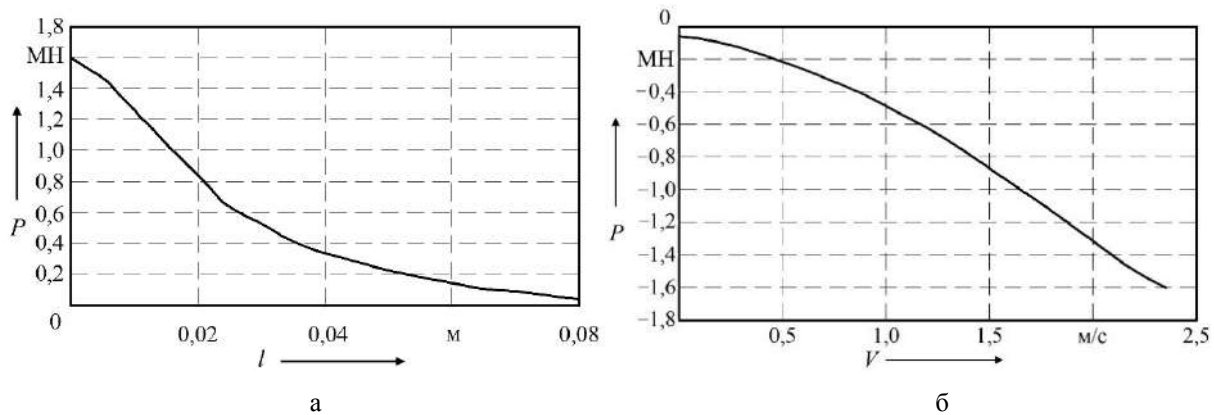


Рисунок 3 – Силовые характеристики математической модели поглощающего аппарата:
а – упругого элемента; б – диссипативного элемента

Таблица 1 – Параметры контактных силовых элементов, описывающих взаимодействие элементов сцепных устройств единиц подвижного состава между собой

Коэффициент трения скольжения в силовом контактном элементе	0,25
Коэффициент трения покоя в силовом контактном элементе	0,30
Контактная жесткость в силовом контактном элементе, Н/м	$1,27 \times 10^6$

В результате моделирования получен график распределения сжимающих усилий, воспринимаемых локомотивом (рисунок 4). Из графика видно, что при столкновении локомотива с препятствием массой 10 т со скоростью 20 км/ч он может получать повреждения, что объясняется превышением действующего значения нагрузки предельного нормированного значение 2,5 МН, регламентированного «Нормами...» [10].

Для моделирования соударения поезда с препятствием по сценарию 2 сформирована компьютерная модель пассажирского поезда, состоящего из локомотива и четырех пассажирских вагонов, представляющих собой систему твердых тел, соединенных шарнирами и контактными элементами. В качестве локомотива рассматривался магистральный пассажирский двухсекционный электровоз постоянного тока ЧС7. В качестве пассажирских вагонов рассмотрены конструкции отечественных вагонов модели 61-4440.

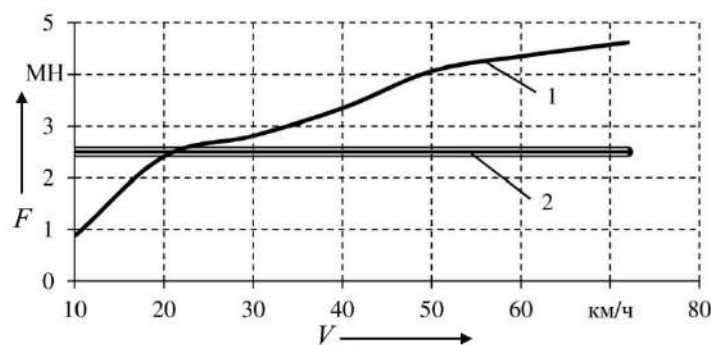


Рисунок 4 – Зависимость максимальных сжимающих усилий, действующих на локомотив при его столкновении с автомобилем: 1 – сила, действующая на локомотив; 2 – предельное значение силы

Для оценки динамических усилий, возникающих в межвагонных соединениях при соударении, в компьютерных моделях локомотива и пассажирских вагонов детально смоделировано автосцепное устройство с учетом взаимодействия двух сцепных устройств единиц поезда в сцепленном состоянии при движении поезда. Взаимодействие двух автосцепных устройств в рабочем состоянии осуществляется за счет введения между телами, моделирующими корпус автосцепки, контактных силовых элементов. Упругодиссипативные характеристики межвагонных

связей определяются типом применяемых поглощающих аппаратов автосцепных устройств и упругими свойствами кузовов вагонов и локомотива.

Моделирование движения пассажирского поезда осуществлялось путем приложения тяговых усилий в виде крутящих моментов к осям колесных пар локомотива с учетом сил сопротивления движению [11 – 13].

Оценка адекватности разработанной компьютерной модели пассажирского поезда выполнена сопоставлением данных натурных испытаний на соударение и динамических ходовых испытаний с результатами расчетов по аналогичным сценариям. Удовлетворительное соответствие данных подтверждает адекватность разработанной компьютерной модели поезда и возможность ее использования для дальнейших исследований. При моделировании соударения модель грузового автомобиля является неподвижной и установлена на прямом горизонтальном участке пути, моделирующем переезд. Модель поезда является подвижной и соударяется с моделью автомобиля со скоростями в интервале от 10 до 72 км/ч с шагом 10 км/ч. При проведении комплекса компьютерных экспериментов получены значения максимальных сжимающих усилий, воздействующих на локомотив и пассажирские вагоны (таблица 2).

Таблица 2 – Значения максимальных сжимающих усилий, воздействующих на пассажирский поезд при соударении с автомобилем

Значение максимального сжимающего усилия, МН	Скорость соударения, км/ч							
	10	20	30	40	50	60	70	72
Локомотив	0,96	2,51	2,94	3,42	3,82	4,07	4,38	4,43
Соединение локомотива и первого вагона	0,18	0,34	0,58	0,74	0,93	1,18	1,31	1,36
Соединение первого и второго вагонов	0,06	0,12	0,27	0,41	0,65	0,81	0,92	0,97
Соединение второго и третьего вагонов	0,01	0,06	0,11	0,19	0,29	0,42	0,58	0,64
Соединение третьего и четвертого вагонов	0	0,01	0,05	0,09	0,15	0,28	0,37	0,42

При моделировании получено также распределение ускорений по длине поезда, представленное в виде графика на рисунке 5. Анализ результатов показывает, что соударение поезда с автомобилем со скоростями свыше 20 км/ч может вызвать появление пластических деформаций в элементах несущей конструкции локомотива, что приведет к повреждению или разрушению кузова локомотива. При этом нагрузки, воздействующие на пассажирские вагоны, имеют значения, не превышающие допускаемые нормативной документацией [10]. Ускорения, возникающие в междвагонных соединениях при соударениях в рассматриваемом диапазоне скоростей, не превышают предельного уровня. Указанные результаты свидетельствуют о необходимости повышения пассивной безопасности тягового подвижного состава как наиболее нагруженной единицы пассажирского поезда при аварийных продольных соударениях с препятствиями.

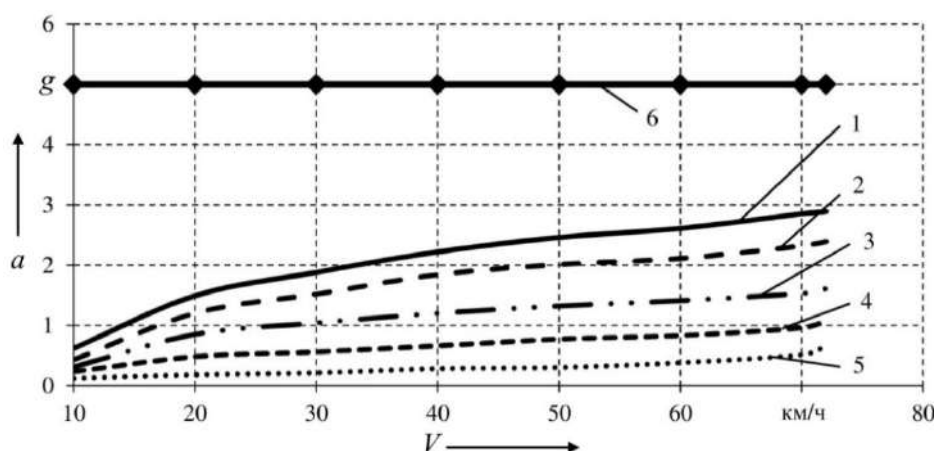


Рисунок 5 – Распределение ускорений по длине пассажирского состава при аварийном соударении поезда с автомобилем: 1 – ускорения, действующие на локомотив; 2 – ускорения в соединении локомотива и первого вагона; 3 – ускорения в соединении первого и второго вагонов; 4 – ускорения в соединении второго и третьего вагонов; 5 – ускорения в соединении третьего и четвертого вагонов; 6 – предельное значение ускорения

Высокий уровень продольных ускорений, действующих на единицы поезда при соударениях с препятствиями с повышенными скоростями, а также значительные сжимающие силы, возникающие в межвагонных соединениях в момент соударения, объясняются низкой энергоемкостью поглощающих аппаратов штатных сцепных устройств, которыми оборудуется железнодорожный подвижной состав отечественного производства.

Результаты, полученные при имитационном моделировании аварийных соударений поездов с автомобилями на железных дорогах, позволяют сделать вывод о высокой вероятности появления пластических деформаций несущих конструкций отечественных локомотивов и тяжелого травмирования локомотивной бригады, что свидетельствует о необходимости снижения динамической нагруженности тягового подвижного состава при аварийных соударениях путем его оснащения многоуровневыми системами пассивной безопасности на основе применения разрушаемых крэш-элементов.

Список литературы

1. Красюков, Н. Ф. Как повысить пассивную безопасность подвижного состава [Текст] / Н. Ф. Красюков // Локомотив / ОАО «РЖД». – М. – 2014. – № 8. – С. 9, 10.
2. Антипин, Д. Я. Аспекты защиты пассажиров отечественных вагонов при продольных аварийных соударениях [Текст] / Д. Я. Антипин, С. Г. Шорохов // Материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2014» / Академия ГПС МЧС России. – М., 2014. – С. 132 – 134.
3. Шорохов, С. Г. Концепция пассивной защиты отечественного пассажирского железнодорожного подвижного состава при аварийных соударениях [Текст] / С. Г. Шорохов, Д. Я. Антипин // Материалы VI междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2017» / Академия ГПС МЧС России. – М., 2017. – С. 311 – 317.
4. Шорохов, С. Г. Анализ требований по пассивной безопасности железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок [Текст] / С. Г. Шорохов, Д. А. Мамаева // Системы обеспечения техносферной безопасности: материалы IV всерос. конф. и школы для молодых ученых (с междунар. участием) / Южный федеральный университет. – Таганрог, 2017. – С. 247 – 249.
5. Разработка конструктивных мер повышения пассивной безопасности отечественных пассажирских вагонов [Текст] / В. В. Кобищанов, Д. Я. Антипин и др. // Вестник Брянского гос. техн. ун-та / Брянский гос. техн. ун-т. – Брянск. – 2013. – № 4. – С. 27 – 33.
6. Шорохов, С. Г. Применение компьютерного моделирования для анализа аварийных соударений железнодорожного подвижного состава [Текст] / С. Г. Шорохов // Моделирование природных и техногенных чрезвычайных ситуаций и рисков их возникновения: синтез достижений технических и социальных наук: Сборник материалов науч.-практ. конф. – Архангельск: КИРА, 2016. – С. 118 – 122.
7. Шорохов, С. Г. Применение компьютерного моделирования для оценки динамической нагруженности пассажирских вагонов при соударениях [Текст] / С. Г. Шорохов, Д. Я. Антипин // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: III научно-технический семинар / Брянский гос. техн. ун-т. – Брянск, 2016. – С. 93 – 96.
8. ГОСТ 32410-2013. Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.
9. Шорохов, С. Г. Обоснование компьютерной модели соударения пассажирского поезда с препятствием [Текст] / С. Г. Шорохов, Н. А. Редя // Приоритетные направления развития науки, техники и технологий: Сборник материалов междунар. науч.-практ. конф. / ЗапСибНЦ. – Кемерово, 2016. – Т. 2. – С. 321 – 324.

10. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст] / ВНИИЖТ, ГосНИИВ. – М., 1996. – 319 с.

11. Кобищанов, В. В. Оценка динамической нагруженности отечественных пассажирских вагонов при аварийных соударениях поездов с препятствиями [Текст] / В. В. Кобищанов, Д. Я. Антипин, С. Г. Шорохов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 50 – 56.

12. Шорохов, С. Г. Анализ динамических усилий в межвагонных соединениях при аварийном соударении пассажирского поезда с препятствием [Текст] / С. Г. Шорохов, Д. Я. Антипин // Инновационный транспорт-2016: специализация железных дорог: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2017. – Вып. 8 (227). – С. 702 – 708.

13. Шорохов, С. Г. Оценка динамической нагруженности пассажирского локомотива при аварийном соударении с препятствием / С. Г. Шорохов, Д. Я. Антипин // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 170 – 177.

References

1. Krasiukov N. F. How to improve passive safety of rolling stock [Kak povysit' passivnuiu bezopasnost' podvizhnogo sostava]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2014, no. 8, pp. 9 – 10.

2. Antipin D. Ya., Shorokhov S. G. Aspects of protection of passengers of domestic cars at longitudinal emergency collisions [Aspekty zashchity passazhirov otechestvennykh vagonov pri prodol'nykh avariinykh soudareniiakh]. *Materialy 3-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Problemy tekhnosfernoi bezopasnosti-2014»* (Materials of the 3 Int. scientific-practical conference of young scientists and specialists «Problems of technosphere safety-2014»). Moscow, 2014, pp. 132 – 134.

3. Shorokhov S. G., Antipin D. Ya. The concept of passive protection of the domestic passenger railway rolling stock in case of emergency collisions [Kontseptsiiia passivnoi zashchity otechestvennogo passazhirskogo zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava pri avariinykh soudareniiakh]. *Materialy VI-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Problemy tekhnosfernoi bezopasnosti-2017»* (Proceedings of the VI Int. scientific and practical conference of young scientists and specialists «Problems of technosphere safety-2017»). Moscow, 2017, pp. 311 – 317.

4. Shorokhov S. G., Mamaeva D. A. Analysis of requirements for passive safety of railway rolling stock for passenger traffic [Analiz trebovaniy po passivnoi bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava dlia passazhirskikh perevozok]. *Sistemy obespecheniia tekhnosfernoi bezopasnosti: materialy IV Vserossiiskoi konferentsii i shkoly dlia molodykh uchenykh (s mezhdunarodnym uchastiem)* (Technosphere safety systems: proceedings of the IV all-Russian conference and school for young scientists (with international participation). Taganrog, 2017, pp. 247 – 249.

5. Kobishchanov V. V., Antipin D. Ya., Rasin D. U., Shorokhov S. G. Development of constructive measures to improve the passive safety of domestic passenger cars [Razrabotka konstruktivnykh mer povysheniia passivnoi bezopasnosti otechestvennykh passazhirskikh vagonov]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2013, no. 4, pp. 27 – 33.

6. Shorokhov S. G. The use of computer simulation for the analysis of accidents collisions of railway rolling stock [Primenenie komp'iuternogo modelirovaniia dlia analiza avariinykh soudarenii zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava]. *Modelirovanie prirodnykh i tekhnogenykh chrezvychainykh situatsii i riskov ikh vozniknoveniia: sintez dostizhenii tekhnicheskikh i*

sotsial'nykh nauk: sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii (Modeling of natural and man-made emergencies and risks of their occurrence: synthesis of achievements of technical and social Sciences: proceedings of scientific-practical conference). Arkhangel'sk, 2016, pp. 118 – 122.

7. Shorokhov S. G., Antipin D. Ya. The application of computer modelling to assess dynamic load of passenger cars in collisions [Primenenie komp'iuternogo modelirovaniia dlia otsenki dinamicheskoi nagruzhennosti passazhirskikh vagonov pri soudareniiakh]. *Komp'iuternoe modelirovanie v zheleznodorozhnom transporte: dinamika, prochnost', iznos: III nauchno-tekhnicheskii seminar* (Computer simulation in railway transport: dynamics, strength, wear: III scientific and technical seminar). Bryansk, 2016, pp. 93 – 96.

8. *Kresh-sistemy avariinye zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava dlia passazhirskikh perevozok. Tekhnicheskie trebovaniia i metody kontroliia, GOST 32410-2013* (A crash alarm system of railway rolling stock for passenger transport. technical requirements and control methods, State Standart 32410-2013). Moscow, Standartinform, 2013, 16 p.

9. Shorokhov S. G., Redya N. A. Substantiation of the computer model of collision of a passenger train with an obstacle [Obosnovanie komp'iuternoi modeli soudareniiia passazhirskogo poezda s prepriatstviem]. *Prioritetnye napravleniia razvitiia nauki, tekhniki i tekhnologii: sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, tom II* (Priority directions of development of science, technology and technologies: proceedings of the Int. scientific-practical conference, vol. II.). Kemerovo, 2016, pp. 321 – 324.

10. Normy dlia rascheta i proektirovaniia vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm. (nesamokhodnykh) (Standards for calculation and design of cars of the railroads of MPs of the track of 1520 mm. (not self-propelled), Moscow, GosNIIV – VNIIZhT, 1996, 319 p.

11. Kobishchanov V. V., Antipin D. Ya., Shorokhov S. G. Assessment of dynamic loading of domestic passenger cars at emergency collisions of trains with obstacles [Otsenka dinamicheskoi nagruzhennosti otechestvennykh passazhirskikh vagonov pri avariinykh soudareniiakh poezdov s prepriatstviiami]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: Materialy tret'ei vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem v trekh chastiakh. Chast' 2* (Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock: Materials of the third all-Russian scientific and technical conference with international participation in three parts. Part 2.). Omsk, 2015, pp. 50 – 56.

12. Shorokhov S. G., Antipin D. Ya. Analysis of dynamic forces in inter-car connections in case of an emergency collision of a passenger train with an obstacle [Analiz dinamicheskikh usilii v mezhvagonnykh soedineniiakh pri avariinom soudarenii passazhirskogo poezda s prepriatstviem]. *Innovatsionnyi transport-2016: spetsializatsiia zheleznykh dorog: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Innovative transport-2016: specialization of Railways: proceedings of the Int. scientific and practical conference). Ekaterinburg, 2017, pp. 702 – 708.

13. Shorokhov S. G., Antipin D. Ya. Assessment of dynamic loading of passenger locomotive in case of emergency collision with an obstacle [Otsenka dinamicheskoi nagruzhennosti passazhirskogo lokomotiva pri avariinom soudarenii s prepriatstviem]. *Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: Materialy IV vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Technological support of repair and improvement of dynamic qualities of railway rolling stock: Proceedings of the IV all-Russian scientific and technical conference with international participation). Omsk, 2017, pp. 170 – 177.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антипин Дмитрий Яковлевич

Брянский государственный технический университет (БГТУ).

50 лет Октября б-р, д. 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Подвижной состав железных дорог», БГТУ.

Тел.: +7 (4832) 56-04-66.

E-mail: adya2435@gmail.com

Шорохов Сергей Геннадьевич

Брянский государственный технический университет (БГТУ).

50 лет Октября б-р, д. 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», БГТУ.

Бондаренко Ольга Игоревна

Брянский государственный технический университет (БГТУ).

50 лет Октября б-р, д. 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав железных дорог», БГТУ.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Antipin Dmitry Yakovlevich

Bryansk State Technical University (BSTU).
7, 50 let Oktyabrya Bulvar, Bryansk, 241035, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, head of the department «Rolling Stock of Railways», BSTU.

Phone: +7 (4832) 56-04-66.

E-mail: adya2435@gmail.com

Shorokhov Sergey Gennad'evich

Bryansk State Technical University (BSTU).
7, 50 let Oktyabrya Bulvar, Bryansk, 241035, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Rolling Stock of Railways», BSTU.

Bondarenko Olga Igorevna

Bryansk State Technical University (BSTU).
7, 50 let Oktyabrya Bulvar, Bryansk, 241035, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Rolling Stock of Railways», BSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Антипин, Д. Я. Нагруженность пассажирского поезда при аварийном соударении с автомобилем на железной дороге [Текст] / Д. Я. Антипин, С.Г. Шорохов, О. И. Бондаренко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (35). – С. 2 – 10.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Antipin, D. Ya., Shorokhov S. G., Bondarenko O. I. Loading of passenger trains in case of emergency collision with a car on the railroad. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 3, no 35, pp. 2 – 10 (In Russian).

УДК 629.4.077: 629.4.087

В. А. Войтенко

Луганский национальный университет им. В. Даля (ЛНУ), г. Луганск, Российская Федерация

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКОВОГО ТОРМОЗА С ПЛАВАЮЩЕЙ ТОРМОЗНОЙ КОЛОДКОЙ

Аннотация. Проведены сравнительные стендовые испытания акустической эмиссии, возникающей в процессе взаимодействия тормозной колодки с тормозным диском для тормозного блока с неподвижной тормозной колодкой и тормозного блока с плавающей тормозной колодкой. Плавающая тормозная колодка в зависимости от условий торможения занимает оптимальное положение на поверхности тормозного диска, совершая при этом движения колебательного характера вокруг поворотной оси, не проходящей через ее центр масс и параллельной оси вращения тормозного диска. Определена область частот, в которой наблюдаются заметные различия в акустической эмиссии тормозного блока с плавающей тормозной колодкой и с неподвижной тормозной колодкой. Применена теория нечетких множеств для анализа воспринимаемой органами слуха человека акустической эмиссии, сопровождающей взаимодействие поверхностей фрикционной пары в исследуемой области частот. Обсуждаются результаты сравнительного анализа шумовых характеристик исследуемых тормозных блоков. Сравниваются спектры мощности акустической эмиссии согласно полученной базе экспертной оценки мощности шума, воспринимаемого человеком.

Ключевые слова: дисковый тормоз, плавающая тормозная колодка, стендовые испытания, фрикционная пара, акустическая эмиссия, спектр мощности.

Vladimir A. Voytenko

Vladimir Dahl Lugansk National University (LNU), Lugansk, the Russian Federation

NOISE CHARACTERISTICS OF THE DISC BRAKE WITH FLOATING BRAKE PAD

Abstract. Comparative bench tests of acoustic emission occurring during the interaction of the brake pad with a brake disc for the brake unit with a stationary brake pad and a brake unit with a floating brake pad are carried out. The floating brake pad, depending on the braking conditions, occupies an optimum position on the surface of the brake disc, while making movements of an oscillating nature around the turning axis that does not pass through its center of mass and parallel to the axis of rotation of the brake disc. The frequency range is determined in which there are noticeable differences in the acoustic emission of a brake unit with a floating brake pad and a stationary brake pad. The theory of fuzzy sets is used to analyze the acoustic emission perceived by the human hearing organs, which accompanies the interaction of the surfaces of a friction pair in the investigated frequency region. The results of a comparative analysis of the noise characteristics of the brake blocks under investigation are discussed. The spectra of the acoustic emission power are compared according to the obtained base of the expert evaluation of the noise power perceived by man.

Key words: disc brake, floating brake pad, bench tests, friction pair, acoustic emission, power spectrum.

Дисковый тормоз является наиболее перспективным видом тормоза для высокоскоростного железнодорожного транспорта. Несмотря на появление новых фрикционных материалов, обеспечивающих в фрикционной паре с чугуном, легированной сталью и алюминиевыми сплавами, высокие фрикционные характеристики дискового тормоза, его конструкция и кинематика остались наиболее консервативными по сравнению с другими элементами тормозной системы. В дисковом тормозе классической конструкции наблюдается неравномерность распределения работы силы трения, энерговыделения, износа, контактных температур и деформаций. Неравномерный износ и образование канавок на рабочих поверхностях фрикционной пары во многом определяют шумовые характеристики дискового тормоза [1 – 3]. Предложенная автором конструкция дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой является простым и эффективным техническим решением, позволяющим качественно улучшить шумовые характеристики тормозного блока.

Уровню шума подвижного состава железных дорог уделяется особое внимание в связи с всевозрастающим шумовым загрязнением крупных городов. Поэтому среди прочих эксплуатационно-технических характеристик новый тип дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой должен быть исследован на соответствие требованиям, предъявляемым по шуму [4, 5]. Получение шумовых характеристик новой конструкции дискового тормоза и сравнение их с шумовыми характеристиками типового дискового тормоза являются актуальными научно-техническими задачами.

Целью работы является проведение сравнительного анализа шумовых характеристик дисковых тормозов предлагаемой и традиционной конструкций с учетом особенностей восприятия звука органами слуха человека.

Проведение исследований шумовых характеристик дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой (рисунок 1) в реальных условиях эксплуатации на железнодорожном транспорте в настоящее время невозможно, так как данный тип тормоза является новым. Плавающая тормозная колодка в зависимости от условий торможения занимает оптимальное положение на поверхности тормозного диска, совершая при этом движения колебательного характера вокруг поворотной оси, не проходящей через ее центр масс и параллельной оси вращения тормозного диска. Такая конструкция обеспечивает быструю приработку рабочих

поверхностей фрикционной пары и отсутствие условий для образования канавок, чем достигается снижение шума торможения.

На рисунке 1 показана конструкция испытательной плавающей тормозной колодки с возможностью изменения положения поворотной оси при помощи регулировочного винта. Передача усилия прижатия от клещевого механизма плавающей тормозной колодке осуществляется через шарик, благодаря чему обеспечивается малый коэффициент трения качения.

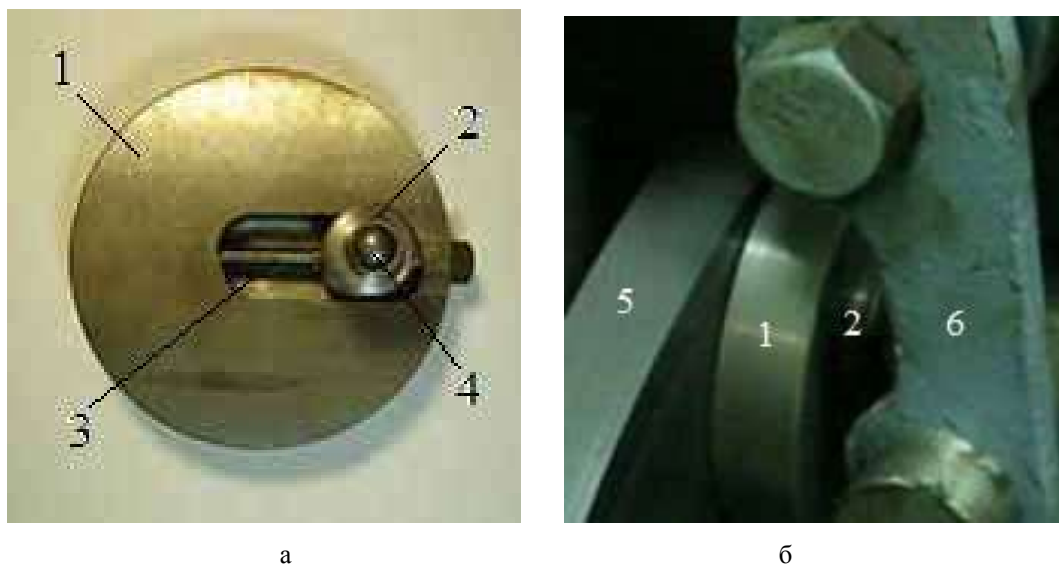


Рисунок 1 – Конструкция дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой:
1 – плавающая тормозная колодка; 2 – поворотная ось; 3 – регулировочный винт; 4 – шарик;
5 – тормозной диск; 6 – клещевой механизм

Регистрация акустической эмиссии, сопровождающей взаимодействие рабочих поверхностей фрикционной пары, осуществлялась при помощи сертифицированного измерительного комплекса фирмы «Брюль и Кьер». Использовались стандартные методики, обеспечивающие высокую достоверность полученных результатов и выводов [6, 7]. В качестве фрикционной пары использовались такие материалы: тормозной диск – серый чугун марки СЧ20; тормозная колодка – серый чугун марки СЧ20. Акустическая эмиссия тормозного блока регистрировалась одновременно с акустической эмиссией испытательного стенда при различных комбинациях угловой скорости тормозного диска и силы прижатия колодки к диску. Для регистрации акустической эмиссии фрикционной пары на фоне акустической эмиссии испытательного стенда использовался микрофон с углом основного лепестка диаграммы направленности 7° , установленный на штативе с виброзащитным подвесом на расстоянии 1 м от фрикционной пары.

Угловая скорость тормозного диска в течение каждого опыта оставалась постоянной и контролировалась при помощи оптического датчика и частотомера. Сила прижатия тормозной колодки к поверхности тормозного диска также в течение каждого опыта оставалась постоянной и контролировалась при помощи тензорезистивного мостового преобразователя, усилителя и регистрирующего устройства. Кратковременные флуктуации указанных параметров не превышали 5 – 7 % и являлись следствием неравномерности взаимодействия поверхностей фрикционной пары, а также малых биений тормозного диска.

При помощи быстрого дискретного оконного преобразования Фурье рассчитывались амплитудный спектр и спектр мощности акустической эмиссии [8, 9].

Спектр сигнала [8]

$$\underline{P}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) \exp(-j2\pi / Nkn), \quad (1)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1,$$

где k – номер спектральной линии; n – номер отсчета; N – количество отсчетов дискретизированного сигнала; $x(nT)$ – дискретизированный сигнал; T – период дискретизации сигнала.

Спектр мощности [8]

$$S(k) = 20 \lg |\underline{P}(k)|. \quad (2)$$

Для тормозного блока предлагаемой конструкции и традиционного тормозного блока сравнивались спектры амплитуд и спектры мощностей в режиме торможения как в исходном виде, так и после вычитания соответствующих спектров акустической эмиссии испытательного стенда в режиме холостого хода. По результатам такого сравнения выбиралась область частот, в которой спектры наиболее различались по амплитуде и мощности гармоник. При помощи экспертов создавалась база, отражающая степень восприятия органами слуха человека мощности акустической эмиссии в выбранной области частот. Проводилось сравнение спектра мощности во всем диапазоне звуковых частот со спектром, отражающим предельно допустимые значения мощности шума в зависимости от частоты. Проводилось сравнение мощности шума работы тормозных блоков для разных типов дисковых тормозов с базой экспертной оценки. По результатам сравнения уточнялись шумовые характеристики дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой.

На рисунке 2 показаны спектры акустической эмиссии испытательного стенда в режимах холостого хода и торможения, на рисунке 3 – спектры мощности акустической эмиссии.

Анализ спектров амплитудных значений акустической эмиссии в режиме торможения позволил определить диапазон частот 1 – 8 кГц, в котором наиболее проявляются различия шумовых характеристик исследуемых конструкций дисковых тормозов. Различия спектров акустической эмиссии в режиме холостого хода (рисунок 2, а, б), в режиме торможения для дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой (рисунок 2, в, г) и в режиме торможения для дискового тормоза традиционной конструкции (рисунок 2, д, е), полученные для угловой скорости вращения тормозного диска 88 рад/с и силы прижатия 7,44 кН, более детально показаны на рисунке 2, в, г, е, где видно, что акустическая эмиссия в режиме торможения значительно превышает уровень акустической эмиссии в режиме холостого хода. Кроме этого амплитуды гармоник акустической эмиссии оказались больше для дискового тормоза традиционной конструкции.

Использовалась зависимость предельно допустимого шума (в децибелах) от частоты в логарифмическом масштабе, показанная на графиках рисунка 3 пунктирной линией. Уровни мощности шума в режиме торможения для исследованных конструкций дисковых тормозов оказались ниже предельно допустимого уровня.

Для детального изучения различий в акустической эмиссии рассматриваемых типов дисковых тормозов были получены спектры мощности путем вычитания из спектров в режиме торможения спектра в режиме холостого хода (рисунок 4, а, б). На рисунке 4, в приведен спектр мощности, полученный путем вычитания из спектра мощности традиционного дискового тормоза спектра мощности предлагаемого дискового тормоза в режиме торможения. Согласно рисунку 4 можно сделать предварительный вывод о том, что акустическая эмиссия

дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой в диапазоне частот от 1 до 8 кГц меньше, чем акустическая эмиссия дискового тормоза традиционной конструкции.

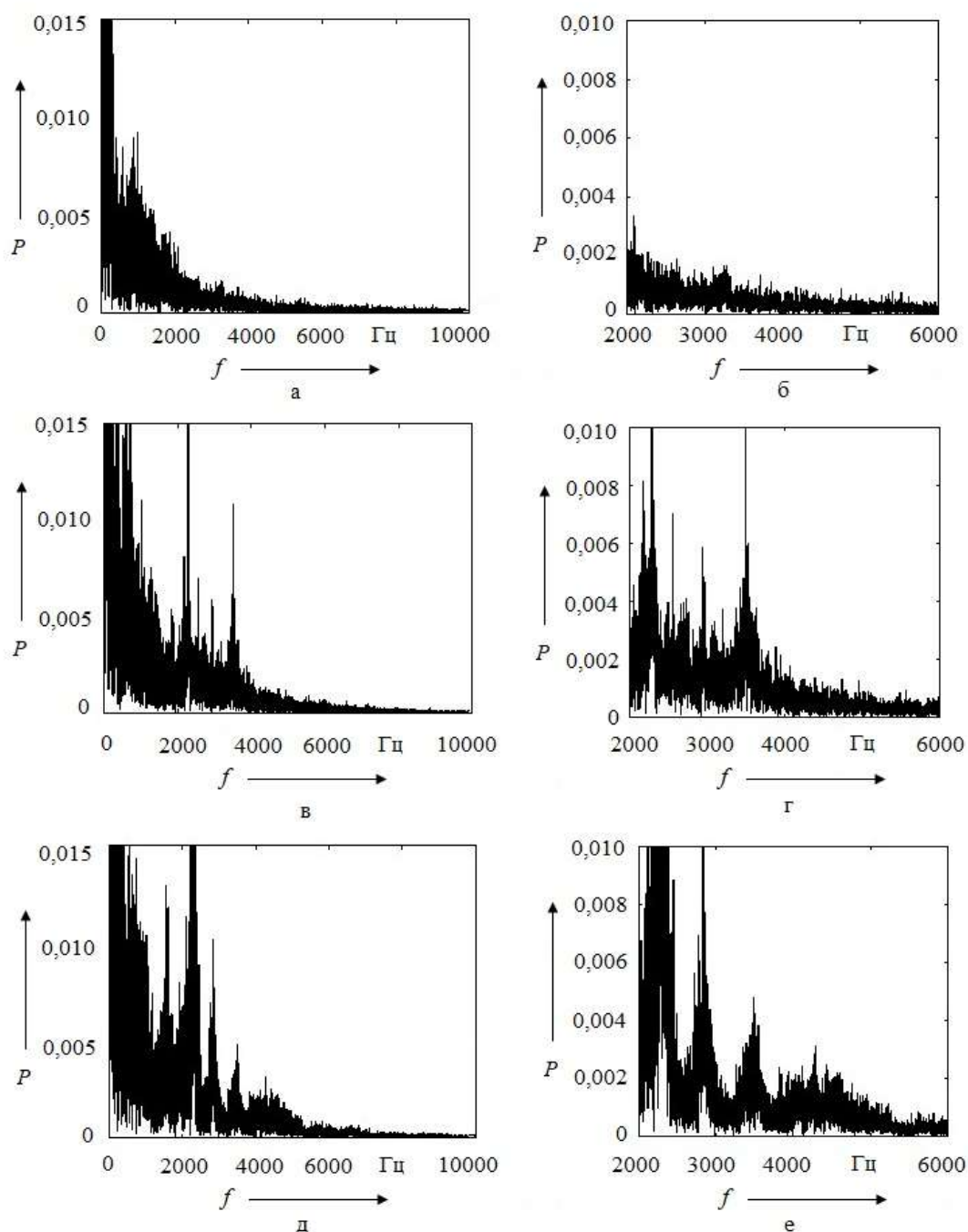


Рисунок 2 – Спектры акустической эмиссии испытательного стенда:
 а, б – в режиме холостого хода; в, г – в режиме торможения для дискового тормоза предлагаемой конструкции; д, е – в режиме торможения для дискового тормоза традиционной конструкции

Для уточнения полученных результатов были привлечены пятеро экспертов, которые субъективно оценивали восприятие шума различной мощности. С их помощью была создана база данных, отражающих субъективное восприятие шума. Для этого данные были обработаны с использованием методов нечетких множеств [10, 11]. Было сформировано множество

возможных значений лингвистической переменной (терм-множество), состоящее из восьми термов, соответствующих уровням шума, воспринимаемого экспертами.

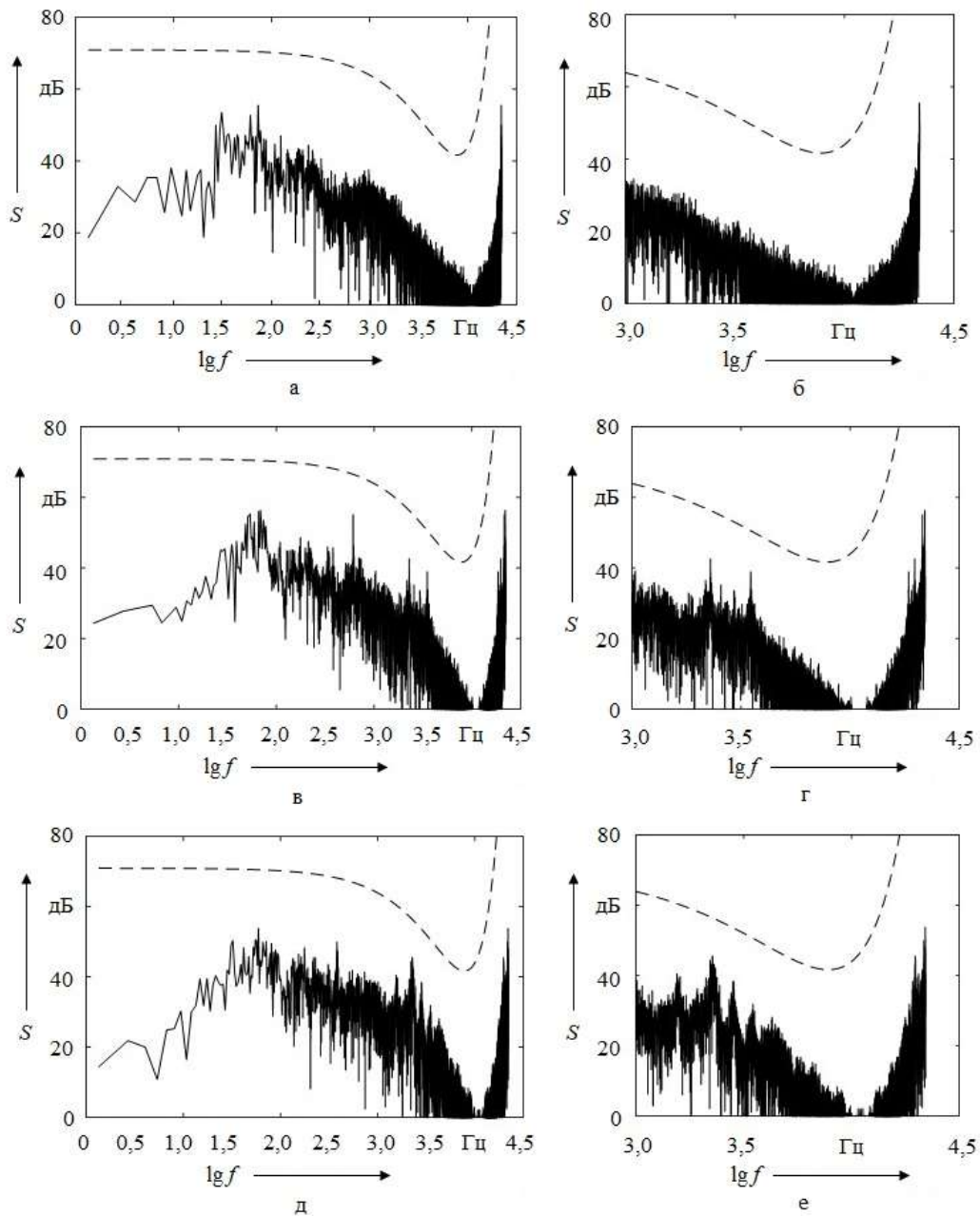


Рисунок 3 – Спектры мощности акустической эмиссии испытательного стенда: а, б – в режиме холостого хода; в, г – в режиме торможения для дискового тормоза предлагаемой конструкции; д, е – в режиме торможения для дискового тормоза традиционной конструкции

Функция принадлежности нечеткому множеству [11]

$$\mu_j(u_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K b_{ji}^k, \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где μ_j – степень принадлежности нечеткому множеству $\tilde{l}_j$; K – количество экспертов; b_{ji}^k – мнение k -го эксперта о наличии у элемента u_i свойств нечеткого множества $\tilde{l}_j$; n – число рассматриваемых элементов; m – число свойств.

Результаты расчетов занесены в таблицу, по этим результатам построены графики функции принадлежности нечеткому множеству (рисунок 5). Сравнивая уровни мощности акустической эмиссии для исследуемых типов дисковых тормозов с функциями принадлежности нечетким множествам (см. рисунок 4), было установлено, что акустическая эмиссия дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой создает шум среднего уровня, в то время как шум дискового тормоза классической конструкции является шумом выше среднего уровня.

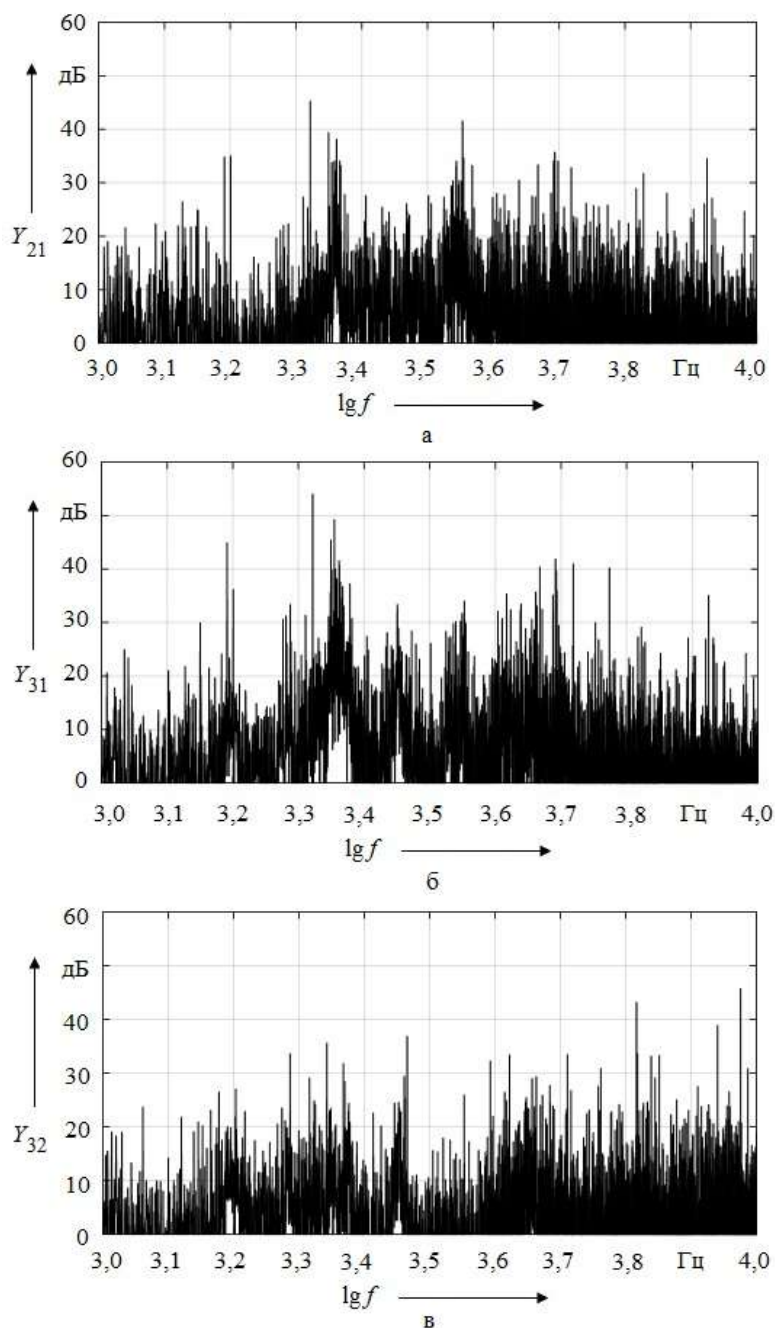


Рисунок 4 – Разность спектров мощности акустической эмиссии дисковых тормозов:
 а – в режиме торможения и в режиме холостого хода для классической конструкции;
 б – в режиме торможения и в режиме холостого хода для предлагаемой конструкции;
 в – в режиме торможения для традиционной и предлагаемой конструкций

Результаты обработки мнений экспертов

Терм	Мощность шума, дБ, в полосе частот 1 – 10 кГц						
	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 50	50 – 60	60 – 70	70 – 80
Очень низкий	4	2	0	0	0	0	0
	0,8	0,4	0	0	0	0	0
Низкий	1	3	2	0	0	0	0
	0,2	0,6	0,4	0	0	0	0
Ниже среднего	0	0	3	2	0	0	0
	0	0	0,6	0,4	0	0	0
Средний	0	0	0	3	2	0	0
	0	0	0	0,6	0,4	0	0
Выше среднего	0	0	0	0	3	2	0
	0	0	0	0	0,6	0,4	0
Высокий	0	0	0	0	0	3	1
	0	0	0	0	0	0,6	0,2
Очень высокий	0	0	0	0	0	0	3
	0	0	0	0	0	0	0,6
Невыносимо высокий	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0,2

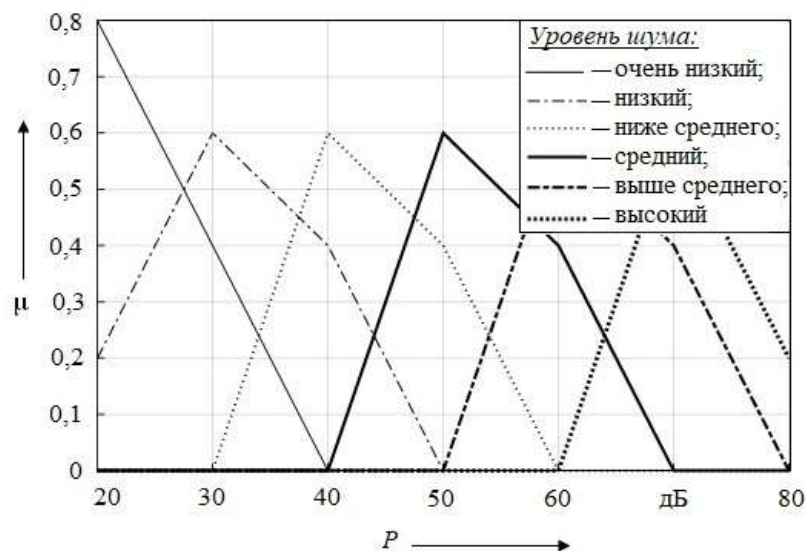


Рисунок 5 – Функции принадлежности шума различной мощности нечетким множествам для экспертной оценки дисковых тормозов по уровню шума

В заключение следует отметить, что приведенные результаты подтверждаются в той или иной степени при всех рассмотренных комбинациях угловой скорости тормозного диска и силы прижатия фрикционной пары. Поскольку такие комбинации режимов работы дискового тормоза перекрывают практически весь диапазон рабочих режимов, осуществляемых при торможении подвижных единиц, то можно сделать вывод, что дисковый тормоз с плавающей тормозной колодкой является малошумящим тормозом.

Список литературы

1. Результаты стендовых испытаний усовершенствованного клещевого механизма дискового тормоза с новыми тормозными накладками пассажирского вагона [Текст] / М. В. Гудас, Г. Н. Горюнов и др. // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / ВНИИЖТ. – М. – 2018. – Т. 77. – № 1. – С. 13 – 17.
2. Галай, Э. И. Дисковый тормоз для грузового вагона [Текст] / Э. И. Галай // Вагоны и вагонное хозяйство / Российские железные дороги. – М. – 2017. – № 1 (49). – С. 32, 33.

3. Курочкин, А. А. Создается отечественный дисковый тормоз для подвижного состава [Текст] / А. А. Курочкин, Е. С. Сипягин, А. А. Мошков // Локомотив / Российские железные дороги. – М. – 2017. – № 12 (732). – С. 32 – 35.
4. Курепин, Д. Е. Анализ уровней сверхнормативного шумового воздействия от железнодорожного транспорта [Текст] / Д. Е. Курепин // Известия Петербургского гос. университета путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб. – 2015. – № 1 (42). – С. 35 – 40.
5. Панин, А. В. Использование программного комплекса «Шум» для исследования шумового воздействия на окружающую среду железнодорожного транспорта [Текст] / А. В. Панин, А. М. Типус, О. В. Григорьева // Известия Петербургского гос. университета путей сообщения / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб. – 2005. – № 2 (4). – С. 3 – 6.
6. Зеленко, Ю. В. Современные подходы к контролю шума от подвижного состава и созданию шумовых карт железных дорог [Текст] / Ю. В. Зеленко, С. В. Мямлин, Л. А. Недужая // Транспорт Российской Федерации. – СПб: Т-Пресса. – 2015. – № 3 (58). – С. 50 – 53.
7. Подуст, С. Ф. Экспериментальные исследования шума и вибрации при движении пассажирских и скоростных поездов [Текст] / С. Ф. Подуст // Вестник Ростовского гос. университета путей сообщения / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов. – 2015. – № 2 (58). – С. 30 – 35.
8. Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB: Учебное пособие [Текст] / А. И. Солонина. – СПб: БХВ-Петербург, 2018. – 560 с.
9. Акустическая эмиссия при трении [Текст] / В. М. Баранов, Е. М. Кудрявцев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 254 с.
10. Панфилов, А. Н. Модель принятия решений на основе нечеткой информации [Текст] / А. Н. Панфилов, А. С. Погорелов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Моделирование. Теория, методы и средства» / Южно-Российский гос. политехн. ун-т. – Новочеркасск, 2013. – С. 59 – 62.
11. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.

References

1. Gudas M. V., Goryunov G. N., Sorokin S. A., Dement'ev S. A., Pazukhin D. Yu., Semenov A. A. Results of bench tests of an improved tick brake mechanism with a new brake pad of a passenger car [Rezultaty stendovyykh ispytaniy usovershenstvovannogo kleshchevogo mekhanizma diskovogo tormoza s novymi tormoznymi nakladkami passazhirskogo vagona]. *The VNIIZHT bulletin*, 2018, no. 1 (77), pp. 13 – 17.
2. Galai E. I. Disc brake for a freight wagon [Diskovyy tormoz dlya gruzovogo vagona]. *Wagons and rolling stock*, 2017, no. 1, pp. 32 – 33.
3. Kurochkin A. A., Sipyagin E. S., Moshkov A. A. A domestic disc brake for rolling stock is being created [Sozdayetsya otechestvennyy diskovyy tormoz dlya podvizhnogo sostava]. *The journal Locomotive*, 2017, no. 12, pp. 32 – 35.
4. Kurepin D. E. Analysis of the levels of excessive noise impact from rail transport [Analiz urovney sverkhnormativnogo shumovogo vozdeystviya ot zheleznodorozhnogo transporta]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2015, no. 1 (42), pp. 35 – 40.
5. Panin A. V., Tipus A. M., Grigorieva O. V. Using the «Shum» software package to study the noise impact on the environment of rail transport [Ispol'zovaniye programmnoy kompleksa «Shum» dlya issledovaniya shumovogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu zheleznodorozhnogo transporta]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2005, no. 2, pp. 3 – 6.
6. Zelenko Yu. V., Myamlin S. V., Neduzhaya L. A. Modern approaches to noise control from rolling stock and creation of noise maps of railways [Sovremennyye podkhody k kontrolyu shuma ot podvizhnogo sostava i sozdaniyu shumovyykh kart zheleznynykh dorog]. *Transport of the Russian Federation*, 2015, no. 3 (58), pp. 50 – 53.

7. Podust S. F. Experimental studies of noise and vibration during the movement of passenger and high-speed trains [Eksperimental'nyye issledovaniya shuma i vibratsii pri dvizhenii passazhir-skikh i skorostnykh poyezdov]. *Bulletin of Rostov Transport University*, 2015, no. 2, pp. 30 – 35.

8. Solonina A. I. *Tsifrovaya obrabotka signalov v zerkale MATLAB* (Digital Signal Processing in the MATLAB Mirror). St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2018, 560 p.

9. Baranov V. M. *Akusticheskaya emissiya pri trenii* (Acoustic emission in friction). Moscow: Energoatomizdat, 1998, 254 p.

10. Panfilov A. N., Pogorelov A. S. The decision-making model based on fuzzy information [Model' prinyatiya resheniy na osnove nechetkoy informatsii]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Modelirovaniye. Teoriya, metody i sredstva»* (Proceedings of the Int. scientific-practical conference «Modeling. Theory, methods and means») – Novocherkassk, 2013, pp. 59 – 62.

11. Shtovba S. D. *Proyektirvaniye nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* (Projecting fuzzy systems by means of MATLAB). Moscow: Hot line – Telecom, 2007, 288 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Войтенко Владимир Афанасьевич

Луганский национальный университет им. В. Даля (ЛНУ).

Молодежный кв., д. 20 а, г. Луганск, 91034.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Микро- и нанoeлектроника», ЛНУ.

Тел.: +380 (072) 161-70-10.

E-mail: vlvoytenko@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Voytenko Vladimir Afanasyevich

Vladimir Dahl Lugansk National University (LNU).

20 A, Molodyozhny qu., Lugansk, 91034.

Ph. D. in Engineering, Docent, Head of the department «Micro- and Nanoelectronics», LNU.

Phone: +380 (072) 161-70-10.

E-mail: vlvoytenko@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Войтенко, В. А. Шумовые характеристики дискового тормоза с плавающей тормозной колодкой [Текст] / В. А. Войтенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 11 – 19.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Voytenko V. A. Noise characteristics of the disc brake with floating brake pad. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 3, no 35, pp. 11 – 19 (In Russian).

УДК 004.94:629.423.1:625.1.032.3

Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, Д. Ю. Дроглов

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОБОКСОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ С УРАВНИТЕЛЯМИ

Аннотация. Развитие тягового подвижного состава тесно сопряжено с увеличением максимальной силы тяги по сцеплению колес с рельсами. Негативным фактором в этом аспекте развития является боксование. В статье предложен новый способ защиты от боксования колесных пар электровозов 2(3)ЭС5К «Ермак». Способ подразумевает перераспределение тяговых усилий между колесными парами и минимизацию подсыпки песка. В статье рассмотрены принцип работы противобоксовочной системы и принципиальная схема силовой части, проведено моделирование некоторых режимов боксования колесных пар в программном пакете Multisim.

Ключевые слова: боксование, противобоксовочная система, электровоз, сцепление, Multisim.

Yuri A. Davydov, Artem K. Plyaskin, Denis Yu. Drogolov

Far Eastern State Transportation University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

INVESTIGATION OF ANTI-SLIP SYSTEM WITH EQUIPMENT

Abstract. The development of traction rolling stock is closely associated with an increase in the maximum traction force for adhesion the wheels to the rails. The negative factor in this aspect of development is slipping. The article proposes a new method of protection against slipping of wheel sets of electric locomotives 2(3)ES5K «Ermak». The method implies redistribution of tractive forces between wheel sets and minimization of sanding. The paper discusses the principle of operation of the anti-slip system and the principle circuit of the power section, and simulates some modes of wheel sets in the Multisim software package.

Keywords: slipping, traction control system, electric locomotive, adhesion, Multisim.

На протяжении 10 лет (2006 – 2015 гг.) Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ) поставлял новые локомотивы на Дальневосточную железную дорогу (ДВЖД). За этот период в парке приписки ТЧЭ-8 «Смоляниново» был закреплен 91 электровоз серии 2ЭС5К и 54 электровоза серии 3ЭС5К. В свою очередь эксплуатационное локомотивное депо «Хабаровск-II» за аналогичный период получило 31 электровоз серии 2ЭС5К и 168 электровозов серии 3ЭС5К [1]. В настоящее время электровозы 2(3)ЭС5К «Ермак» остаются основными грузовыми локомотивами Дальневосточной железной дороги.

Однако эксплуатация данных электровозов не ограничивается исключительно границами ДВЖД. Так, Забайкальская, Восточно-Сибирская и Октябрьская железные дороги по соответствующим эксплуатационным депо «Чита», «Вихоревка» и «Кандалакша» также относятся к категории основных эксплуатантов указанных электровозов. В январе 2018 г. начались поставки электровозов 2(3)ЭС5К на Красноярскую железную дорогу в эксплуатационное локомотивное депо «Абакан-II».

Одним из критериев улучшения технико-экономических показателей подвижного состава согласно целям «Стратегии развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года» [2] является повышение производительности локомотивов на 18,2 %.

В свою очередь повышение производительности локомотивов можно осуществить за счет улучшения их тягово-сцепных свойств. Это позволит увеличить длину и массу грузовых поездов. Стоит отметить, что в настоящее время условия сцепления колеса с рельсом являются одним из определяющих факторов ограничения максимальной силы тяги. Исходя из этого критическая масса поезда вычисляется через расчетный коэффициент сцепления. Однако он часто, не равен действительному коэффициенту сцепления, который зависит от множества факторов и достаточно вариативен.

Широкий диапазон изменения действительного коэффициента сцепления зависит от таких особенностей электровозов: вида тяговой характеристики, диаметра бандажей колесных пар, соответствия характеристик и схемы соединения тяговых электродвигателей, развески локомотива. Все это оказывает значительное влияние на сцепные свойства электровоза и при негативном сценарии может способствовать развитию боксования, что непосредственно снижает тяговые возможности электровоза.

Предложенный в статье [3] вариант модернизации электровозов «Ермак» противобоксочной системой с уравнивателями может нивелировать проблему боксования через увеличение жесткости тяговых характеристик.

Противобоксочная система с электрическими уравнивателями обеспечивает перераспределение тяговых усилий между боксующими и небоксующими колесными парами, уменьшение скорости проскальзывания боксующих колесных пар, а также автоматическую дозированную подачу песка под боксующую секцию электровоза.

Подключение системы уравнивателей производится к «средним точкам» всех четырех тяговых электродвигателей в секции. Схема подключения представлена на рисунке 1.

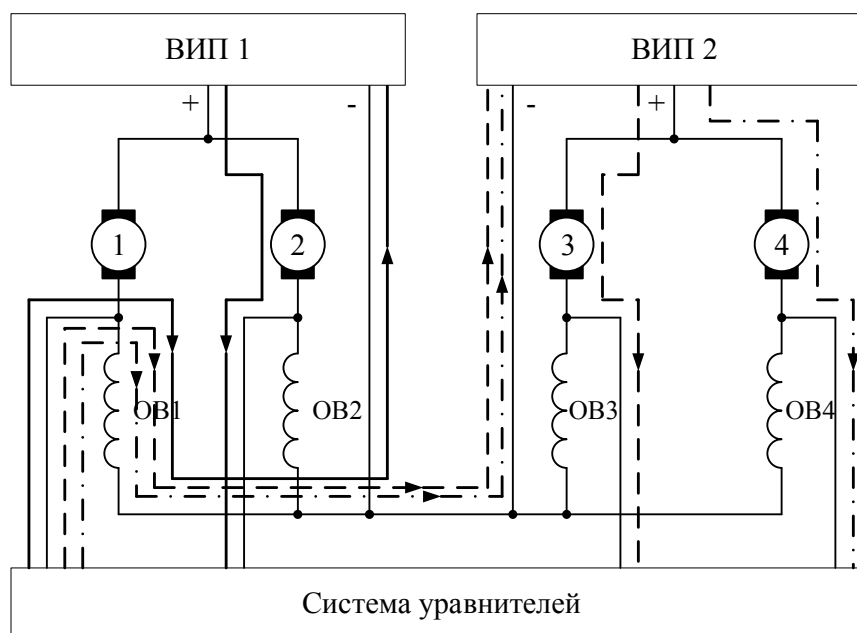


Рисунок 1 – Схема подключения системы уравнивателей

В статическом состоянии (без боксования) «средние точки» всех двигателей имеют очень близкие потенциалы, а небольшой уравнительный ток компенсируется системой уравнивателей. При возникновении боксования ток якоря боксующего двигателя снижается, что приводит к уменьшению потенциала его «средней точки» по отношению к потенциалам «средних точек» других тяговых двигателей секции. Под действием этой разности потенциалов начинают протекать уравнительные токи, подпитывающие обмотку возбуждения боксующего двигателя. В результате этого скорость его вращения уменьшается и процесс боксования прекращается.

Снижение скорости проскальзывания колес при боксовании система электрических уравнивателей осуществляет следующим образом: при возникновении боксования на двигателе № 1 уменьшится ток, протекающий по якорной обмотке, в результате этого можно говорить об уменьшении потенциала средней точки двигателя № 1 по отношению к потенциалам средних точек остальных тяговых двигателей секции. Эта разность потенциалов вызывает появление уравнительного тока, протекающего по следующим контурам:

контур первый (сплошная линия): «плюс» выпрямительно-инверторного преобразователя №1 (ВИП-1) – якорь двигателя № 2 – система уравнивателей – обмотка возбуждения двигателя №1 – (ОВ-1) – «минус» ВИП-1;

контур второй (пунктирная линия): «плюс» ВИП-2 – якорь двигателя № 3 – система уравнивателей – ОВ-1 – «минус» ВИП-2;

контур третий (штрихпунктирная линия): «плюс» ВИП-2 – якорь двигателя № 4 – система уравнивателей – ОВ-1 – «минус» ВИП-2.

Таким образом, боксование первого двигателя вызывает перераспределение нагрузки между остальными двигателями в секции электровоза и одновременную подпитку его собственной обмотки возбуждения уравнительным током. В результате подвозбуждения боксующего двигателя увеличивается «жесткость» его характеристики и, следовательно, уменьшается скорость проскальзывания связанной с ним колесной пары. Характер перераспределения нагрузки между небоксующими двигателями зависит от разброса характеристик электрического оборудования конкретного локомотива (ТЭД, индуктивные шунты) и системы уравнивателей.

Усовершенствованная принципиальная схема силовой части системы уравнивателей изображена на рисунке 2.

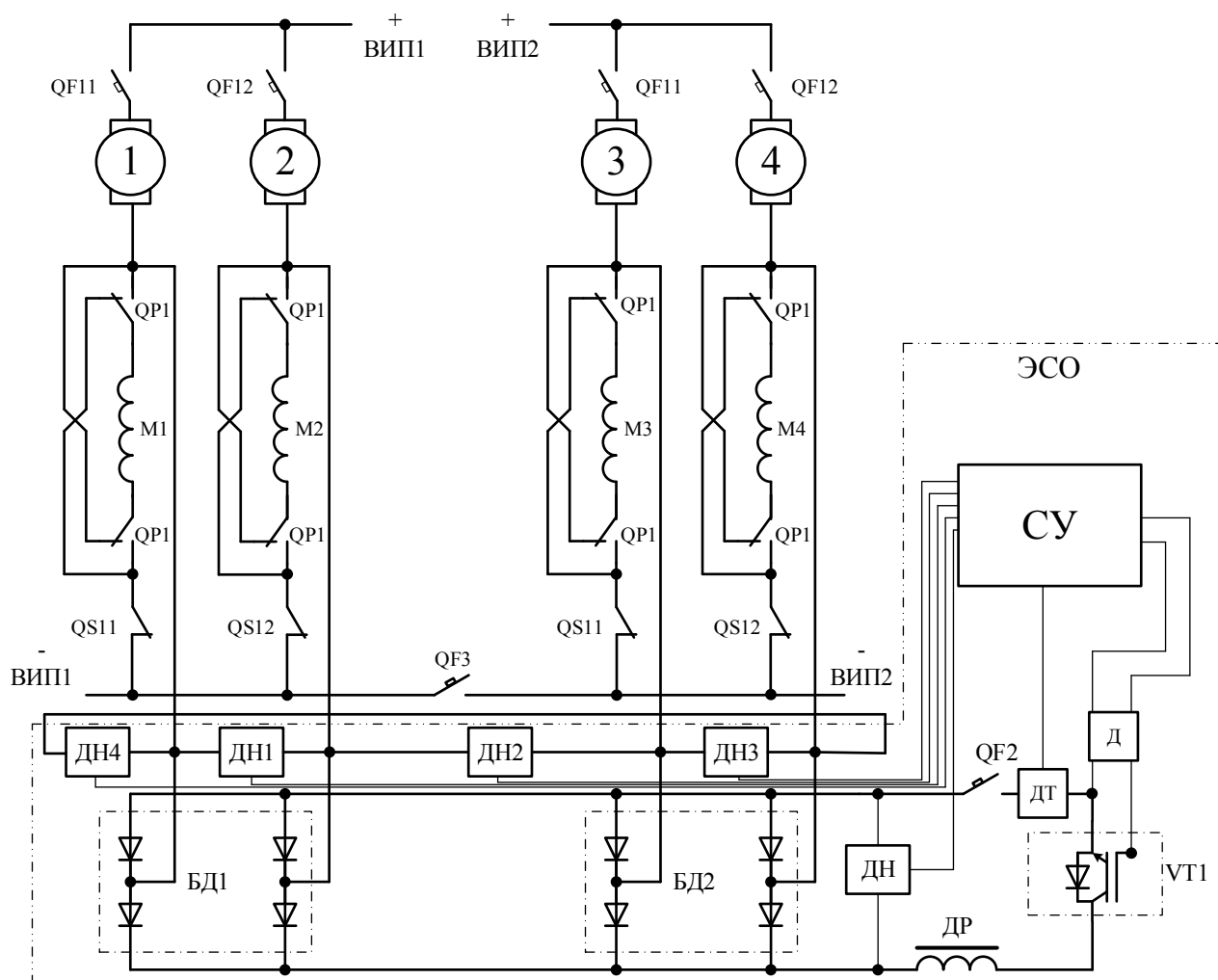


Рисунок 2 – Усовершенствованная силовая схема электрических уравнивателей

Блоки диодных уравнивателей (БД1 и БД2) обеспечивают протекание уравнивательных токов между всеми тяговыми двигателями секции электровоза. Система управления (СУ) по сигналу с датчиков определяет наличие боксования и по необходимости дает команду драйверу IGBT-модуля, а также управляет электропневматическими вентилями «песочниц» электровоза. Автоматический быстродействующий выключатель QF2 защищает оборудование от аварийного уравнивательного тока, например, при круговом огне на коллекторе. Сглаживающий дроссель ДР ограничивает скорость нарастания аварийного тока. IGBT-модуль служит в качестве «ключа» электрической цепи системы уравнивателей, управляющее напряжение на который подается через драйвер (Д).

Принцип работы силовой схемы системы ЭСО заключается в следующем. Датчик напряжения (ДН) фиксирует величину разности потенциалов, возникающую из-за разброса характеристик тяговых двигателей. В статическом состоянии (без боксования) управляющее напряжение на IGBT-модуль не подается, что соответствует его закрытому режиму работы. В состоянии боксования система управления при помощи драйвера полностью открывает IGBT-модуль, что способствует беспрепятственному протеканию уравнивательных токов. Величина уравнивательного тока измеряется датчиком ДТ, сигнал с которого поступает в систему управления.

В программном пакете Multisim была собрана схема силовых цепей электровоза 2ЭС5К [4], оборудованная системой уравнивателей (рисунок 3).

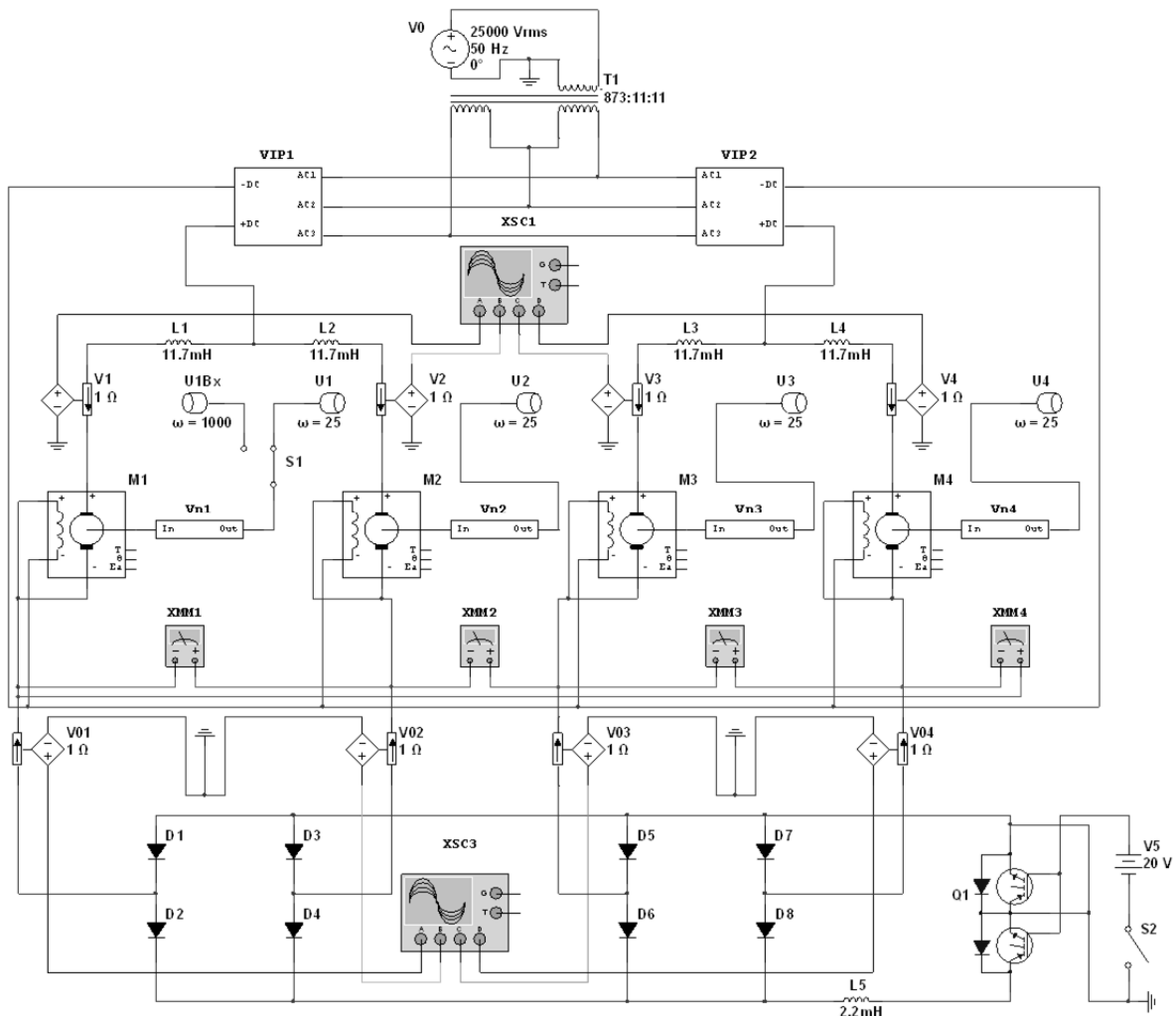


Рисунок 3 – Модель секции электровоза «Ермак» в прикладном пакете Multisim

На рисунке 3 тяговый трансформатор ОНДЦЭ-4350/25 представлен блоком T1 с напряжением первичной обмотки 25000 В и количеством витков на первичной обмотке 873, на вторичных – по 11 витков [5].

Тяговые электродвигатели НБ-514Б представлены блоками M1–M4 DC_MACHINE_WOUND_FIELD с параметрами, указанными в источнике [6].

Выпрямительно-инверторный преобразователь ВИП-4000М-УХЛ2 [6] представлен под-схемами VIP1 и VIP2 и работает на второй зоне регулирования. В качестве тиристорov T353-800 выбраны максимально приближенные по параметрам тиристоры 2N6405.

Нагрузка на тяговые электродвигатели задается через подсхемы Vn1 – Vn4 при помощи элементов U1 – U4 ARBITRARY_LOAD, на которых регулируется скорость электровоза.

Элемент GEARS моделирует зубчатую передачу электровоза с коэффициентом редукции, указанным в Руководстве [8], и имеет обозначение U5.

Система уравнивателей представлена блоками диодов D1 – D8, индуктивным шунтом L5, являющимся моделью ИШ-009 [5], и IGBT-транзистором IRGTIN075M12, имеющим обозначение Q1. Управление IGBT-транзистором производится за счет подачи управляющего напряжения от источника V5 через размыкатель S2.

Мультиметры XMM1 – XMM4, работающие в качестве датчиков напряжения, измеряют величину разности потенциалов между средними точками тяговых электродвигателей M1 – M4.

Графики токов тяговых электродвигателей снимаются с помощью элемента CURRENT_CONTROLLED_VOLTAGE_SOURCE. Токи якорей фиксируются датчиками V1 – V4, а уравнительные токи – датчиками V01 – V04 и передаются на осциллографы XSC1 и XSC3 соответственно.

В ходе моделирования были исследованы несколько видов боксования: боксование колесных пар одного тягового электродвигателя (ТЭД), боксование колесных пар двух тяговых электродвигателей как от одного ВИПа, так и от разных и боксование при разности диаметров бандажей колесных пар.

В процессе моделирования было подтверждено, что после начала боксования ток боксующего двигателя начинает снижаться по отношению к токам других тяговых двигателей (рисунок 4), а показания датчиков напряжения зафиксировали появление существенной разности потенциалов между средними точками ТЭД (рисунок 5).

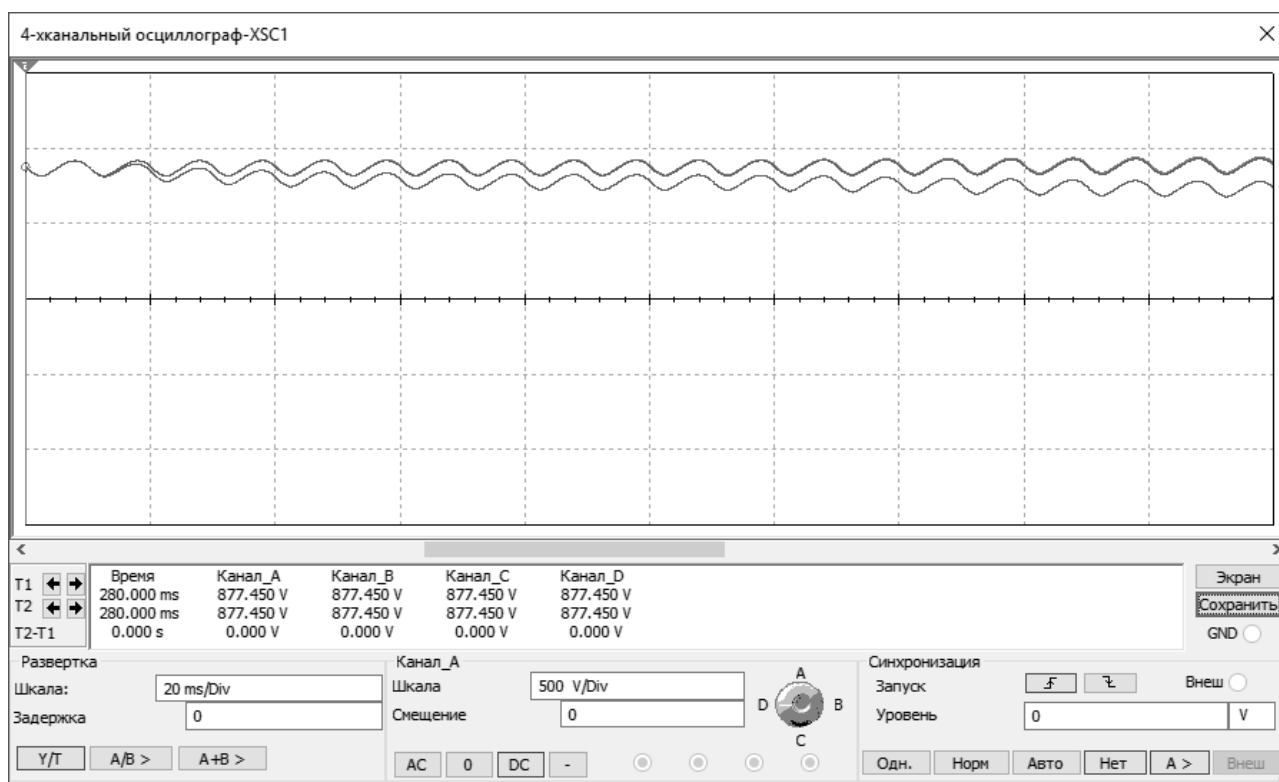


Рисунок 4 – Токи якорей ТЭД при начале боксования

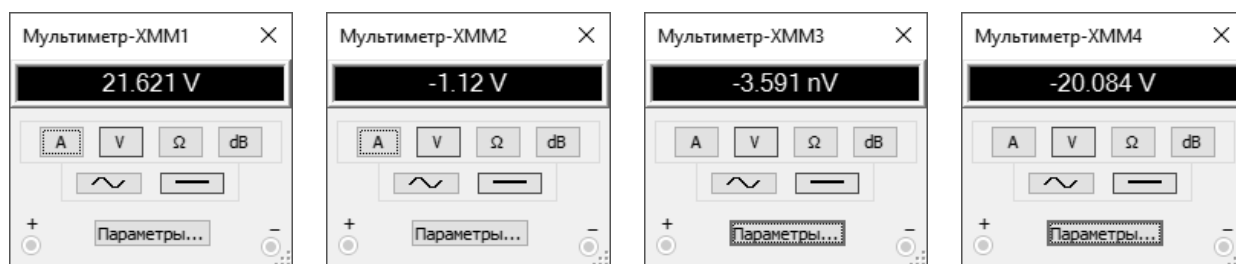


Рисунок 5 – Величина напряжений между средними точками ТЭД при боксовании:
а – между 1 и 2 ТЭД; б – между 2 и 3 ТЭД; в – между 3 и 4 ТЭД; г – между 4 и 1 ТЭД

После сигнала с датчика напряжения о начавшемся боксовании происходит открытие IGBT-транзистора и начинается процесс перетекания уравнительных токов (рисунок 6), причем уравнительный ток соседствующего с боксующим ТЭД превышает уравнительные токи, исходящие от двигателей, подключенных к другому выпрямительно-инверторному преобразователю.

зователю (ВИПу). Процесс окончания боксования сопровождается постепенным выравниванием токов всех ТЭД (рисунок 7).

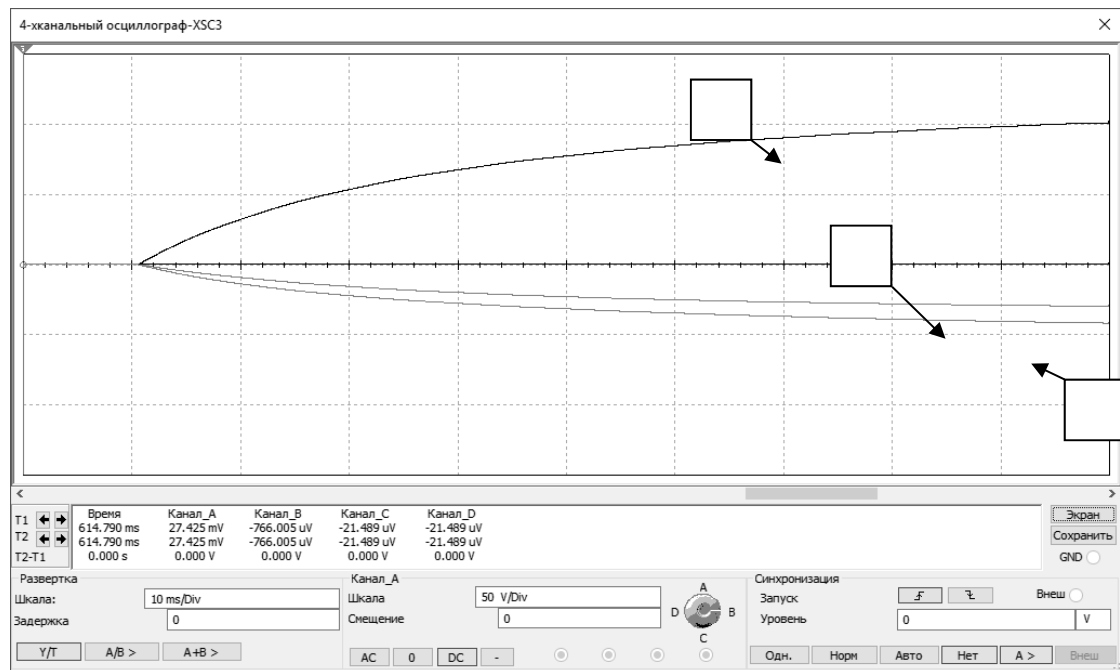


Рисунок 6 – Осциллограмма уравнивающих токов:
1 – ток подпитки ТЭД боксующей колесной (КП); 2 – токи от ТЭД другого ВИПа;
3 – уравнивающий ток от соседствующего с боксующей КП ТЭД

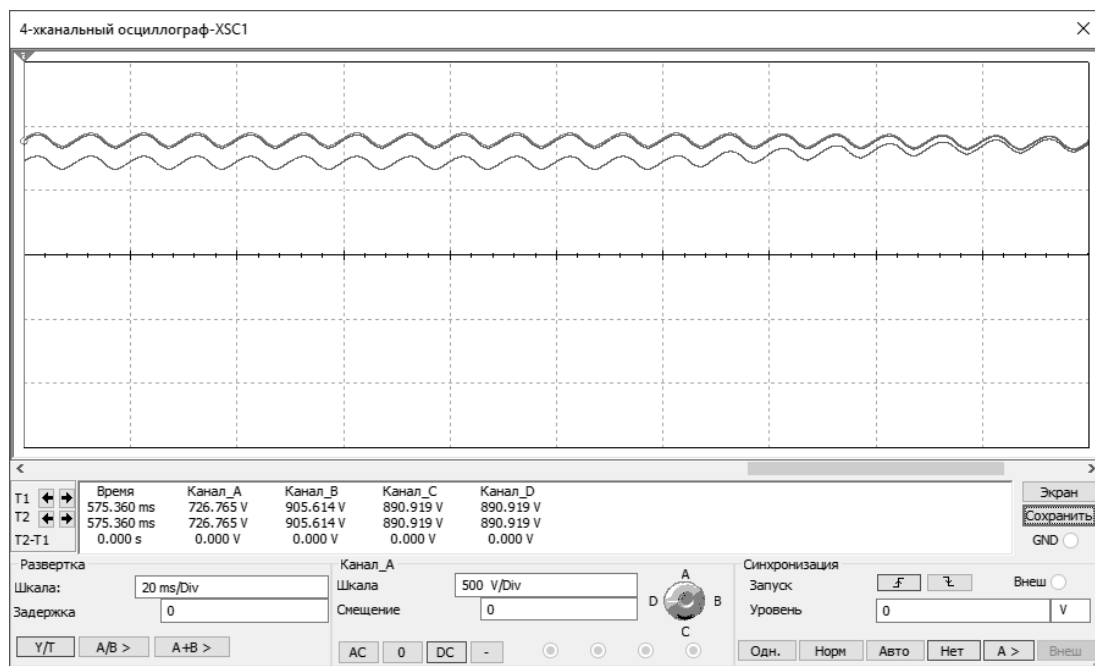


Рисунок 7 – График токов ТЭД в процессе окончания боксования одной КП

В ситуации возникновения боксования колесных пар двух ТЭД, питаемых как от одного ВИПа, так и от разных, протекание уравнивающих токов равномерно распределяется между двумя ТЭД боксующих и двумя ТЭД небоксующих колесных пар.

Электровозы «Ермак» имеют номинальный диаметр КП по кругу катания 1250 мм [8]. Руководством по эксплуатации [8] устанавливается, что допустимо устанавливать КП с диаметром не менее 1205 мм, причем у комплекта колесных пар, подкатываемых под электровоз, разница диаметров бандажей не должна превышать 8 мм.

Производилось моделирование наихудших условий. Для этого были приняты диаметры бандажа одной КП 1205 мм, а другой – 1213 мм.

В результате моделирования было установлено, что наличие разности диаметров бандажей колесных пар несущественно увеличивает разность потенциалов в статическом режиме, а в случае возникновения боксования величина уравнительного тока, подпитывающего обмотку возбуждения боксующего ТЭД, повышается на 10 – 15 А.

Предлагаемая обновленная противобоксовочная система позволит повысить тяговые и эксплуатационные характеристики локомотивов, снизить износ бандажей колесных пар и рельсов. Внедрение в эксплуатацию данной системы в рамках модернизации электровозов или тепловозов с тяговыми двигателями постоянного тока является одним из шагов к снижению издержек на восстановление бандажей и рельсов, а также к увеличению скорости и нормы перевозимых грузов по сети железных дорог.

Список литературы

1. TRAINPIX [Электронный ресурс]: Железнодорожная фотогалерея, 2009. – Режим доступа: <https://trainpix.org>
2. Об утверждении «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» и плана мероприятий на 2008 – 2015 годы по ее реализации [Текст]: Постановление Правительства РФ [принято 17 июня 2008 г. № 877-р] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008. – № 29. – Ст. 3537.
3. Доронин, С. В. Модернизация электровозов противобоксовочной системой с уравнителями на IGBT-транзисторах [Текст] / С. В. Доронин, Д. Ю. Дроголов // Вестник института тяги и подвижного состава / Институт тяги и подвижного состава. – М. – 2015. – № 11. – С. 20 – 22.
4. Дядичко, В. Я. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Кн. 1. Описание и работа. Электрические схемы [Текст]: Руководство по эксплуатации / В. Я. Дядичко / ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 2006. – 266 с.
5. Аманатиди, Д. С. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Кн. 4. Описание и работа. Электрические аппараты и оборудование [Текст]: Руководство по эксплуатации / Д. С. Аманатиди / ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 2004. – 270 с.
6. Гаврилов, И. Б. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Кн. 3. Описание и работа. Электрические машины [Текст]: Руководство по эксплуатации / И. Б. Гаврилов / ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 2004. – 35 с.
7. Родимушкина, Г. Н. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Кн. 5: Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи [Текст]: Руководство по эксплуатации / Г. Н. Родимушкина / ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 2005. – 165 с.
8. Андрющенко, А. А. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Кн. 6: Описание и работа. Механическая часть [Текст]: Руководство по эксплуатации / А. А. Андрющенко / ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 2004. – 66 с.

References

1. TRAINPIX (railway photo gallery), 2009. Access mode: <https://trainpix.org>.
2. *Ob utverzhdenii Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii do 2030 goda i plana meropriyatij na 2008 – 2015 gody po ee realizacii* (On the approval of the Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030 and the Action Plan for 2008 – 2015 for its implementation (decree of the RF Government). Collection of Legislation of the Russian Federation, 2008, no. 29, art. 3537.
3. Doronin S. V., Drogolov D. Yu. Modernization of electric locomotives with anti-slipping system with equalizers on IGBT-transistors [Modernizatsiya elektrovozov protivoboksovochnoy sistemoy s uravnitel'yami na IGBT-tranzistorakh]. *Bulletin of the Institute of traction and rolling stock*, 2015, no. 11, pp. 20 – 22.

4. Dyadichko V. Ya. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Kniga 1: Opisaniye i rabota. Elektricheskiye skhemy* (Electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Book 1: Description and work. Electrical circuits). Novocherkassk: VELNII, 2006, 266 p.

5. Amanatidi D. S. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Kniga 4: Opisaniye i rabota. Elektricheskiye apparaty i oborudovaniye* (Electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Book 4: Description and work. Electrical apparatus and equipment). Novocherkassk: VELNII, 2004, 270 p.

6. Gavrillov I. B. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Kniga 3: Opisaniye i rabota. Elektricheskiye mashiny* (Electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Book 3: Description and work. Electric machines). Novocherkassk: VELNII, 2004, 35 p.

7. Rodimushkina G. N. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Kniga 5: Opisaniye i rabota. Elektronnoye oborudovaniye. Preobrazovateli* (Electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Book 5: Description and work. Electronic equipment. Converters). Novocherkassk: VELNII, 2005, 165 p.

8. Andryuschenko A. A. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K). Kniga 6: Opisaniye i rabota. Mekhanicheskaya chast'* (Electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Book 6: Description and work. Mechanical part). Novocherkassk: VELNII, 2004, 66 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Давыдов Юрий Анатольевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт железных дорог», ректор, ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 407-700.

E-mail: root@festu.khv.ru

Пляскин Артем Константинович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Транспорт железных дорог», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 407-097.

E-mail: loc@festu.khv.ru

Дроголов Денис Юрьевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Транспорт железных дорог», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 407-689.

E-mail: drogolov@festu.khv.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Давыдов, Ю. А. Исследование противобоксочной системы с уравнивателями [Текст] / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, Д. Ю. Дроголов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 19 – 27.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Davydov Yuri Anatolievich

Far Eastern State Transportation University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Railway transport», rector, FESTU.

Phone: +7 (4212) 407-700.

E-mail: root@festu.khv.ru

Plyaskin Artem Konstantinovich

Far Eastern State Transportation University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Docent of the department «Railway transport», FESTU.

Phone: +7 (4212) 407-097.

E-mail: loc@festu.khv.ru

Drogolov Denis Yurievich

Far Eastern State Transportation University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Railway transport», FESTU.

Phone: +7 (4212) 407-689.

E-mail: drogolov@festu.khv.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Davydov Yu. A., Plyaskin A. K., Drogolov D. Yu.. Investigation of anti-slip system with equipment. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 3, no 35, pp. 19 – 27 (In Russian).

УДК 629.421.1

В. С. Иванов, О. В. Мельниченко

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ИНВЕРТОРА НА БАЗЕ ТИРИСТОРОВ И IGBT-ТРАНЗИСТОРОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Аннотация. В данной статье авторами проведено исследование электромагнитных процессов инвертора на базе тиристоров и IGBT-транзисторов электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения. Для осуществления поставленной задачи применялся метод составления мгновенных схем замещения и систем дифференциальных уравнений, соответствующие определенному интервалу времени диаграммы выпрямленного напряжения и токов плеч инвертора. На основании проведенного исследования приведены недостатки тиристорного инвертора и преимущества транзисторного.

Ключевые слова: тиристор, IGBT-транзистор, инвертор, схема замещения, алгоритм управления, электропоезд, электромагнитный процесс, коммутация, зона регулирования.

Vladislav S. Ivanov, Oleg V. Melnichenko

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

THEORETICAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES INVERTER BASED ON THYRISTORS AND IGBT-TRANSISTORS OF AN ELECTRIC TRAIN OF AN ALTERNATING CURRENT IN THE MODE OF REGENERATIVE BRAKING

Abstract. In this article, the authors have studied the electromagnetic processes of an inverter based on thyristors and IGBT transistors of an AC electric train in the regenerative braking mode. To accomplish this task, a method was used to compose instantaneous replacement schemes and systems of differential equations corresponding to a certain time interval of the rectified voltage diagram and the currents of the inverter arms. On the basis of the study were given the disadvantages of thyristor inverter and the advantages of transistor.

Keywords: thyristor, IGBT-transistor, inverter, equivalent circuit, control algorithm, electric train, electromagnetic process, switching, control area,

В настоящее время большая часть эксплуатируемого парка моторвагонного подвижного состава (МВПС) российских железных дорог не имеет рекуперативного торможения. Начиная лишь с 2012 г., Демиховский машиностроительный завод осуществляет производство электропоездов с данным ресурсосберегающим режимом [1, 2]. Это электропоезда серий ЭД9Э и ЭПЗД, их преобразователи выполнены на базе силовых тиристоров [3]. Как показывает полувековая практика, тиристорная база, применяемая на электроподвижном составе (ЭПС), имеет множество недостатков:

значительное потребление электроэнергии на тягу электропоезда (коэффициенты мощности – 0,84 и 0,6) в режимах тяги и рекуперативного торможения;

вызывает потери активной электроэнергии в системе тягового электроснабжения;

вызывает высокочастотное искажение форм напряжения и тока контактной сети, что снижает надежность и ресурс работы электронного и электрического оборудования электропоезда;

вызывает загрузку тяговой сети реактивной энергией, что снижает пропускную способность тягового участка в целом и др. [4].

С момента появления IGBT-транзисторов имеется возможность проектирования новых выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИПов) на их базе [9]. Применение IGBT-транзисторов в силовой схеме электропоезда переменного тока и способов их управления позволит устранить недостатки, которые существуют на МВПС с тиристорной базой.

Для пояснения недостатков существующей тиристорной базы преобразователей МВПС и преимуществ разработанного инвертора на основе IGBT-транзисторов авторами настоящей статьи проведен анализ электромагнитных процессов, протекающих в данных преобразователях в режиме рекуперативного торможения.

Для рассмотрения каждого интервала электромагнитного процесса (рисунок 2) приводится мгновенная схема его замещения (рисунок 3), для которой определяются контуры протекания тока, задаются направления протекания тока в ветвях, находятся общие для контуров узлы и согласно второму закону Кирхгофа составляются уравнения, которые описывают изменения токов в данный интервал времени [5]. Все мгновенные схемы замещения штатного инвертора приводятся для электропоездов переменного тока серий ЭД9Э и ЭПЗД.

Инвертор обеспечивает питание цепи выпрямленного тока, состоящей из двух параллельных ветвей, в которой последовательно соединены два тяговых электродвигателя. На каждую цепь последовательно соединенных ТЭД приходится по три сглаживающих реактора (СР) и по два балластных резистора [6]. Работа тиристорного инвертора осуществляется согласно штатному алгоритму управления (рисунок 1) [7]. Для упрощения силовой цепи инвертора на схемах замещения показаны для каждой из параллельных ветвей по одному СР и балластному резистору.

Зона регулирования	Направление ЭДС трансформатора	Плечи ВИПа							
		V/S1	V/S2	V/S3	V/S4	V/S5	V/S6	V/S7	V/S8
IV	→	—	β	α_p	—	—	—	β	—
	←	β	—	—	α_p	—	—	—	β
III	→	—	—	—	β	α_p	—	β	—
	←	—	—	β	—	—	α_p	—	β
II	→	—	β	α_p	—	β	—	—	—
	←	β	—	—	α_p	—	β	—	—
I	→	—	—	—	α_p	α_p	—	—	—
	←	—	—	α_p	—	—	α_p	—	—

Рисунок 1 – Алгоритм управления тиристорным инвертором

При расчетах индуктивность цепи выпрямленного тока заменяется эквивалентной индуктивностью, рассчитываемой по формуле

$$L_{гз} = \frac{1}{2}(3L_{CP} + 2L_{я} + 2L_{дп}), \quad (1)$$

где L_{CP} – индуктивность СР;

$L_{я}$ – индуктивность обмотки якоря;

$L_{дп}$ – индуктивность добавочных полюсов (ДП).

Активное сопротивление цепи выпрямленного тока заменяется эквивалентным активным сопротивлением, которое рассчитывается по формуле

$$r_{гз} = \frac{1}{2}(3r_{CP} + 2r_{я} + 2r_{дп} + r_{б1} + r_{б2}), \quad (2)$$

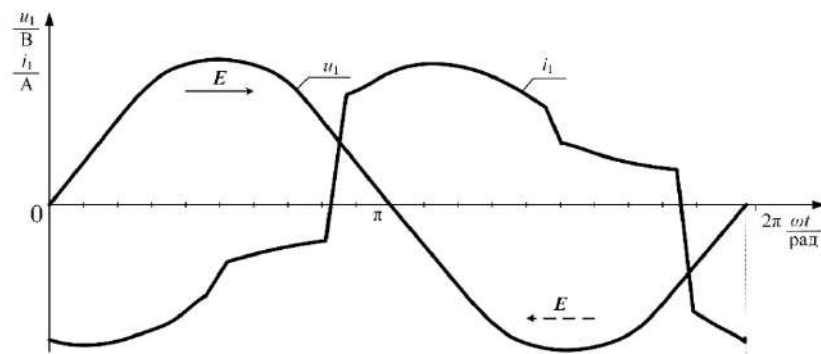
где r_{CP} – активное сопротивление СР;

$r_{я}$ – активное сопротивление обмотки якоря;

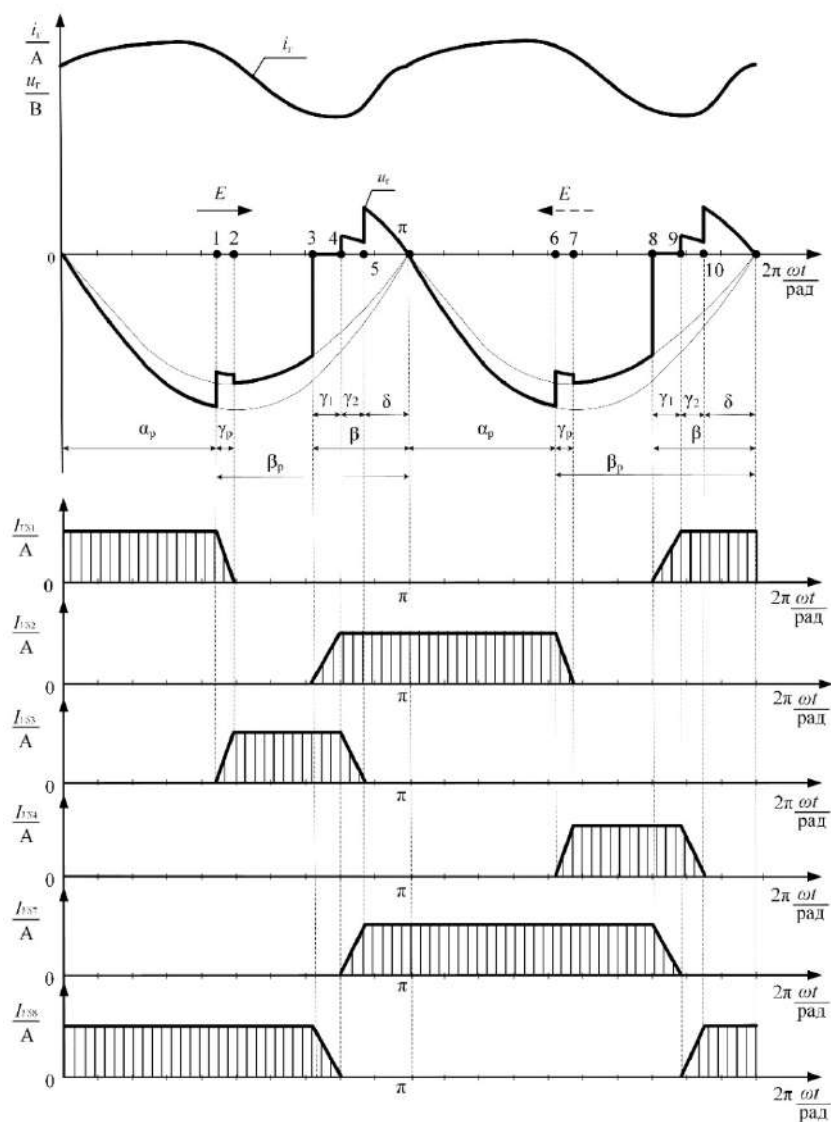
$r_{дп}$ – активное сопротивление добавочных полюсов;

$r_{б1}$ – активное сопротивление первого балластного резистора;

$r_{б2}$ – активное сопротивление второго балластного резистора.



а



б

Рисунок 2 – Диаграммы напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора (а) выпрямленного напряжения и токов плеч тиристорного инвертора (б) в режиме рекуперативного торможения электропоезда со штатным алгоритмом управления на четвертой зоне регулирования:

u_1 – напряжение сети; i_1 – ток сети; u_r – напряжение инвертора; i_r – ток инвертора;

I_{VS_n} – ток в n -м плече инвертора

Для упрощенной записи падения напряжения на тиристорах плеча используется формула

$$\Delta U_{VS_n} = \Delta U_{VS} \cdot N, \quad (3)$$

где n – номер плеча;

ΔU_{VS} – падение напряжения на тиристоре плеча;

N – количество последовательно включенных элементов в ветви плеча.

Для упрощенной записи падения напряжения в цепи выпрямленного тока используется формула

$$\Delta U_r = i_r \cdot r_{r3}, \quad (4)$$

где i_r – ток в цепи выпрямленного тока;

r_{r3} – эквивалентное активное сопротивление цепи выпрямленного тока.

Индуктивности обмоток трансформатора обозначим как L_{k-m} , а ЭДС обмоток трансформатора – E_{k-m} , где k и m – номера выводов вторичной обмотки тягового трансформатора.

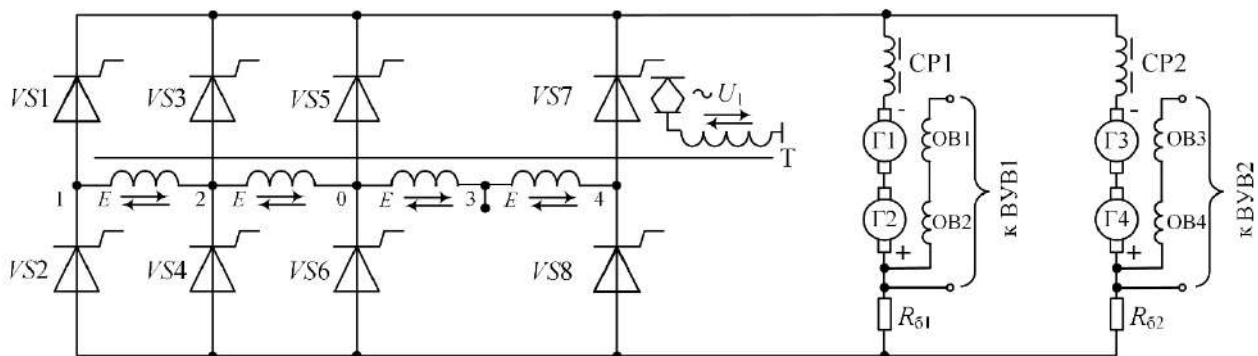


Рисунок 3 – Схема замещения тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя МВПС

Исследуем электромагнитные процессы при электродвижущей силе (ЭДС), обозначенной сплошной стрелкой в полупериоде питающего напряжения (см. рисунок 2). Ток, вырабатываемый тяговыми двигателями, протекает через тиристоры плеч инвертора $VS1$ и $VS8$, этому соответствует интервал 0 – 1 на рисунке 2. Мгновенная схема замещения инвертора во временном интервале 0 – 1 показана на рисунке 4, а. Контур протекания тока на этом интервале:

– вторичная обмотка 1 – 4, плечо $VS1$ – $\left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \\ CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle$ – плечо $VS8$.

Для временного интервала 0 – 1 получим уравнение

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_{1-4} + E_r - \Delta U_{vs1} - \Delta U_r - \Delta U_{vs8}}{L_{1-4} + L_{r3}}, \quad (5)$$

где E_r – напряжение генератора.

Начиная с момента времени, соответствующего точке 1 на диаграмме выпрямленного напряжения, управляющий импульс α_p подается на тиристоры плеча $VS3$ (см. рисунок 2). После этого возникает коммутация тока с длительностью γ_p с плеча $VS1$ на плечо $VS3$ инвертора. На данном интервале образуются два контура протекания тока:

- вторичная обмотка 1 – 4, плечо $VS1$ – $\left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \\ CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle$ – плечо $VS8$;
- вторичная обмотка 1 – 2, плечо $VS3$, плечо $VS1$.

Необходимо определить также общий для этих контуров узел и задаться направлением протекания тока в ветвях $(i_r, i_{\gamma_p}, i_r')$.

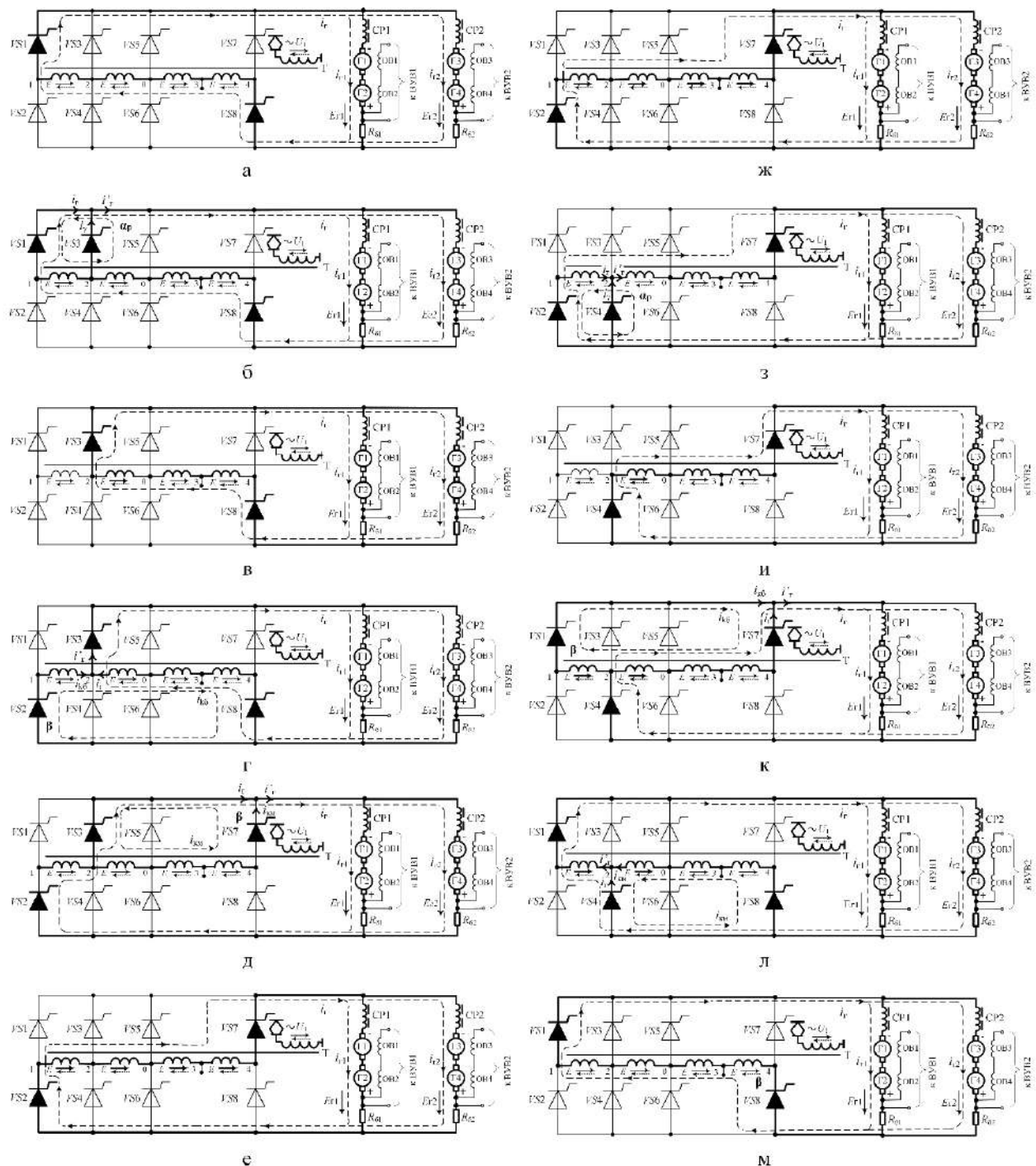


Рисунок 4 – Мгновенные схемы замещения тиристорного инвертора электропоезда на четвертой зоне регулирования: а: 0 – 1; б: 1 – 2; в: 2 – 3; г: 3 – 4; д: 4 – 5; е: 5 – π ; ж: π – 6; з: 6 – 7; и: 7 – 8; к: 8 – 9; л: 9 – 10; м: 10 – 2π

Для временного интервала 1 – 2 получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{\Gamma}}{dt} = \frac{E_{1-4} + E_{\Gamma} - \Delta U_{vs1} - \Delta U_{\Gamma} - \Delta U_{vs8}}{L_{1-4} + L_{\Gamma 3}}; \\ \frac{di_{\gamma p}}{dt} = \frac{E_{1-2} + \Delta U_{vs1} - \Delta U_{vs3}}{L_{1-2}}; \\ i_{\Gamma} + i_{\gamma p} - i'_{\Gamma} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Мгновенная схема замещения инвертора во временном интервале 1 – 2 изображена на рисунке 4, б.

После завершения фазовой коммутации γ_p ток в инверторе будет протекать через тиристоры плеч $VS3$ и $VS8$, что соответствует временному интервалу 2 – 3. Контур протекания тока на этом интервале:

– вторичная обмотка 2 – 4, плечо $VS3$ – $\langle CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \rangle$ – плечо $VS8$.

Для временного интервала 2 – 3 получаем уравнение

$$\frac{di_{\Gamma}}{d_t} = \frac{E_{2-4} + E_{\Gamma} - \Delta U_{vs3} - \Delta U_{\Gamma} - \Delta U_{vs8}}{L_{2-4} + L_{\Gamma 3}}. \quad (7)$$

Мгновенная схема замещения инвертора во временном интервале 2 – 3 показана на рисунке 4, в.

Далее, в момент времени, соответствующий углу опережения β , точка 3, производится подача управляющих импульсов на тиристоры плеч $VS2$ и $VS7$.

На данном интервале образуются два контура протекания тока:

– вторичная обмотка 2 – 4, плечо $VS3$ – $\langle CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \rangle$ – плечо $VS8$;

– вторичная обмотка 1 – 4, плечо $VS8$, плечо $VS2$.

Для временного интервала 3 – 4 получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{\Gamma}}{d_t} = \frac{E_{2-4} + E_{\Gamma} - \Delta U_{vs3} - \Delta U_{\Gamma} - \Delta U_{vs8}}{L_{2-4} + L_{\Gamma 3}}; \\ \frac{di_{кб}}{dt} = \frac{E_{1-4} + \Delta U_{vs2} - \Delta U_{vs8}}{L_{1-4}}; \\ i_{\Gamma} + i_{кб} - i'_{\Gamma} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Мгновенная схема замещения инвертора на интервале 3 – 4 изображена на рисунке 4, г.

Соотношение индуктивностей рассеяния отдельных обмоток трансформатора таково, что протекание тока коммутации в большом контуре происходит при условии $e_{0-4} - L_{0-4} \frac{di_{\Gamma}}{dt}$, т. е. результирующее напряжение, приложенное к выводам обмотки 0 – 4, является отрицательным вплоть до полного закрытия плеча $VS8$.

Несмотря на то, что управляющие импульсы подаются в одно и то же время на два тиристорных плеча $VS2$ и $VS7$, малый контур коммутации тока $i_{км}$, в состав которого входят плечи $VS3$ и $VS7$ инвертора, не будет образовываться, так как плечо $VS7$ не откроется вплоть до окончания коммутации в большом контуре и запирации плеча $VS8$, причиной которого является отсутствие положительного потенциала на выводе 4 секции 0 – 4.

Продолжительность протекания коммутации в большом контуре оценивается углом γ_1 . По завершении времени, соответствующего углу γ_1 , напряжение в секции вторичной обмотки трансформатора 2 – 4 становится больше нуля, вследствие чего возникают потенциальные условия для возникновения коммутации в малом контуре коммутации. В то же время секция 1 – 2 переходит в режим проводимого состояния и в кривой выпрямленного напряжения возникает положительная область, соответствующая напряжению, равному $e_{1-2} - L_{1-2} \frac{di_r}{dt}$.

Продолжительность коммутации в малом контуре оценивается углом γ_2 . Мгновенная схема замещения инвертора, соответствующая временному интервалу 4 – 5 на диаграмме напряжения, показана на рисунке 4, д. Под действием протекающего в этом контуре тока коммутации $i_{км}$ плечо $VS3$ закрывается, а плечо $VS7$ открывается.

На данном интервале образуются два контура протекания тока:

– вторичная обмотка 1 – 2, плечо $VS3$ – $\left\langle CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \right\rangle$ – плечо $VS2$;

– вторичная обмотка 2 – 4, плечо $VS7$, плечо $VS3$.

Для временного интервала 4 – 5 получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_r}{dt} = \frac{E_{1-2} + E_r - \Delta U_{vs3} - \Delta U_r - \Delta U_{vs2}}{L_{1-2} + L_{r3}}; \\ \frac{di_{км}}{dt} = \frac{E_{2-4} + \Delta U_{vs3} - \Delta U_{vs7}}{L_{2-4}}; \\ i_r + i_{км} - i'_r = 0. \end{cases} \quad (9)$$

После завершения коммутации в малом контуре инвертор переходит в проводящее состояние до момента подачи импульсов управления α_p в следующем полупериоде питающего напряжения, обозначенного пунктирной стрелкой на рисунке 2.

Контур протекания тока на данном интервале:

– вторичная обмотка 1 – 4, плечо $VS7$ – $\left\langle CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \right\rangle$ – плечо $VS2$.

Для временного интервала 5 – π получаем уравнение

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_{1-4} + E_r - \Delta U_{vs7} - \Delta U_r - \Delta U_{vs2}}{L_{1-4} + L_{r3}}. \quad (10)$$

Мгновенная схема замещения инвертора электропоезда, соответствующая временному интервалу 5 – π , изображена на рисунке 4, е.

В точке π наблюдается смена направления ЭДС. Сплошная стрелка меняется на штриховую (см. рисунок 2). Ток в обмотке тягового трансформатора электропоезда протекает против направления его ЭДС. В данный полупериод питающего напряжения на временном интервале π – 6 ток инвертора будет протекать через заранее открытые тиристорные плечи инвертора $VS2$ и $VS7$ (см. рисунок 2).

Контур протекания тока на данном интервале:

– вторичная обмотка 1 – 4, плечо $VS7$ – $\left\langle CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \right\rangle$ – плечо $VS2$.

Для временного интервала π – 6 получаем уравнение

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_{1-4} + E_r - \Delta U_{vs7} - \Delta U_r - \Delta U_{vs2}}{L_{1-4} + L_{r3}}. \quad (11)$$

Мгновенная схема замещения инвертора электропоезда, соответствующая временному интервалу $\pi - 6$, показана на рисунке 4, ж.

В момент времени, соответствующий точке 6 на диаграмме напряжения, импульс управления α_p подается на тиристорное плечо инвертора $VS4$ (см. рисунок 2). Вследствие этого начинается коммутация тока с продолжительностью γ_p с плеча $VS2$ на плечо $VS4$ инвертора.

На данном интервале образуются два контура протекания тока:

– вторичная обмотка 1 – 4, плечо $VS7 - \left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma 1, \Gamma 2, R_{61} \\ CP2, \Gamma 3, \Gamma 4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle$ – плечо $VS2$;

– вторичная обмотка 1 – 2, плечо $VS2$, плечо $VS2$.

Для временного интервала 6 – 7 получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_r}{dt} = \frac{E_{1-4} + E_r - \Delta U_{vs7} - \Delta U_r - \Delta U_{vs2}}{L_{1-4} + L_{r3}}; \\ \frac{di_{\gamma p}}{dt} = \frac{E_{1-2} + \Delta U_{vs2} - \Delta U_{vs4}}{L_{1-2}}; \\ i_r + i_{\gamma p} - i_r' = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Мгновенная схема замещения инвертора электропоезда, соответствующая временному интервалу 6 – 7, изображена на рисунке 4, з.

После завершения фазовой коммутации γ_p ток инвертора протекает через тиристорные плечи $VS4$ и $VS7$, что соответствует временному интервалу 7 – 8 (см. рисунок 2).

Контур протекания тока на данном интервале:

– вторичная обмотка 2 – 4, плечо $VS7 - \left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma 1, \Gamma 2, R_{61} \\ CP2, \Gamma 3, \Gamma 4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle$ – плечо $VS4$.

Для временного интервала 7 – 8 получаем уравнение

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_{2-4} + E_r - \Delta U_{vs7} - \Delta U_r - \Delta U_{vs4}}{L_{2-4} + L_{r3}}. \quad (13)$$

Мгновенная схема замещения инвертора электропоезда, соответствующая временному интервалу 7 – 8, представлена на рисунке 4, и.

В момент времени, соответствующий точке 8, подаются импульсы управления β на тиристорные плечи $VS1$ и $VS8$, после чего возникает большой контур коммутации $i_{кб}$.

На данном интервале образуются два контура протекания тока:

– вторичная обмотка 2 – 4, плечо $VS7 - \left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma 1, \Gamma 2, R_{61} \\ CP2, \Gamma 3, \Gamma 4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle$ – плечо $VS4$;

– вторичная обмотка 1 – 4, плечо $VS7$, плечо $VS1$.

Для временного интервала 8 – 9 получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_r}{dt} = \frac{E_{2-4} + E_r - \Delta U_{vs7} - \Delta U_r - \Delta U_{vs4}}{L_{2-4} + L_{r3}}; \\ \frac{di_{кб}}{dt} = \frac{E_{1-4} + \Delta U_{vs7} - \Delta U_{vs1}}{L_{1-4}}; \\ i_r + i_{кб} - i_r' = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Мгновенная схема замещения инвертора электропоезда, соответствующая временному интервалу 8 – 9, изображена на рисунке 4, к.

Несмотря на то, что управляющие импульсы подаются в одно и то же время на два тиристорных плеча $VS1$ и $VS8$, малый контур коммутации $i_{\text{км}}$, в состав которого входят плечи $VS4$ и $VS8$ инвертора, не будет образовываться, так как плечо $VS8$ не откроется вплоть до окончания коммутации в большом контуре и запираении плеча $VS7$, причиной которого является отсутствие положительного потенциала на выводе 4 секции 0 – 4.

Продолжительность протекания коммутации в большом контуре оценивается углом γ_1 . По завершении времени, соответствующего углу γ_1 , напряжение в секции вторичной обмотки трансформатора 2 – 4 становится больше нуля, вследствие чего возникают потенциальные условия для возникновения коммутации в малом контуре. В то же время секция 1 – 2 переходит в режим проводимого состояния и в кривой выпрямленного напряжения возникает положительная область.

Продолжительность коммутации в малом контуре оценивается углом γ_2 . Под действием протекающего в этом контуре тока коммутации $i_{\text{км}}$ плечо $VS4$ закрывается, а плечо $VS8$ открывается.

На данном интервале образуются два контура протекания тока:

- вторичная обмотка 1 – 2, плечо $VS1$ – $\left\langle \text{CP1}, \Gamma 1, \Gamma 2, R_{61} \right\rangle$ – плечо $VS4$;
- вторичная обмотка 2 – 4, плечо $VS8$, плечо $VS4$.

Для временного интервала 9 – 10 получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{\Gamma}}{dt} = \frac{E_{1-2} + E_{\Gamma} - \Delta U_{\text{vs1}} - \Delta U_{\Gamma} - \Delta U_{\text{vs4}}}{L_{1-2} + L_{\Gamma 3}}; \\ \frac{di_{\text{км}}}{dt} = \frac{E_{2-4} + \Delta U_{\text{vs4}} - \Delta U_{\text{vs8}}}{L_{2-4}}; \\ i_{\Gamma} + i_{\text{км}} - i'_{\Gamma} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Мгновенная схема замещения инвертора, соответствующая временному интервалу 9 – 10 на диаграмме напряжения, показана на рисунке 4, л.

После завершения коммутации в малом контуре инвертор переходит в проводящее состояние до момента подачи импульсов управления α_p в следующем полупериоде питающего напряжения, обозначенного сплошной стрелкой на рисунке 2.

Контур протекания тока на данном интервале:

- вторичная обмотка 1 – 4, плечо $VS1$ – $\left\langle \text{CP1}, \Gamma 1, \Gamma 2, R_{61} \right\rangle$ – плечо $VS8$.

Для временного интервала 10 – 2π получаем уравнение

$$\frac{di_{\Gamma}}{dt} = \frac{E_{1-4} + E_{\Gamma} - \Delta U_{\text{vs1}} - \Delta U_{\Gamma} - \Delta U_{\text{vs8}}}{L_{1-4} + L_{\Gamma 3}}. \quad (16)$$

Мгновенная схема замещения инвертора электропоезда, соответствующая временному интервалу 10 – 2π , изображена на рисунке 4, м.

Далее электромагнитные процессы тиристорного ВИПа в режиме инвертора протекают аналогично описанным выше согласно алгоритму управления, представленному на рисунке 1.

Для исследования электромагнитных процессов, возникающих в плечах предлагаемого ВИПа во время их работы на четвертой зоне регулирования, необходимо первый и второй полупериоды выпрямленного напряжения разбить на временные интервалы 0 – 1 – 2 – 3 – 4 –

5 – π и π – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 – 2π соответственно (рисунок 7). Управление работой ВИПа электропоезда в режиме рекуперативного торможения производится по предлагаемому алгоритму, который представлен на рисунке 5 [8].

Для упрощенной записи падения напряжения на плечах предлагаемого ВИПа запишем выражение для эквивалентного падения напряжения, которое определяется по формуле

$$\Delta U_{n3} = \Delta U_{VD} \cdot N + \Delta U_{VT} \cdot N, \quad (17)$$

где n – номер плеча;

ΔU_{VD} – падение напряжения на диоде плеча;

ΔU_{VT} – падение напряжения на транзисторе плеча;

N – количество последовательно включенных элементов в ветви плеча.

Зона регулирования	Направление ЭДС трансформатора	Плечи ВИПа								
		VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8	VT9
IV	→	β_{reg}	—	β'_w	—	—	—	—	β_w	β_D
	←	—	β_{reg}	—	β'_w	—	—	β_w	—	β_D
III	→	—	—	β_{reg}	—	β'_w	—	—	β_w	β_D
	←	—	—	—	β_{reg}	—	β'_w	β_w	—	β_D
II	→	β_{reg}	—	β'_w	—	—	β_w	—	—	β_D
	←	—	β_{reg}	—	β'_w	β_w	—	—	—	β_D
I	→	—	—	β_{reg}	—	—	β_{reg}	—	—	β_D
	←	—	—	—	β_{reg}	β_{reg}	—	—	—	β_D

Рисунок 5 – Предлагаемый алгоритм управления инвертором на базе IGBT-транзисторов

Схема замещения выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов показана на рисунке 6.

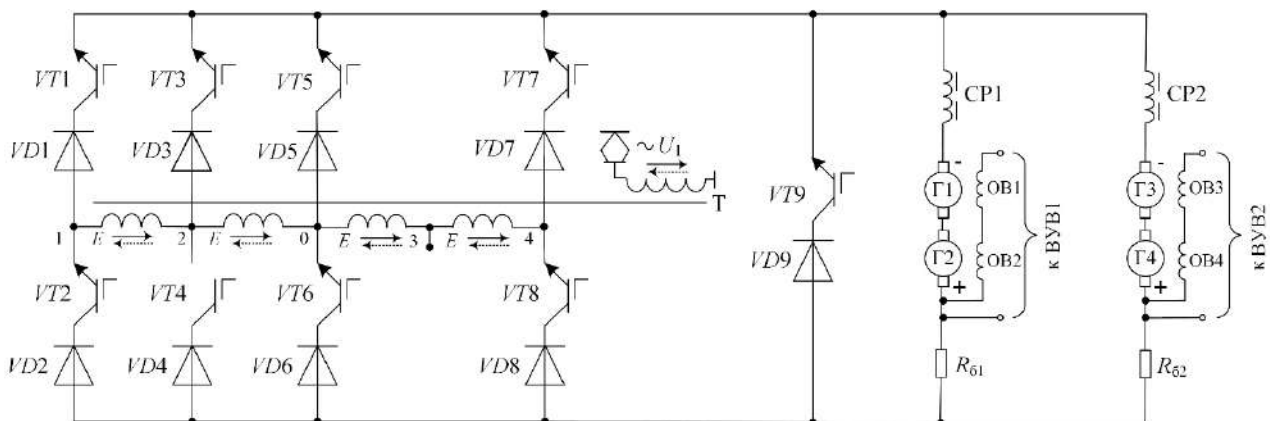


Рисунок 6 – Схема замещения транзисторного выпрямительно-инверторного преобразователя МВИП

На интервале 1 – 2 (см. рисунок 7) в момент времени 1 на транзисторы плеч $VT3$ и $VT8$ подаются управляющие сигналы β'_w β_w соответственно, после чего в период сетевой коммутации γ происходит передача нагрузки с транзистора плеча $VT9$ на плечи 3 и 8.

На данном интервале образуются два контура протекания тока:

- вторичная обмотка 2 – 4, плечо $V3$ ($VT3$; $VD3$), плечо $V9$ ($VT9$; $VD9$), плечо $V8$ ($VT8$; $VD8$);
- плечо $V9$ ($VT9$; $VD9$) – $\left\langle CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \right\rangle$.

Мгновенная схема замещения, соответствующая временному интервалу 1 – 2, представлена на рисунке 8, а

$$\begin{cases} \frac{di_B}{d_t} = \frac{E_{2-4} - \Delta U_{3Э} + \Delta U_{9Э} - \Delta U_{8Э}}{L_{2-4}}; \\ \frac{di_r}{d_t} = \frac{E_r - \Delta U_r - \Delta U_{9Э}}{L_{rЭ}}; \\ i_r + i_B - i'_r = 0. \end{cases} \quad (18)$$

На интервале 2 – 3 (см. рисунок 7) обеспечивается напряжение полной третьей зоны. Контур протекания тока на данном интервале:

– вторичная обмотка 2 – 4, плечо $V3$ ($VT3$; $VD3$) – $\left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \\ CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle$ – плечо $V8$ ($VT8$; $VD8$).

Мгновенная схема замещения, соответствующая временному интервалу 2 – 3, изображена на рисунке 8, б.

$$\frac{di_r}{d_t} = \frac{E_{2-4} - \Delta U_{3Э} + E_r - \Delta U_{8Э} - \Delta U_r}{L_{2-4} + L_{rЭ}}. \quad (19)$$

На интервале 3 – 4 (см. рисунок 7) в момент времени, соответствующий точке 3, с транзисторного плеча $VT3$ происходит снятие сигнала управления, но в свою очередь подается управляющий сигнал β_{reg} на транзисторное плечо $VT1$, обеспечивая напряжение полной четвертой зоны регулирования.

Контур протекания тока на данном интервале:

– вторичная обмотка 1 – 4, плечо $V1$ ($VT1$; $VD1$) – $\left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \\ CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle$ – плечо $V8$ ($VT8$; $VD8$).

Мгновенная схема замещения, соответствующая временному интервалу 3 – 4, представлена на рисунке 8, в.

$$\frac{di_r}{d_t} = \frac{E_{1-4} - \Delta U_{1Э} + E_r - \Delta U_{8Э} - \Delta U_r}{L_{1-4} + L_{rЭ}}. \quad (20)$$

На интервале 4 – 5 (см. рисунок 7) в момент времени, соответствующий точке 4, с транзисторного плеча $VT1$ происходит снятие сигнала управления. Тем временем идет подача управляющего сигнала β_{reg} на транзисторное плечо $VT3$, обеспечивается напряжение полной третьей зоны.

Контур протекания тока на данном интервале:

– вторичная обмотка 2 – 4, плечо $V3$ ($VT3$; $VD3$) – $\left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \\ CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle$ – плечо $V8$ ($VT8$; $VD8$).

Мгновенная схема замещения, соответствующая временному интервалу 4 – 5, показана на рисунке 8, г.

$$\frac{di_r}{d_t} = \frac{E_{2-4} - \Delta U_{3Э} + E_r - \Delta U_{8Э} - \Delta U_r}{L_{2-4} + L_{rЭ}}. \quad (21)$$

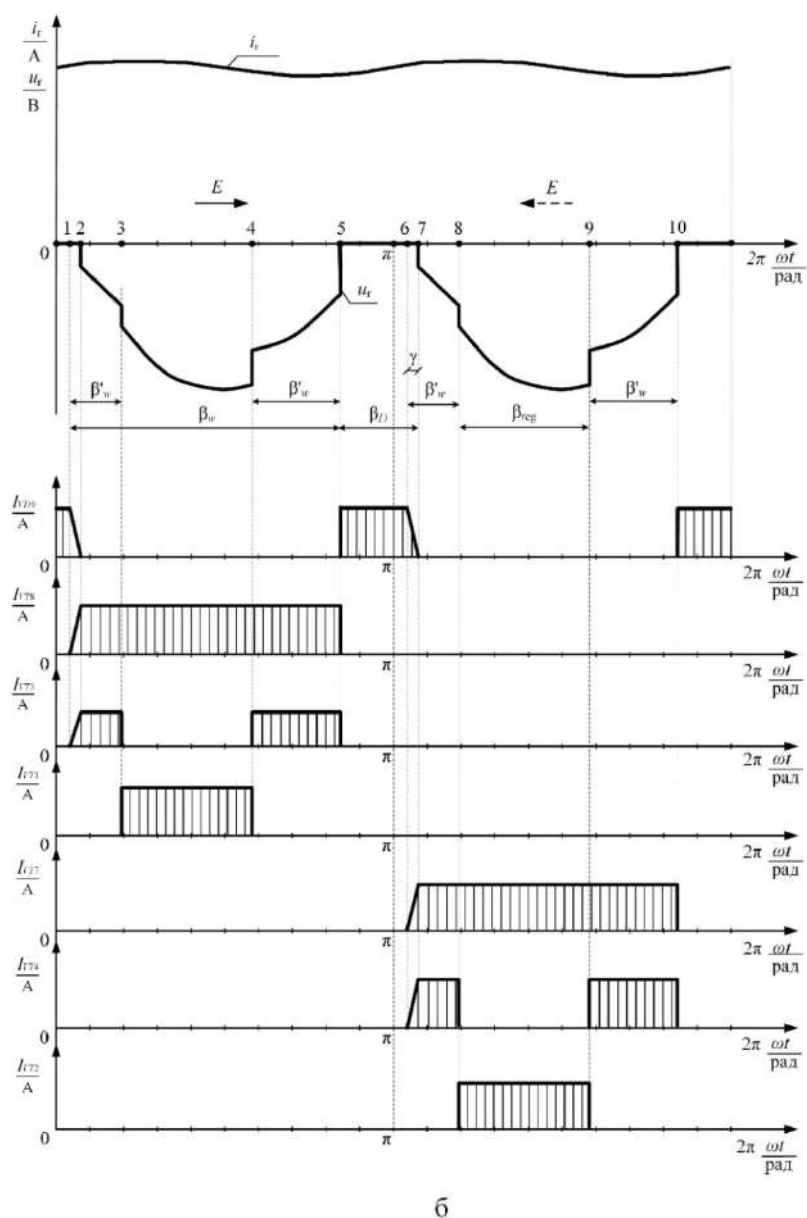
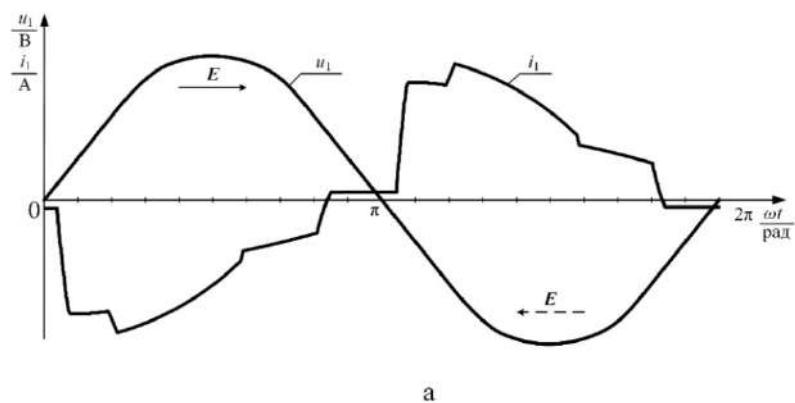


Рисунок 7 – Диаграммы напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора (а) выпрямленного напряжения и токов плеч инвертора на базе IGBT-транзисторов (б) в режиме рекуперативного торможения электропоезда с предлагаемым алгоритмом управления на четвертой зоне регулирования: u_1 – напряжение сети; i_1 – ток сети; u_T – напряжение инвертора; i_T – ток инвертора; I_{VSn} – ток в n -м плече инвертора

На временном интервале $5 - \pi$ и $\pi - 6$ (см. рисунок 7) в момент времени, соответствующий точке 5, происходит одновременное снятие сигналов управления с транзисторных плеч $VT3$ и $VT8$. Далее в этот момент происходит открытие диода $VD9$, поддерживая ток в якорях тяговых электродвигателей, за счет накопленной электромагнитной энергии. На временном интервале, соответствующем точке π , происходит смена направления ЭДС со сплошной на штриховую стрелку.

Контур протекания тока на данном интервале:

$$- \text{плечо } V9 (VT9; VD9) - \left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \\ CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle.$$

Мгновенная схема замещения, соответствующая временным интервалам $5 - \pi$ и $\pi - 6$, представлена на рисунке 8, д.

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_r - \Delta U_r - \Delta U_{99}}{L_{r9}}. \quad (22)$$

На временном интервале $6 - 7$ (см. рисунок 7) в момент времени, соответствующий точке 6, подаются одновременно сигналы управления $\beta' \omega$, $\beta \omega$ на транзисторные плечи $VT4$ и $VT7$ соответственно, после чего в период сетевой коммутации происходит передача нагрузки с диодного плеча $VD9$ на транзисторные плечи ВИПа $VT4$ и $VT7$.

На данном интервале образуются два контура протекания тока:

– вторичная обмотка 2 – 4, плечо $V7 (VT7; VD7)$, плечо $V9 (VT9; VD9)$, плечо $V4 (VT4; VD4)$;

$$- \text{плечо } V9 (VT9; VD9) - \left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \\ CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle.$$

Мгновенная схема замещения, соответствующая временному интервалу $6 - 7$, представлена на рисунке 8, е.

$$\begin{cases} \frac{di_b}{dt} = \frac{E_{2-4} - \Delta U_{79} + \Delta U_{99} - \Delta U_{49}}{L_{2-4}}; \\ \frac{di_r}{dt} = \frac{E_r - \Delta U_r - \Delta U_{99}}{L_{r9}}; \\ i_r + i_b - i'_r = 0. \end{cases} \quad (23)$$

На интервале $7 - 8$ (см. рисунок 7) обеспечивается напряжение полной третьей зоны.

Контур протекания тока на данном интервале:

$$- \text{вторичная обмотка } 2 - 4, \text{ плечо } V7 (VT7; VD7) - \left\langle \begin{matrix} CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \\ CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{62} \end{matrix} \right\rangle - \text{плечо } V4 (VT4; VD4).$$

Мгновенная схема замещения, соответствующая временному интервалу $7 - 8$, изображена на рисунке 8, ж.

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{E_{2-4} - \Delta U_{79} + E_r - \Delta U_{49} - \Delta U_r}{L_{2-4} + L_{r9}}. \quad (24)$$

На интервале $8 - 9$ (см. рисунок 7) в момент времени, соответствующий точке 8, с транзисторного плеча $VT4$ происходит снятие сигнала управления. Далее подается управляющий сигнал β_{reg} на транзисторное плечо $VT2$, обеспечивая регулирование напряжения четвертой зоны.

Контур протекания тока на данном интервале:

– вторичная обмотка 1 – 4, плечо $V7$ ($VT7$; $VD7$) – $\left\langle CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \right\rangle$ – плечо $V2$ ($VT2$; $VD2$).

Мгновенная схема замещения, соответствующая временному интервалу 8 – 9, представлена на рисунке 8, з.

$$\frac{di_{\Gamma}}{d_t} = \frac{E_{1-4} - \Delta U_{7\text{э}} + E_{\Gamma} - \Delta U_{2\text{э}} - \Delta U_{\Gamma}}{L_{1-4} + L_{\Gamma}}. \quad (25)$$

На интервале 9 – 10 (см. рисунок 7) в момент времени, соответствующий точке 9, с транзисторного плеча $VT2$ происходит снятие сигнала управления. Тем временем идет подача управляющего сигнала $\beta_{\text{рег}}$ на транзисторное плечо $VT4$, обеспечивается регулирование напряжения третьей зоны.

Контур протекания тока на данном интервале:

– вторичная обмотка 2 – 4, плечо $V7$ ($VT7$; $VD7$) – $\left\langle CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \right\rangle$ – плечо $V4$ ($VT4$; $VD4$).

Мгновенная схема замещения, соответствующая временному интервалу 9 – 10, показана на рисунке 8, и.

$$\frac{di_{\Gamma}}{d_t} = \frac{E_{2-4} - \Delta U_{7\text{э}} + E_{\Gamma} - \Delta U_{4\text{э}} - \Delta U_{\Gamma}}{L_{2-4} + L_{\Gamma}}. \quad (26)$$

На временном интервале 10 – 2π (см. рисунок 7) в момент времени, соответствующий точке 10, происходит одновременное снятие сигналов управления с транзисторных плеч $VT4$ и $VT7$. Далее в этот момент происходит открытие диода $VD9$, поддерживая ток в якорях тяговых электродвигателей, за счет накопленной электромагнитной энергии.

Контур протекания тока на данном интервале:

– плечо $V9$ ($VT9$; $VD9$) – $\left\langle CP1, \Gamma1, \Gamma2, R_{61} \right\rangle$ – $\left\langle CP2, \Gamma3, \Gamma4, R_{62} \right\rangle$.

Мгновенная схема замещения, соответствующая временному интервалу 10 – 2π , представлена на рисунке 8, к.

$$\frac{di_{\Gamma}}{d_t} = \frac{E_{\Gamma} - \Delta U_{\Gamma} - \Delta U_{9\text{э}}}{L_{\Gamma}}. \quad (27)$$

Далее электромагнитные процессы предлагаемого инвертора происходят аналогично согласно алгоритму управления, представленному на рисунке 5.

При проведении теоретического исследования электромагнитных процессов выпрямительно-инверторных преобразователей на базе тиристоров и IGBT-транзисторов получены мгновенные схемы замещения инвертора на базе тиристоров электропоезда переменного тока на примере четвертой зоны регулирования напряжения;

получены системы уравнений токов генератора, токов плеч инвертора в контурах коммутации согласно штатному алгоритму управления.

На основе проведенного анализа электромагнитных процессов работы тиристорного инвертора в режиме рекуперативного торможения электропоезда переменного тока можно сделать выводы:

для гарантированной работы инвертора в рекуперативном торможении угол запаса инвертора берется значительным, что приводит к снижению коэффициента мощности

мотор-вагона;

наблюдается значительная величина коммутационного угла токов плеч инвертора γ ;
 значительная пульсация выпрямленного тока также сказывается на снижении коэффициента мощности электропоезда [10].

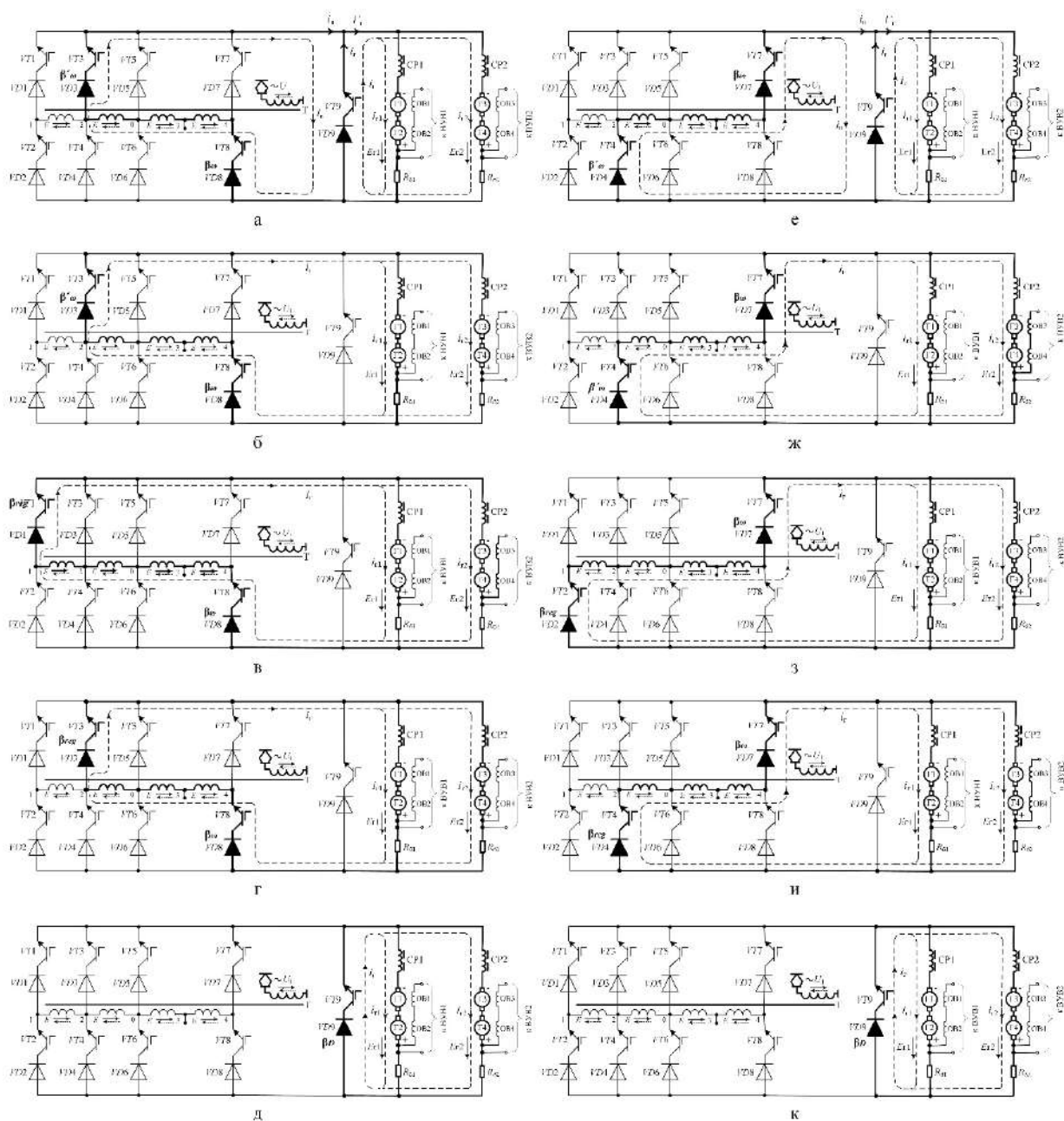


Рисунок 8 – Мгновенные схемы замещения инвертора электропоезда на базе IGBT-транзисторов на четвертой зоне регулирования:

а: 1 – 2; б: 2 – 3; в: 3 – 4; г: 4 – 5; д: 5 – π ; е: π – 6; ж: 6 – 7; з: 7 – 8; и: 8 – 9; к: 9 – 10

Применение полностью управляемых IGBT-транзисторов в качестве силовой базы инвертора позволило

разработать новый алгоритм его управления, который дает возможность значительно компенсировать индуктивный характер нагрузки электропоезда, что повысит его коэффициент мощности;

осуществить поддержание якорного тока тяговых электродвигателей в моменты выключения инвертора от тягового трансформатора с помощью дополнительного разрядного плеча, установленного параллельно цепи тяговых электродвигателей;

исключить возможность опрокидывания транзисторного инвертора за счет разработанного алгоритма управления, который обеспечивает точное закрытие предыдущих работающих плеч инвертора.

Список литературы

1. Мельниченко, О. В. Анализ применения преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока [Текст] / О. В. Мельниченко, В. С. Иванов // Вестник Иркутского национального исследовательского технического университета / Иркутский национальный исследоват. техн. ун-т. – Иркутск. – 2018. – № 4. – С. 231 – 242.
2. ЭД9Э – новый электропоезд для Казахстанских железных дорог [Текст] // Журнал для партнеров ЗАО «Трансмашхолдинг». – М. – 2014. – № 2. – 27 с.
3. Бозе, Б. К. Современная силовая электроника и преобразователи переменного тока: Учебник [Текст] / Б. К. Бозе // Prentice Hall PTR, 2002. – 738 с.
4. Математическое моделирование тягового трансформатора электропоезда переменного тока серии ЭД9Э в среде имитационного моделирования Matlab Simulink [Текст] / В. С. Иванов, В. А. Аксенов и др. // Материалы 9-й междунар. науч.-практ. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2018. – Т. 2. – С. 273 – 280.
5. Усольцев, А. А. Общая электротехника: Учебное пособие [Текст] / А. А. Усольцев / Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. – СПб, 2009. – 301 с.
6. Электропоезд ЭД9Э: Руководство по эксплуатации [Текст] / ОАО «Демидовский машиностроительный завод», – М., 2015. – 433 с.
7. Преобразователь выпрямительно-инверторный ВИП-1000-У1: Руководство по эксплуатации ИЕАЛ.435411.046 РЭ [Текст] / ОАО «Электровыпрямитель». – Саранск, 2008. – 35 с.
8. Иванов, В. С. Разработка силовой схемы электропоезда переменного тока серии ЭД9Э на базе IGBT-транзисторов [Текст] / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко // Сборник трудов 4-й всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2018. – С. 137 – 140.
9. Яговкин, Д. А. Совершенствование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока и принципа его управления в режиме тяги [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Яговкин Дмитрий Андреевич. – Иркутск, 2016. – 178 с.
10. Мельниченко, О. В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока [Текст]: Дис... докт. техн. наук: 05.09.03 / Мельниченко Олег Валерьевич. – Хабаровск, 2015. – 392 с.

References

1. Melnichenko O. V., Ivanov V. S. Analysis of application of converters in power circuits of domestic motor-car rolling stock of alternating current [Analiz primeneniya preobrazovateley v silovykh skhemakh otechestvennogo motorvagonnogo podvizhnogo sostava peremennogo toka]. *Vestnik IrGTU. Irkutsk national research technical University*. Irkutsk, 2018, no. 4, pp. 231 – 242.
2. ED9E-new electric train for Kazakhstan Railways [ED9E – novyy elektropoezd dlya Kazakhstanskikh zheleznikh dorog]. *Journal for partners of CJSC TRANSMASHHOLDING*, 2014. no. 2, 27 p.
3. Bose B. K. Modern power electronics and AC inverters [Sovremennaya silovaya elektronika i preobrazovateli peremennogo toka]. Prentice Hall PTR, 2002, 738 p.

4. Ivanov V. S. Mathematical modeling of traction transformer electric AC series ED9E in the simulation of MATLAB SIMULINK [Matematicheskoe modelirovanie tyagovogo transformatora elektropoezda peremennogo toka serii ED9E v srede imitatsionnogo modelirovaniya MATLAB SIMULINK]. *Transport infrastructure of the Siberian region: materials Ninth Intern. scientific. - prakt. Conf. Irkutsk state University of railway engineering*. Irkutsk, 2018, vol. 2, 688 p.

5. Usoltsev A. A. *Obshchaya elektrotehnika* (General electrical engineering). St. Petersburg national research University information technologies, mechanics and optics, 2009, 301 p.

6. *Elektropoezd ED9E* (Train ED9E). JSC «Demikhovsky engineering plant», 2015, 433 p.

7. *Preobrazovatel' vypryamitel'no-invertornyy VIP-1000-U1* (Converter rectifier-inverter VIP-1000-U1). The user manual for IEAL.435411.046 re. JSC «Elektrovypryamitel», 2008, 35 p.

8. Ivanov V. S. Development of power circuit of electric train AC series ED9E on the basis of IGBT-transistors [Razrabotka silovoy skhemy elektropoezda peremennogo toka serii ED9E na baze IGBT-tranzistorov]. «*Science and youth*» *proceedings of the fourth all-Russian scientific-practical conference of students, postgraduates and young scientists*. Irkutsk state University of railway engineering. – Irkutsk, 2018, pp. 137 – 140.

9. Yagovkin D. A. *Sovershenstvovanie vypryamitel'-invertornogo preobrazovatelya elektrovoza peremennogo toka i printsipa ego upravleniya v rezhime tyagi* (Improvement of rectifier-inverter Converter locomotive is AC power and control in the traction mode). PhD thesis, Irkutsk., 2016, 178 p.

10. Melnichenko O. V. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti tyagovykh elektroprivodov elektrovozov peremennogo toka (Increase of power efficiency of traction electric drives of electric locomotives of alternating current). Doctor's thesis, Khabarovsk, 2015, 392 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Владислав Сергеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского, 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 (983) 153-10-75.

E-mail: Vladislav-Sergeevich-Irgups@mail.ru

Мельниченко Олег Валерьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Чернышевского, 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 (902) 170-24-37.

E-mail: Vladislav-Sergeevich-Irgups@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Иванов, В. С. Теоретическое исследование электромагнитных процессов инвертора на базе тиристоров и IGBT-транзисторов электропоезда переменного тока в режиме рекуперативного торможения [Текст] / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 28 – 44.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanov Vladislav Sergeevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Ph. D. student department of «Electric rolling stock», ISTU.

Phone: +7 (983) 153-10-75.

E-mail: Vladislav-Sergeevich-Irgups@mail.ru

Melnichenko Oleg Valeryevich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevsky st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, head of department of « Electric rolling stock », ISTU.

Phone: +7 (902) 170-24-37.

E-mail: Olegmelnval@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ivanov V. S., Melnichenko O. V. Theoretical study of electromagnetic processes inverter based on thyristors and IGBT-transistors of an electric train of an alternating current in the mode of regenerative braking. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 3, no 35, pp. 28 – 44 (In Russian).

А. В. Мальцева¹, С. М. Утепбергенова¹, В. Н. Ли²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, Российская Федерация

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОЛОЗА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОРОСТНОГО ТОКОПРИЕМНИКА

Аннотация. В статье рассматриваются аэродинамические свойства полозов токоприемников SSS87, предназначенных для скоростного движения электрического подвижного состава. Приводятся спектры обтекания для различных форм контактных пластин. Решение задачи моделирования обтекания полоза токоприемника воздушной средой достигается путем применения методов вычислительной гидродинамики (CFD). Определены аэродинамические коэффициенты, необходимые для расчета аэродинамических характеристик. Построены аэродинамические характеристики полозов токоприемников.

Ключевые слова: токоприемник, аэродинамические характеристики, токосъем, лобовое сопротивление, поверхностные силы, аэродинамический коэффициент.

Alla V. Malceva¹, Sandugash M. Utebergenova¹, Valerii N. Li²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE PANTOGRAPH SLIDE ON THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF SPEED CURRENT COLLECTORS

Abstract. In article aerodynamic properties of SSS87 current collectors intended for the high-speed movement of the electric rolling stock are considered. Spectra are presented of the flow for different shapes of the contact plates. The solution of a problem of modeling of flow of the contact plates of the current collector with the air environment is reached by application of methods of computing hydrodynamics (CFD) the aerodynamic coefficients necessary for calculation of aerodynamic characteristics Are defined. Aerodynamic characteristics of current collectors are constructed.

Keywords: current collectors, aerodynamic characteristics, current puller, drag, surface forces, aerodynamic coefficient.

При повышении скоростей движения электроподвижного состава возрастает влияние аэродинамических сил, возникающих на токоприемнике при взаимодействии его с воздушным потоком, что в свою очередь приводит к изменению показателей надежности и экономичности токосъема.

Поэтому на стадии проектирования токоприемников скоростного подвижного состава необходимо учитывать их аэродинамические свойства [1]. В данной статье рассматривается влияние формы полоза токоприемника SSS87 на его аэродинамические характеристики (рисунк 1).



Рисунок 1 – Полоз токоприемника SSS87

Одним из способов уменьшения аэродинамического воздействия на токоприемник является подбор аэродинамически идеально подходящих форм его элементов. Аэродинамическое воздействие формируется скоростью воздушного потока, его плотностью и направлением относительно токосъемного устройства [2].

Постройка модели или усовершенствование уже готового образца с последующими испытаниями требует больших затрат средств и времени. В настоящее время имеется возможность создания виртуальной модели полоза с применением средств CFD (Computational Fluid Dynamics), которые позволяют получить спектры обтекания токосъемных устройств, построить их аэродинамические характеристики и рассчитать значения аэродинамических коэффициентов [3, 4].

По полученным результатам аэродинамических сил рассчитываются аэродинамические коэффициенты, чтобы на стадии проектирования анализировать аэродинамические качества новой конструкции с известной степенью точности и с минимальными затратами.

При движении электроподвижного состава на полоз токоприемника действует аэродинамическая сила P , которая раскладывается на аэродинамическую силу лобового сопротивления $P_{\text{ВЛХ}}$ и подъемную аэродинамическую силу $P_{\text{ВП}}$.

Аэродинамические характеристики полоза токоприемника обуславливаются его формой, скоростью и направлением воздействующего потока [1]. Составляющие $P_{\text{ВЛХ}}$ и $P_{\text{ВП}}$ определяются по формулам:

$$P_{\text{ВЛХ}} = 0,5 \cdot c_x \cdot \rho \cdot g^2 \cdot S \cdot \cos \alpha; \quad (1)$$

$$P_{\text{ВП}} = 0,5 \cdot c_y \cdot \rho \cdot g^2 \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где c_x и c_y – аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы соответственно;

ρ – массовая плотность воздуха, кг/м³;

S – площадь миделевого сечения, м²;

g – скорость набегающего потока, м/с.

Численные эксперименты проводились для скругленного и трапецеидального сечений вставок полозов токоприемников (рисунок 2). Рассмотренные контактные пластины двух видов выполнены в следующих вариантах: без отверстий, с отверстиями цилиндрической и конусной форм. Длина вставок – 1200 мм, ширина – 40 мм, расстояние между полозами – 510 мм.

Для выполнения сравнительного анализа аэродинамических качеств вставок различной формы также были проведены расчеты в отношении типовой контактной пластины, установленной в полозе токоприемника SSS87 (рисунок 3).

Значения аэродинамических сил должны находиться в соответствии с параметрами контактной подвески с учетом динамического взаимодействия токоприемника с последней. Для этого необходимо найти подходящие компенсирующие вертикальные силы при движении токоприемника в обоих направлениях и во всем диапазоне скоростей. Результаты аэродинамических расчетов при использовании методов вычислительной гидрогазодинамики определяются заданными начальными условиями, качеством расчетной сетки и граничными условиями. Для сокращения временных и материальных затрат целесообразно использовать метод задания граничных условий [1, 5, 6].

Моделирование CFD состоит из трех основных этапов: генерация расчетной сетки, разработка числового алгоритма, моделирование турбулентных течений [7]. Моделирование турбулентных течений в настоящее время является основной проблемой вычислительной аэрогидродинамики.

Условия ламинарного течения может быть спокойным, упорядоченным при малой скорости потока и большой вязкости газа.

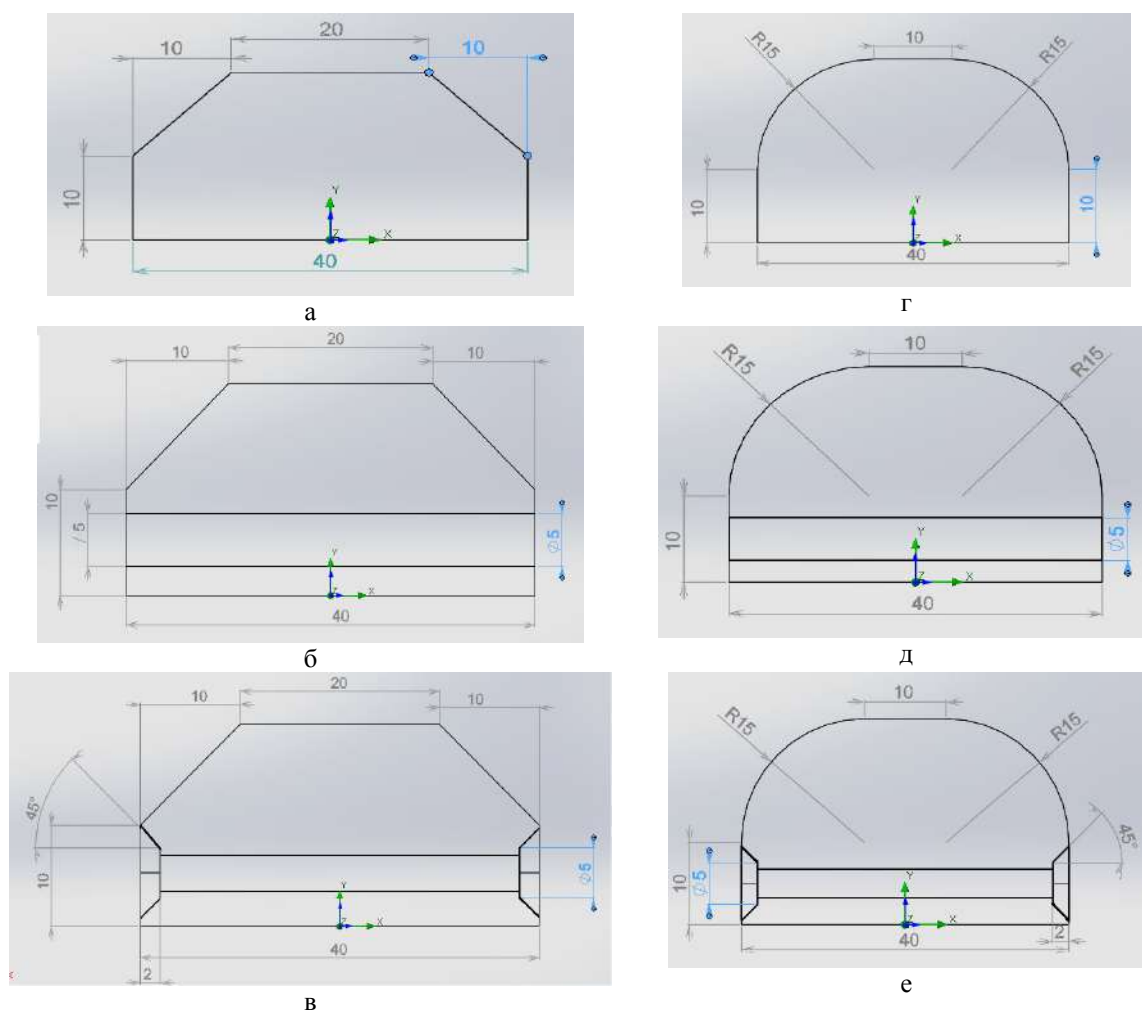


Рисунок 2 – Исследуемые контактные пластины токоприемника:

а – трапецидальный без отверстий; б – трапецидальный с цилиндрическими отверстиями;
в – трапецидальный с отверстиями конусной формы; г – скругленный без отверстий;
д – скругленный с цилиндрическими отверстиями; е – скругленный с отверстиями конусной формы

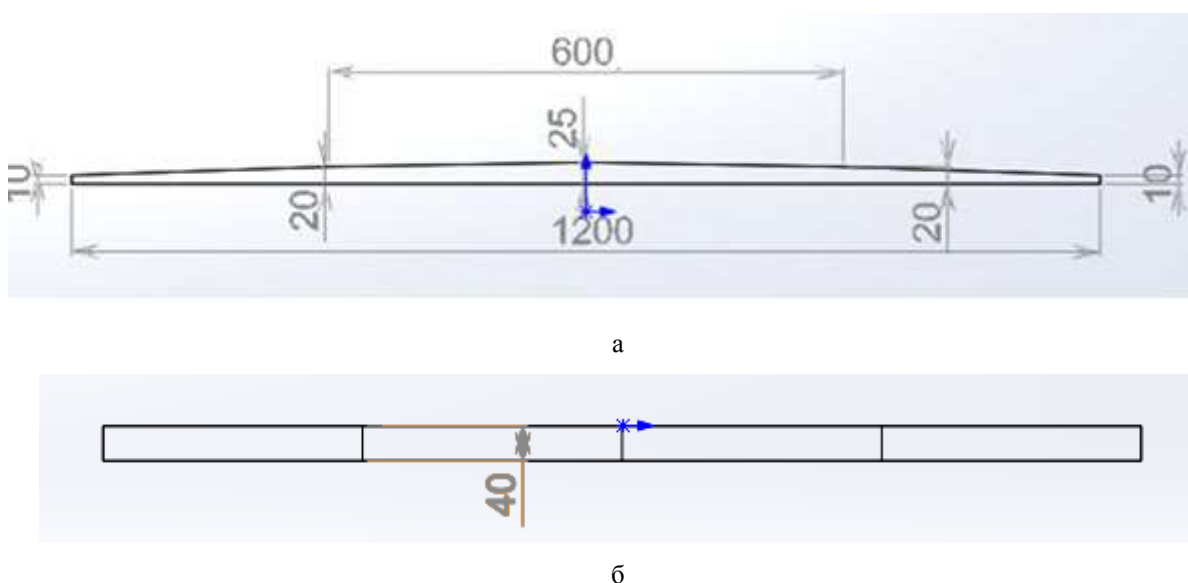


Рисунок 3 – Исследуемые контактные пластины токоприемника SSS87:
а – вид контактной пластины сбоку; б – вид сверху

Масштабом наличия таких условий является значение числа Рейнольдса [8]:

$$Re = \frac{\vartheta \cdot l}{\nu}, \quad (3)$$

где ϑ – скорость набегающего потока, м/с;

l – продольный размер тела, м;

ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Подробное описание всего диапазона турбулентности нецелесообразно, так как турбулентность является режимом течения, а не свойством среды. Для турбулентных течений характерен большой разброс чисел Рейнольдса, при различных числах Рейнольдса частота и длина волн изменяется до четырех – пяти раз [9].

Математическая модель вязкого воздушного потока описывается уравнениями Навье – Стокса [8]. Для ламинарного течения несжимаемой среды система уравнений имеет вид:

$$\rho(u \cdot \nabla) \cdot u = \nabla \left[-p \cdot l + \infty (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F; \quad (4)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0, \quad (5)$$

где u – скорость воздуха, м/с;

p – давление воздуха, Па;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

∞ – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Граничные условия для нагнетания, стока воздуха и на стенке соответственно определяются по формулам:

$$u = -U_0 n, \quad n^T \left[-p l + \infty (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] n = -p_0, \quad u = 0, \quad u \cdot t = 0, \quad (6)$$

где U_0 – скорость нагнетаемого воздуха на границе нагнетания, м/с;

p_0 – давление воздуха на границе стока, Па;

n – единичный вектор нормали к границе.

Для моделирования турбулентных течений с высокими числами Рейнольдса можно использовать стандартную модель, в которой одновременно с уравнением Навье – Стокса решается два дополнительных дифференциальных уравнения переноса для осредненных пульсационных характеристик, через которые затем выражается коэффициент турбулентной вязкости μ_t . Эти дополнительные уравнения и есть стандартная высокорейнольдсовая модель турбулентности Сполдинга – Лаундера.

Для определения турбулентной вязкости в этой модели определяются два скалярных параметра: удельная кинематическая энергия турбулентности k и скорость вязкой диссипации энергии турбулентности ε . Данная система уравнений имеет вид:

$$\rho(u \cdot \nabla) \cdot u = \nabla \left[-p l + (\infty + \infty_\tau) (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F; \quad (7)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0, \quad (8)$$

$$\rho(u \cdot \nabla) \cdot k = \nabla \left[\left(\infty + \frac{\infty_\tau}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + p_k - \rho \varepsilon; \quad (9)$$

$$\rho(u \cdot \nabla) \cdot \varepsilon = \nabla \left[\left(\infty + \frac{\infty_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon^2}{k} p_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} p_k; \quad (10)$$

$$\infty_{\tau} = \rho C_{\infty} \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (11)$$

$$p_k = \infty_T \left[\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) \right]. \quad (12)$$

Здесь $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_{∞} , σ_k , σ_{ε} – безразмерные эмпирические константы ($C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $C_{\infty} = 0,09$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_{\varepsilon} = 1,3$); k – турбулентная кинетическая энергия, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ε – скорость диссипации турбулентной, $\text{м}^2/\text{с}^3$; μ_T – турбулентная динамическая вязкость воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}$; p_k – скорость образования вихрей.

Аэродинамические коэффициенты элементов токоприемника можно получить, используя экспериментальные данные или спектры обтекания токоприемника потоком воздуха. Имеются различные способы визуализации обтекания физических тел воздушными потоками: шпирный, голографический, теневой, оптический, интерферометрический, дымовой, виртуальный и т. д. [1]. При проведении исследований использовался виртуальный метод с помощью программного обеспечения SolidWorks Flow Simulation. Условия реализации вычислительного эксперимента следующие: тип течения – ламинарное и турбулентное; среда обтекания – воздух; максимальное число продувок – 4; скорость набегающего потока – 180, 200, 250 и 300 км/ч, угол атаки – 1 и 3°.

С использованием препроцессора указанного программного обеспечения была разработана трехмерная модель полоза токоприемника. Спектры обтекания определялись для различных скоростей потока воздуха. В качестве примера приведены спектры обтекания контактных пластин полоза формы скругленного сечения с отверстиями конической формы (рисунок 4).

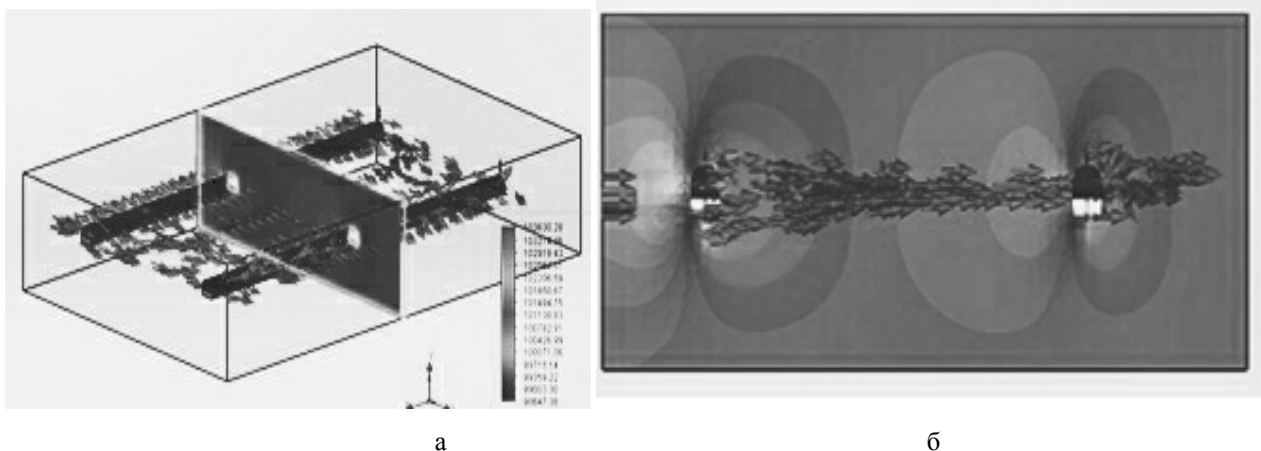


Рисунок 4 – Спектры обтекания контактных пластин полоза потоком воздуха
а – вид сверху; б – вид спереди

Программа позволяет определить направление и величину вектора скорости набегающего воздушного потока в любой точке расчетной области, что дает возможность найти значения аэродинамических сил и соответствующих коэффициентов для различных углов атаки и параметров турбулентности воздушного потока. Изменения значений входных данных благодаря сохранению промежуточных вычислений не влекут за собой значительное увеличение времени расчета.

Результаты расчетов аэродинамических сил для углов атаки 1 и 3° показаны на рисунках 5 и 6: силы лобового сопротивления – рисунки 5 и 6 а и подъемной силы – рисунки 5 и 6, б.

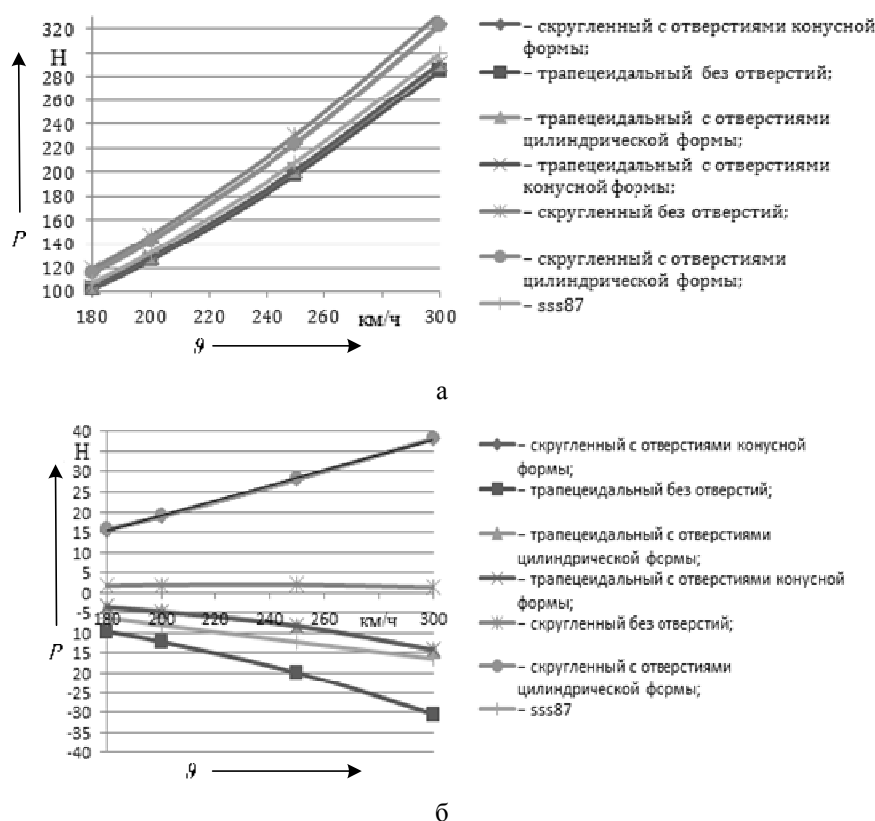


Рисунок 5 – Аэродинамические характеристики контактных пластин: а – лобовое сопротивление от скорости потока с углом атаки 1°; б – подъемная сила от скорости потока с углом атаки 1°

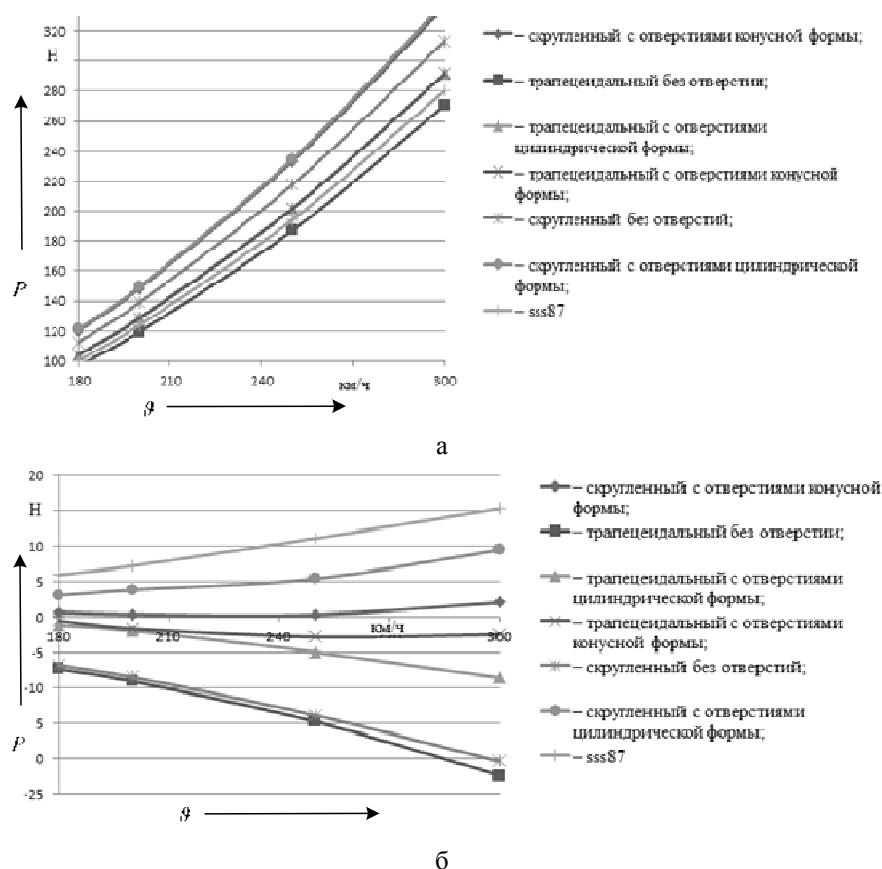


Рисунок 6 – Аэродинамические характеристики контактных пластин:
а – лобовое сопротивление от скорости потока с углом атаки 3°;
б – подъемная сила от скорости потока с углом атаки 3°

Площадь миделевого сечения контактных пластин (см. рисунок 2, а – в) составила $0,497 \text{ м}^2$, пластин, приведенных на рисунке 2, г – е, – $0,437 \text{ м}^2$, для контактных пластин токоприемника SSS87 – $0,417 \text{ м}^2$. Массовая плотность воздуха $\rho = 1,2054 \text{ кг/м}^3$; расчетная скорость воздушного потока – $180 - 300 \text{ км/ч}$. Результаты расчетов аэродинамических коэффициентов показаны в таблице.

Аэродинамические коэффициенты

Коэффициенты	Варианты форм вставок						
	а	б	в	г	д	е	SSS87
Сх, угол атаки 1°	0,156	0,157	0,160	0,159	0,161	0,156	0,173
Су, угол атаки 1°	0,021	– 0,013	– 0,005	– 0,005	0,002	0,02	– 0,008
Сх, угол атаки 3°	0,162	0,148	0,160	0,161	0,151	0,163	0,161
Су, угол атаки 3°	0,002	– 0,01	– 0,002	– 0,002	– 0,01	0,04	0,008

На основании изложенного можно сделать выводы.

По результатам расчетов сил лобового сопротивления и вертикальной силы для разных форм контактных пластин построены характеристики и определены аэродинамические коэффициенты. Полученные характеристики показывают, что лобовые сопротивления контактных пластин отличаются не более чем на 10 %, а вертикальные силы – в несколько раз. Кроме того, эти силы зависят не только от скорости движения, но и от скорости ветра. Поэтому из рассмотренных полозов аэродинамически более совершенным можно считать скругленный полоз с отверстиями конусной формы при расчетах с углом атаки 3° (см. рисунок 3, е) и скругленный без отверстий при расчетах с углом атаки 1° (см. рисунок 3, г), так как при минимальном лобовом сопротивлении у этих вставок создаются аэродинамические вертикальные силы, позволяющие обеспечить минимальный износ при высокоскоростном движении электроподвижного состава (ЭПС). Отверстия конусной формы обеспечивают прохождение встречного воздушного потока через токосъемный элемент, обеспечивая его охлаждение. Внедрение предлагаемого полоза (см. рисунок 2, е) токоприемника ЭПС позволит увеличить нагрузочную способность токоприемника, определяющую максимально допустимый ток, снимаемый при движении ЭПС, за счет лучшего охлаждения токосъемного элемента, а также уменьшить количество повреждений токосъемных устройств и ущерб от них.

Список литературы

1. Чепурко, А. Е. Повышение качества токосъема при высоких скоростях движения путем обеспечения рациональной аэродинамической характеристики токоприемника электроподвижного состава [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 2015 / Чепурко Алексей Евгеньевич. – Омск, 2015. – 178 с.
2. Маслов, Г. П. Влияние форм элементов токоприемника на его аэродинамическую характеристику [Текст] / Г. П. Маслов, М. А. Дятлова // Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – С. 31 – 35.
3. Краснов, Н. Ф. Аэродинамика: Учебник [Текст] / Н. Ф. Краснов. – М.: Высшая школа, 1981. – 720 с.
4. Смердин, А. Н. Особенности применения CFD-метода при расчете аэродинамических сил токоприемника электроподвижного состава [Текст] / А. Н. Смердин, А. Е. Чепурко // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2013. – № 3 (38). – С. 107 – 112.

5. Маслов, Г. П. Аэродинамические показатели токоприемников скоростного электрического подвижного состава [Текст] / Г. П. Маслов, М. А. Капралова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 1 (1). – С. 20 – 25
6. Беляев, И. А. Аэродинамическая подъемная сила токоприемников [Текст] / И. А. Беляев // Вестник ЦНИИ МПС / ВНИИЖТ. – М. – 1968. – № 8. – С. 5 – 8.
7. Кузнецов, А. К. Аэродинамические показатели элементов для высокоскоростного движения [Текст] / А. К. Кузнецов // Повышение качества токоснимания при высоких скоростях движения и в условиях БАМа: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1980. – С. 28 – 31.
8. Алямовский, А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А. А. Алямовский. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
9. Launder, B.E. Лекции в математических моделях турбулентности (Lectures in Mathematical Models of Turbulence) [Текст] / B. E. Launder, D.B. Spalding. – London.: Academic Press, 1972. – 169 с.
10. Пат. на полезную модель 182273 Российская Федерация, МПК В60L 5/00(2006.01). Полоз токоприемника электроподвижного состава [Текст] / Сидоров О. А., Чертков И. Е., Томилов В. В., Утепбергенова С. М.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2018104894; заявл. 08.02.2018; опубл. 09.08.2018, Бюл. № 22.

References

1. Chepurko A. E. *Povysheniye kachestva tokos'yema pri ysokikh skorostyakh dvizheniya putem obespecheniya ratsional'noy aerodinamicheskoy kharakteristiki tokopriyemnika elektropodvizhnogo sostava* (Improving the quality of current collection at high speeds by ensuring rational aerodynamic characteristics of the current collector of electric rolling stock). Candidate of thesis, Omsk, OSTU, 2015, 178 p.
2. Maslov G. P. Influence of the forms of the elements of a current collector on its aerodynamic characteristics [Vliyaniye form elementov tokopriyemnika na yego aerodinamicheskuyu kharakteristiku]. *Materialy nauch.-prakt. konferentsii., posvyashchennoy 110-letiyu Omskogo gosudarstvennogo universiteta «Innovatsionnyye proyekty i novyye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Abstracts of the Int. conference «Innovative projects and new technologies in education, industry and transport»). Omsk, 2010, pp. 31 – 35.
3. Krasnov N. F. *Aerodinamika* (Aerodynamics). Moscow: Higher School, 1981, 720 p.
4. Smerdin A. N., Chepurko A. E. Peculiarities of the application of the CFD method in calculating the aerodynamic forces of a current collector of an electric rolling stock [Osobennosti ispol'zovaniya CFD-metoda pri raschete aerodinamicheskikh sil tokopriyemnika elektropodvizhnogo sostava]. *Transport Urala – The journal of Transport of the Urals*, 2013, no 3 (38), pp. 107 – 112.
5. Maslov G. P., Kapralova M. A. Aerodynamic indicators of current collectors of high-speed electric rolling stock [Aerodinamicheskiye pokazateli tokopriyemnikov skorostnogo elektricheskogo podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2010, no. 1 (1). pp. 20 – 25.
6. Belyaev I. A. Aerodynamic Lifting Force of Current Receivers [Aerodinamicheskaya pod'yemnaya sila tokopriyemnikov]. *The journal of Bulletin of the Central Research Institute of the Ministry of Railways*, 1968, no. 8., pp. 5 – 8.
7. Kuznetsov A. K., Aerodynamic parameters of elements for high-speed motion [Aerodinamicheskiye pokazateli elementov dlya vysokoskorostnogo dvizheniya]. *Interuniversity collection of scientific papers*, 1980, pp. 28 – 31.

8. Alyamovsky A. A. SolidWorks. Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike (SolidWorks. Computer modeling in engineering practice). St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005, 472 p.
9. Launder B. E., Spalding D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, London Academic Press, 1972, 169 p.
10. Sidorov O. A., Chertkov I. E., Tomilov V. V., Utepbergenova S. M. *Patent RU 182273*, 09.08.2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мальцева Алла Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (961) 882-62-82.

E-mail: malalla@mail.ru

Утепбергенова Сандугаш Мырзабековна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирантка кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (904) 070-09-86.

E-mail: sandee86@mail.ru

Ли Валерий Николаевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы электроснабжения», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-70-87.

E-mail: livn@festu.khv.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Мальцева, А. В. Влияние формы полоза на аэродинамические характеристики скоростного токоприемника [Текст] / А. В. Мальцева, С. М. Утепбергенова, В. Н. Ли // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 45 – 53.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Malceva Alla Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (961) 882-62-82

E-mail: malalla@mail.ru

Utepbergenova Sandugash Myrzabekovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Graduate student of the Department «Power supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (904) 070-09-86.

E-mail: sandee86@mail.ru

Li Valerii Nikolaevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st. Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the department «Power-supply system», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-70-87.

E-mail: livn@festu.khv.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Malceva A. V., Utepbergenova S. M., Li V. N. The influence of the shape of the pantograph slide on the aerodynamic characteristics of speed current collectors. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 45 – 53 (In Russian).

УДК 629.46

В. А. Михеев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ВНЕДРЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ВАГОНОВ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКА

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос внедрения инновационных грузовых вагонов в контексте их влияния на формирование и оптимизацию показателей эффективности использования локомотивного парка. Приведены основные критерии инновационности вагонов, обеспечивающие значимый технико-экономический эффект для тягового подвижного состава. Выделены ключевые факторы, влияющие на формирование целевых функций изменения показателей эффективности использования локомотивов в грузовом движении. На основе анализа структурированных факторов влияния могут быть разработаны прикладные стратегии повышения эксплуатационной эффективности использования локомотивного парка.

Ключевые слова: грузовой вагон, локомотив, вес поезда брутто, среднесуточный пробег, среднесуточная производительность.

Vladislav A. Mikheyev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPLEMENTATION OF THE INNOVATION CARS AS MEANS OF IMPROVING THE LOCOMOTIVE PARK OPERATIONAL EFFICIENCY

Abstract. The article discusses the question of the innovation freight cars implementation in the context of their influence on forming and optimization of the locomotive park efficiency use indicators. Presents the main criteria of the innovation freight cars providing significant technical and economic effect for the traction rolling stock. Allocated the key factors influencing forming the criterion change functions of the cargo locomotives indicators of use efficiency. On the basis of the structured influence factors analysis can be developed the applied strategies of the locomotive park operational efficiency use.

Keywords: freight car, locomotive, train weight gross, average daily run, average daily productivity.

Период создания и внедрения вагонных конструкций нового поколения насчитывает второй десяток лет. Тем не менее только в последнее время удалось окончательно проанализировать и сформулировать, что такое инновационный вагон.

Корпоративной системой стандартизации ОАО «РЖД» в стандарте «Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности» установлен перечень критериев отнесения грузовых вагонов к инновационным, который должен быть подтвержден в процессе эксплуатации [1]. С позиции данного стандарта инновационный вагон представляется носителем совокупности измеримых количественных и качественных показателей в абсолютном или относительном выражении (рисунок 1).

С технической точки зрения инновационный грузовой вагон – это грузовой вагон, позволяющий реализовать при массовом внедрении определенный технико-экономический эффект для всех участников технологического процесса перевозок в сравнении с массовым вагоном-аналогом, с учетом применения технических решений, отвечающих достигнутому уровню техники [2].

Данное определение ставит интересную исследовательскую задачу оценки технико-экономической эффективности внедрения инновационных вагонов для каждого из участников процесса перевозок. При этом пара «инновационные вагоны – локомотивный парк» представляется ключевой, поскольку напрямую обеспечивает устойчивость и эффективность текущей эксплуатационной деятельности железнодорожного транспорта [3].

Установленные упомянутым стандартом правила оценки эффективности применения инновационных вагонов ставят приоритетом оценку текущих экономических затрат и лишь в этом контексте вводят и используют технические эксплуатационные показатели и параметры подвижного состава [1]. Такой подход исключает глубинный структурированный анализ взаимосвязи и взаимовлияния технико-экономических параметров пары «инновационные вагоны – локомотивный парк».



Рисунок 1 – Критерии отнесения грузовых вагонов к инновационным

В настоящей работе представлен вариант структурированной оценки влияния внедрения инновационных вагонов на эксплуатационную эффективность использования локомотивного парка.

В основе эксплуатационной эффективности использования локомотивного парка лежит среднесуточная производительность единичного локомотива [4]. Факторы, влияющие на производительность локомотивов в грузовом движении, представлены на рисунке 2.

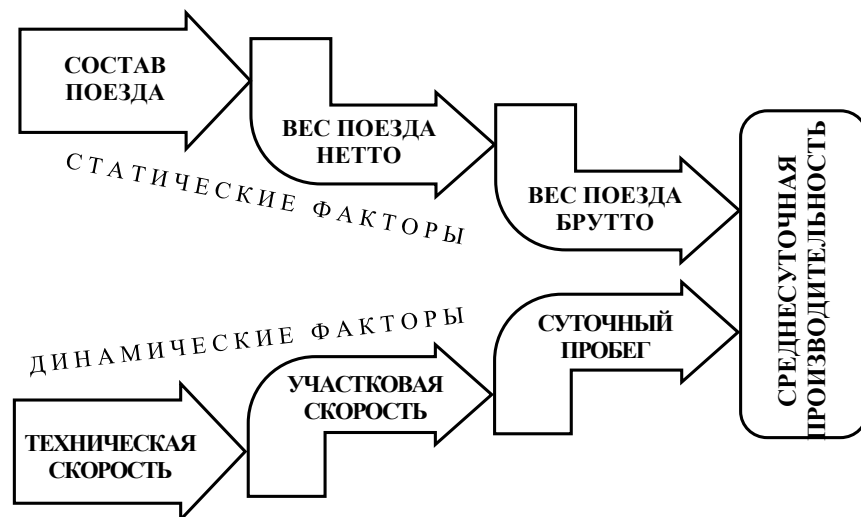


Рисунок 2 – Факторы, влияющие на производительность локомотива в грузовом движении

Группа статических факторов характеризует использование локомотива по мощности, группа динамических – по скорости.

Увеличение состава поездов приводит к соответствующему повышению их веса как нетто, так и брутто [5]. Однако с позиции критериев инновационности ключевым в группе статических факторов является вес поезда нетто. Именно его можно рассматривать как фактор повышения эффективности использования локомотивного парка. Это обуславливается снижением коэффициента тары инновационного вагона и увеличением коэффициента использования грузоподъемности. В результате обеспечивается повышение веса поезда брутто

при неизменном составе с одновременным сокращением тонно-километровой работы на перемещении тары вагона. Следует особо подчеркнуть, что все это реализуется в рамках установленных инфраструктурой ограничений на осевую и погонную нагрузку. На рисунке 3 показана зависимость потенциального роста грузоподъемности инновационного вагона при снижении коэффициента тары [2].

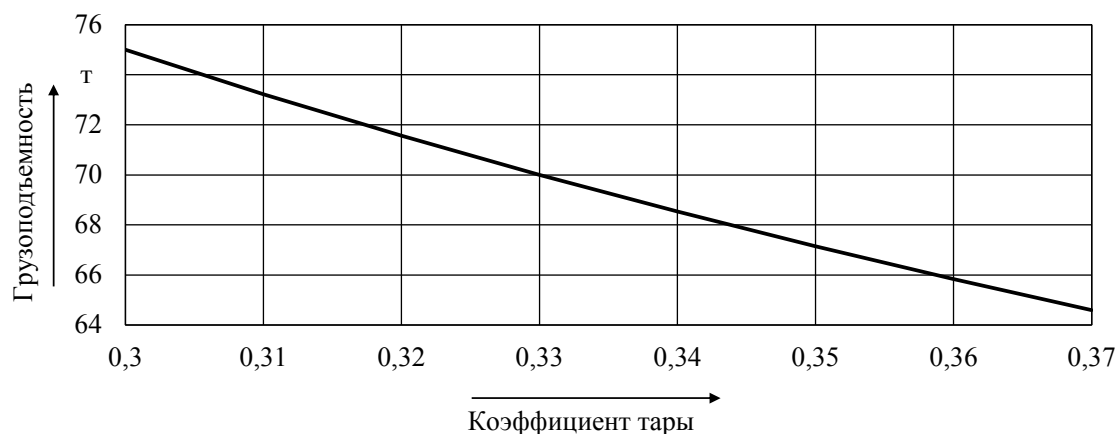


Рисунок 3 – Рост грузоподъемности инновационного вагона при снижении коэффициента тары

Снижение коэффициента тары инновационных вагонов реализуется двумя дополняющими друг друга способами: применением для кузова материалов высокой удельной прочности (главным образом высокопрочных сталей, алюминиевых сплавов и композиционных материалов) и уменьшением веса некузовных частей (здесь наиболее перспективны внедрение тележек с интегрированными тормозами и переход на твердые колеса с уменьшенной толщиной обода) [2]. Кроме того, объемы кузовов инновационных вагонов в среднем до 20 % превышают существующие параметры вагонов-аналогов, что при неизменной структуре грузооборота также увеличивает их эффективность. Важно и то, что это достигается при соблюдении ограничений, накладываемых габаритами подвижного состава и приближения строений.

В результате получаем, что при заданной длине состава, например, до 1000 м можно набрать из инновационных вагонов поезд большего веса, чем из вагонов-аналогов (таблица) [6]. При этом следует отметить, что инновационные вагоны имеют коэффициенты динамики, до 1,5 раза меньшие, чем у вагонов-аналогов. В этом случае можно одновременно увеличить и провозную способность, а следовательно, и производительность локомотивов и сохранить верхнее строение пути.

Характеристика поездов, сформированных из инновационных вагонов и вагонов-аналогов

Тип вагона	Вес тары, т	Грузоподъемность, т	Погонная нагрузка, т/м	Длина по осям сцепления, мм	Состав поезда, вагоны	Вес нетто груза в одном составе, тс	Вес тары поезда, тс	Вес брутто поезда, тс
Вагон-аналог (4-осный, полувагон, усредненный, производство УВЗ)	24,3	71	6,84	13920	71	5041	1725	6766
Инновационный вагон (4-осный, полувагон, усредненный, производство УВЗ)	23	75	7,04 (при допуске – не более 8,2)*	13920	71	5325	1633	6958

* Установлено по условию допустимого нагружения всех основных объектов инфраструктуры.

Целевое изменение веса поезда с инновационными вагонами определится по формуле:

$$Q_{\rightarrow \max}^{\delta} = \gamma_{\rightarrow 1}^H n_{\text{const}}^H q_{\rightarrow \max}^H \frac{1}{k_{\rightarrow \min}^H} + \gamma_{\rightarrow 1}^H n_{\text{const}}^H q_{\rightarrow \min}^T \frac{1}{k_{\rightarrow \max}^T}, \quad (1)$$

где $\gamma_{\rightarrow 1}^H$ – доля инновационных вагонов в структуре состава поезда;

n_{const}^H – состав поезда, вагоны;

$q_{\rightarrow \max}^H$ – полезная масса груза в составе, тс;

$k_{\rightarrow \min}^H$ – коэффициент соотношения использования вместимости инновационного вагона и вагона-аналога,

$$k_{\rightarrow \min}^H = \frac{V_{\text{п const}}^H}{V_{\text{п} \rightarrow \max}^H}; \quad (2)$$

$V_{\text{п const}}^H, V_{\text{п} \rightarrow \max}^H$ – удельный погрузочный объем вагона-аналога и инновационного вагона соответственно, м³/т;

$q_{\rightarrow \min}^T$ – масса тары в составе, тс;

$k_{\rightarrow \max}^T$ – коэффициент соотношения массы тары инновационного вагона и вагона-аналога,

$$k_{\rightarrow \max}^T = \frac{T_{\text{const}}^T}{T_{\rightarrow \min}^H}; \quad (3)$$

$T_{\text{const}}^T, T_{\rightarrow \min}^H$ – масса тары вагона-аналога и инновационного вагона соответственно, т.

Увеличение веса поезда с инновационными вагонами обеспечивается при уменьшении соотношения веса нетто поезда к брутто:

$$k_{\rightarrow \min}^Q = \frac{Q_{\rightarrow \min}^T}{Q_{\rightarrow \max}^{\delta}}, \quad (4)$$

где $k_{\rightarrow \min}^Q$ – коэффициент соотношения веса нетто поезда к весу брутто;

$Q_{\rightarrow \min}^T, Q_{\rightarrow \max}^{\delta}$ – вес поезда нетто и брутто соответственно, тс.

Показатели, характеризующие использование локомотивного парка по скорости, являются более сложными для структурированного анализа, но именно они являются значимым резервом повышения производительности локомотивов [7].

Участковая скорость зависит как от уровня технической скорости (в том числе и ходовой), так и от потерь времени в пределах участка. Потери определяются временем стоянок на промежуточных станциях, а также разгоном, замедлением и задержками поезда на перегонах [8].

Повышение участковой скорости за счет увеличения технической имеет ряд недостатков [4]. Во-первых, в этом случае возрастает основное удельное сопротивление движению и, как следствие, увеличиваются затраты топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов. Во-вторых, неизбежно увеличиваются износы движущихся и трущихся частей подвижного состава, а также и верхнего строения пути.

Рост участковой скорости предпочтительнее обеспечивать сокращением простоев поездов на промежуточных станциях и исключением задержек их на перегонах. Этот подход и реализуется внедрением инновационных вагонов. Здесь положительными факторами выступают увеличенные межремонтные интервалы и гарантийные пробеги, безотказность между техническими обслуживаниями и ремонтами, сокращение времени начально-конечных операций.

Эксплуатируемые инновационные вагоны позволяют реализовать межремонтные интервалы до 500 тыс. км и с перспективой до 750 тыс. – 1 млн км. Естественно, что это сопровождается и соответствующим повышением безотказности инновационных вагонов между

техническими обслуживаниями и ремонтами с вероятностью вплоть до 0,98. Снижающаяся частота отказов вагонов позволяет обоснованно увеличивать гарантийные пробеги без рисков для безопасности движения в процессе эксплуатации. Такого эффекта добиваются применением износостойких материалов и оптимизацией конструкции основных лимитирующих по отказам узлов и деталей вагонов [2].

Время начально-конечных операций включает в себя время на выполнение погрузочно-разгрузочных работ и время на восстановление работоспособности вагона после операций выгрузки. Современные конструкции кузовов вагонов позволяют ускорить выполнение операций выгрузки и погрузки, не теряя в качестве, и повысить их эффективность при существующих низкопроизводительных средствах механизации. Сокращается повреждаемость кузовов, а следовательно, и дополнительный простой во внеплановом ремонте.

Относительная долевая зависимость увеличения среднесуточного пробега локомотива при росте участковой скорости приведена на рисунке 4 [7].

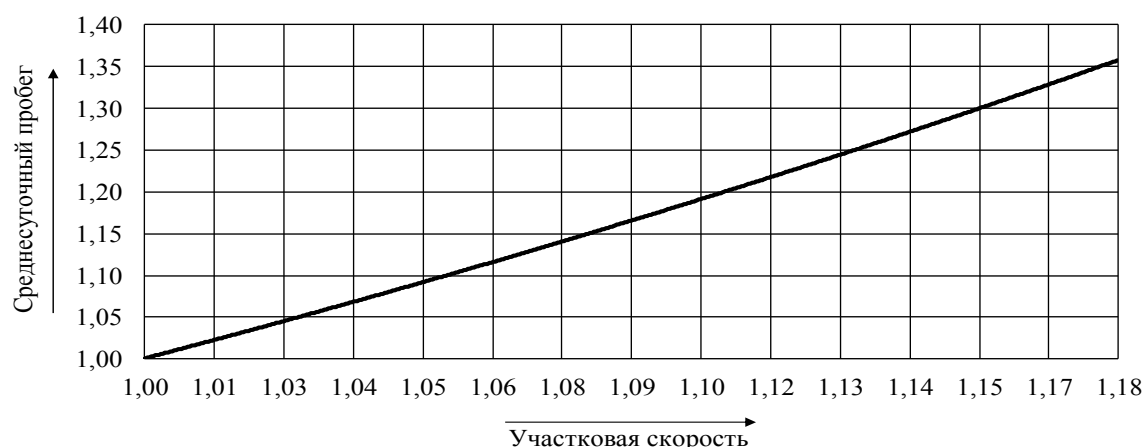


Рисунок 4 – Относительная долевая зависимость среднесуточного пробега от участковой скорости

Целевое изменение среднесуточного пробега локомотива определится по формуле:

$$\Delta S_{\rightarrow \max}^{\text{л}} = \frac{24}{\frac{1}{V_{\rightarrow \max}^{\text{у}}} + \frac{t_{\text{const}}^{\text{л}}}{L}}, \quad (5)$$

где $V_{\rightarrow \max}^{\text{у}}$ – участковая скорость, км/ч;

$t_{\text{const}}^{\text{л}}$ – нормативные простои локомотива, ч;

L – протяженность участка, км.

Структурированная оценка влияния внедрения инновационных вагонов на эксплуатационную эффективность использования локомотивного парка представлена на рисунке 5.

С учетом выражений (1) и (5) определяется целевое изменение среднесуточной производительности локомотива:

$$\Delta W_{\rightarrow \max}^{\text{л}} = \frac{W^{\text{л}}}{Q^{\text{б}}} \Delta Q_{\rightarrow \max}^{\text{б}} + \frac{W^{\text{л}}}{S^{\text{л}}} \Delta S_{\rightarrow \max}^{\text{л}}. \quad (6)$$

Слагаемые, входящие в выражение (6), отражают влияние двух последних результирующих эксплуатационных показателей (см. рисунок 4) на среднесуточную производительность единичного локомотива в грузовом движении. Первое слагаемое показывает эксплуатационный эффект от повышения веса поезда брутто, второе – от повышения среднесуточного пробега локомотива [9]. Результаты модельных расчетов относительного процентного влияния от внедрения усредненных инновационных 4-осных грузовых полувагонов на экс-

пулатационные показатели использования единичного локомотива за один рейс приведены на рисунке 6.



Рисунок 5 – Структуризация влияния показателей инновационных вагонов на производительность локомотива

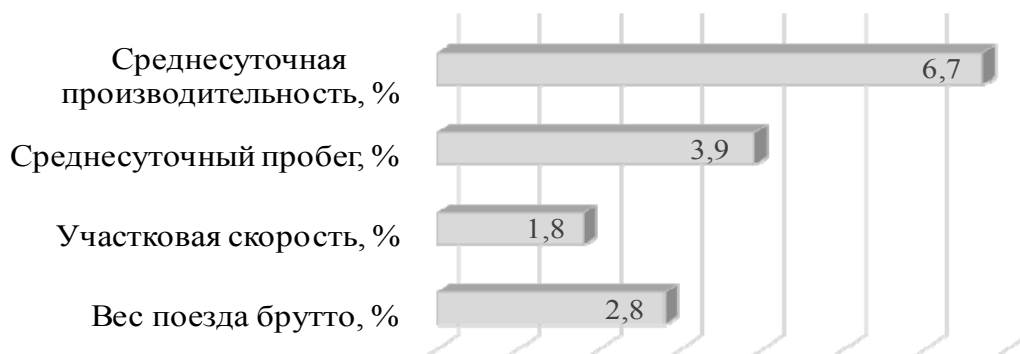


Рисунок 6 – Увеличение эксплуатационных показателей использования единичного локомотива за один рейс

Таким образом, выполненные в работе исследования и полученные результаты моделирования показывают, что эффективность использования локомотивного парка должна рассматриваться с учетом факторов положительного влияния от внедрения инновационных вагонов.

В заключение можно сделать следующие выводы:

- 1) внедрение инновационных вагонов повышает эксплуатационную эффективность использования локомотивного парка на основе интенсивных факторов и позволяет полностью реализовывать потенциальные возможности локомотивов независимо от вида тяги;
- 2) рассмотренный структурированный подход к оценке изменения эксплуатационной эффективности использования локомотивов при внедрении инновационных вагонов позволяет определить влияние на это изменение от каждой конкретной модели инновационного вагона и выполнить сравнение между ними по единой методике и на одинаковых показателях перевозочной работы.

Список литературы

1. Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности [Текст]: Стандарт ОАО «РЖД». – М., 2015. – 38 с.
2. Соколов, А. М. Научные основы создания и оценки эффективности внедрения инновационных вагонов [Текст] / А. М. Соколов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / Корпоративный ун-т ОАО «РЖД». – М. – 2015. – № 2. – С. 1 – 12.

3. Лapidус, Б. М. Отраслевая технологическая платформа «высокопроизводительный грузовой подвижной состав» – путь к использованию резервов провозной способности железных дорог [Текст] / Б. М. Лapidус, А. М. Соколов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / Российский ун-т транспорта. – М. – 2011. – № 4. – С. 3 – 8.

4. Валеев, Н. А. Критерии эффективности использования локомотивного парка [Текст] / Н. А. Валеев // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / Корпоративный ун-т ОАО «РЖД». – М. – 2015. – № 2. – С. 37 – 43.

5. Курбасов, А. С. Социальная значимость железных дорог России: потребности и возможности [Текст] / А. С. Курбасов // Транспорт Российской Федерации / Российский ун-т транспорта. – М. – 2009. – № 3-4 (22-23). – С. 58 – 60.

6. Параметры инновационных вагонов и некоторые проблемы их реализации [Текст] / В. Н. Филиппов, А. В. Смольянинов и др. // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 1 (52). – С. 25 – 31.

7. Лакин, И. К. Анализ основных показателей работы железнодорожного транспорта [Текст] / И. К. Лакин // Наука и Транспорт / Российский ун-т транспорта. – М. – 2007. – № 1 (1). – С. 60 – 63.

8. Эксплуатация электровазов: Конспект лекций [Текст] / Под ред. Ю. Н. Виноградова / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2007. – 109 с.

9. Исаков, М. П. Анализ эксплуатационных показателей полигонов [Текст] / М. П. Исаков // Мир Транспорта / Российский ун-т транспорта. – М., 2014. – № 5. – С. 162 – 166.

References

1. *Vagony gruzovye innovacionnye. Pravila ocenki ehkonomicheskoy ehffektivnosti: standart ОАО «RZHD»* (The innovation freight cars. Rules of assessment of economic efficiency: standard of JSC «Russian Railways»). Moscow, 2015, 38 p.

2. Sokolov A. M. Scientific bases of creation and assessment of the innovation cars implementation efficiency [Nauchnye osnovy sozdaniya i ocenki ehffektivnosti vnedreniya innovacionnyh vagonov]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta ОАО «RZHD» – Bulletin of the Joint educational council of JSC «Russian Railways»*. 2015, no. 2, pp. 1 – 12.

3. Lapidus B. M., Sokolov A. M. The industry technology platform «high-performance cargo rolling stock» – a way to use of the railroads carrying ability reserves [Otraslevaya tekhnologicheskaya platforma «vysokoproizvoditel'nyj gruzovoj po-dvizhnoj sostav» – put' k ispol'zovaniyu rezervov provoznoj sposobnosti zheleznyh dorog]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zhe-leznodorozhnogo transporta – The Messenger of research institute of railway transport*, 2011, no. 4, pp. 3 – 8.

4. Valeev N. A. Criteria of the locomotive park efficiency use [Kriterii ehffektivnosti ispol'zovaniya lokomotivnogo parka]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta ОАО «RZHD» – Bulletin of the Joint educational council of JSC «Russian Railways»*, 2015, no. 2, pp. 37 – 43.

5. Kurbasov A. S. Social importance of the Russia railroads: requirements and opportunities [Social'naya znachimost' zheleznyh dorog Rossii: potrebnosti i vozmozhnosti]. *Transport Rossijskoj Federacii – Transport of the Russian Federation*, 2009, no. 3 – 4 (22 – 23), pp. 58 – 60.

6. Filippov V. N., Smolyaninov A. V., Kozlov I. V., Podlesnikov Ya. D. The innovation cars parameters and some problems their implementations [Parametry innovacionnyh vagonov i nekotorye problemy ih realizacii]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2017, no. 1 (52), pp. 25 – 31.

7. Lakin I. K. Analysis of key railway transport work indicators [Analiz osnovnyh pokazatelej raboty zheleznodorozhnogo transporta]. *Nauka i Transport – Science and Transport*, 2007, no. 1 (1), pp. 60 – 63.

8. Vinogradov Yu. N. *Ehkspluatatsiya ehlektrovozov* (Operation of electric locomotives). Ye-katerinburg: RIO YSTU, 2007, 109 p.

9. Isakov L. S. Analysis of the polygons operating characteristics [Analiz ehkspluatacionnyh pokazatelej poligonov]. *Mir Transporta – World of Transport*, 2014, no. 5, pp. 162 – 166.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Михеев Владислав Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikheyev Vladislav Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Cars and carriage economy», OSTU.

E-mail: Micheev_V_A@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Михеев, В. А. Внедрение инновационных вагонов как средство повышения эксплуатационной эффективности локомотивного парка [Текст] / В. А. Михеев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 54 – 61.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mikheyev V. A. Implementation of the innovation cars as means of improving the locomotive park operational efficiency. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 3, no 35, pp. 54 – 61 (In Russian).

УДК 629.4

В. А. Нехаев, М. Ю. Сафронова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

НОВЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ КВАЗИИНВАРИАНТНОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. В конце прошлого столетия ВНИИЖТ выдвинул идею создания инвариантных систем рессорного подвешивания, которое до настоящего времени не реализовано из-за отсутствия механических инверторов. Однако в конце 80-х гг. предыдущего века на базе фермы Мизеса были построены первые инвариантные системы, обладающие одним, но существенным недостатком – огромными распирающими горизонтальными усилиями, что предопределяло большой износ взаимодействующих поверхностей.

В то же время школой ученых-механиков профессора М. П. Пахомова было предложено модернизировать контакт с помощью подшипников и фасонного подвижного узла. Это позволило в несколько раз уменьшить указанные выше горизонтальные силы, кроме того, появилась возможность управления силовой характеристикой корректора внешнего возмущения.

В статье предложен новый подход к расчету силовых характеристик квазиинвариантных до ε систем подвешивания механических объектов, отличающийся от других подходов простотой и логической ясностью и стройностью, однако требующий обеспечить процедуру идентификации силовой характеристики компенсатора внешнего возмущения физическими устройствами.

Ключевые слова: инвариантность, механическая система, подвешивание, силовая характеристика, защищаемый объект, целевая функция.

Viktor A. Nekhaev, Marina Yu. Safronova

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

NEW APPROACH TO CREATION OF QUASIINVARIANT VIBROPROTECTIVE SYSTEM

Abstract. In article the new approach to calculation of power characteristics of quasiinvariant systems of suspension of mechanical objects different from other approaches by simplicity and logical clarity, however demanding the

procedure of identification of the power characteristic of the compensator of external indignation of physical devices is offered.

Keywords: *invariancy, mechanical system, suspension, the power characteristic, the protected object, criterion function.*

В связи с ростом мощности машин и механизмов проблема их виброзащиты была и будет актуальной задачей для ученых-механиков. В настоящее время развиваются три класса таких систем: пассивные, полуактивные (полупассивные) и активные [1 – 3]. Если с пассивными системами все ясно – это набор пружин и демпферов трения как вязкого, так и сухого, то полуактивные и активные системы находятся в стадии интенсивного развития.

Активные системы являются системами автоматического регулирования, поэтому требуют наличия дополнительного источника энергии, различных датчиков, усилителей, промежуточных устройств и, возможно, микропроцессоров. Однако известно, что чем больше элементов в системе, тем меньше ее надежность.

Полуактивные системы виброзащиты ничего этого не требуют, однако нужно априори знать, в каких условиях эксплуатации эта система будет работать, другими словами, достаточно знать самый наихудший вариант и на него настраивать систему, которая заряжается потенциальной энергией только один единственный раз при постановке устройства на защищаемый объект.

Развитием этого класса виброзащитных устройств занимается школа ученых-механиков, созданная в Омском институте инженеров железнодорожного транспорта в прошлом веке заслуженным деятелем науки и техники Российской Федерации, доктором технических наук, профессором Михаилом Прокопьевичем Пахомовым при кафедре «Взаимодействие подвижного состава и пути и динамика локомотивов». И в настоящее время школа продолжает существовать теперь в Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС).

Настоящая статья продолжает развитие класса квазиинвариантных до ε систем [4 – 8] рессорного подвешивания механических объектов, являющихся, на наш взгляд, наиболее перспективными из категории полуактивных виброзащитных систем, которые не требуют дополнительных устройств, механизмов и источников энергии. Заметим, что инвариантность подразумевает независимость выходных координат от внешнего возмущения, действующего на защищаемый объект.

Независимость выходных координат от возбуждения может быть полной, когда все выходные координаты системы не реагируют на внешние условия, или частичной, когда только часть выходных координат системы не реагирует на внешнее возмущение. Достигнуть полной инвариантности системы от внешнего воздействия чрезвычайно сложно, практически невозможно, ибо, как показывает практика, идеал всегда недостижим. К нему лишь можно асимптотически приближаться. Построение инвариантных систем требует выполнения необходимых и достаточных условий. Здесь мы остановимся только на необходимых условиях инвариантности.

Достаточные условия – это требование существования физических устройств, с помощью которых реализуется инвариантная подвеска защищаемого объекта.

Главным необходимым свойством инвариантности является обязательное наличие в системе двух каналов передачи внешнего возмущения на защищаемый объект, в одном из них возбуждение инвертируется, в результате чего суммарное воздействие равно нулю. При этом очевидно, что совсем неважен характер внешнего возбуждения, а это очень важно, ибо расчет таких виброзащитных систем можно вести, считая воздействие гармоническим.

Нужно отметить, что если механическая система обладает несколькими степенями свободы, то можно говорить об инвариантности конкретной выходной координаты от конкретного внешнего возмущения. Полагаем, что нельзя утверждать об инвариантности всех вы-

ходных координат системы от конкретного внешнего возбуждения, по крайней мере авторам статьи такие результаты неизвестны.

Обычно расчет квазиинвариантных систем всегда осуществлялся с помощью передаточных функций, т. е. применялся классический подход [9 – 13]. Следует отметить, что первоначально идея проектирования инвариантного рессорного подвешивания подвижного состава российских железных дорог появилась в работе [14]. До настоящего времени идея полностью не реализована потому, что во втором канале передачи возмущения на защищаемый объект инвариантное рессорное подвешивание должно инвертироваться.

В электронике это требование выполняется достаточно легко с помощью инверторов. В механике таких инверторов не существует, поэтому одно из экзотических предложений состояло в том, чтобы железнодорожный экипаж имел специальную массу с очень, очень низкой частотой и она служила бы точкой опоры. Но возить такую дополнительную массу экономически невыгодно. Омской школе ученых-механиков удалось создать такой механический инвертор внешнего возбуждения системы.

Оказалось, что для физической реализации таких систем подходят механические системы с несколькими положениями статического равновесия, из которых лишь одно неустойчивое, а остальные устойчивые. На участке движения между этими положениями появляется падающая ветвь силовой характеристики, следовательно, угол наклона касательной превышает $\pi/2$, т. е. можно говорить, если можно так выразиться, об отрицательной жесткости таких устройств. Ярким примером такого устройства является ферма Мизеса [15], или масленка для швейных машинок.

В статье предлагается совершенно новый взгляд на данную проблему, основанный на механической трактовке самого понятия инвариантность, т. е. независимость. Пусть на защищаемый механический объект действуют две силы, ведь квазиинвариантная виброзащитная система, как показано выше [4, 5], должна обладать двумя каналами. Тогда сумма сил, действующих на защищаемый объект,

$$Q(\delta) + F(\delta) = 0, \quad (1)$$

здесь $Q(\delta) = C(\delta)$ – силовая характеристика линейного упругого основного элемента подвешивания, например, обычная линейная пружина; δ – прогиб этого упругого элемента; $F(\delta)$ – отыскиваемая, но пока не известная нам сила. Согласно первому и второму законам Ньютона, если на твердое тело действует уравновешенная система сил, главные векторы и главные моменты которой равны нулю, то твердое тело сохраняет свое первоначальное состояние.

Математическое условие (1) выполняется, разумеется, только для абсолютно инвариантных систем, чего достигнуть в каждый конкретный момент времени в действительности невозможно. Поэтому переформулируем задачу так – пусть условие абсолютной инвариантности системы выполняется в среднеквадратическом смысле на защитном ходе виброзащитной системы, т. е.

$$\Phi = \int_0^D [C\delta + F(\delta)]^2 d\delta \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $\Phi(\delta)$ – целевая функция для определения параметров отыскиваемой функции $F(\delta)$, D – защитный ход устройства.

Зададимся видом функции $F(\delta)$. Учитывая тот факт, что построение абсолютно инвариантной системы невозможно, примем к рассмотрению некоторый полином, который должен с определенной точностью аппроксимировать падающую силовую характеристику корректо-

ра внешнего возмущения (в принципе степень полинома может быть любой, но мы ограничили степень тройкой исходя из предыдущего опыта проектирования таких систем):

$$F(\delta) = a_1\delta + a_3\delta^3, \quad (3)$$

здесь a_1 и a_3 – неизвестные коэффициенты, подлежащие определению. Подчеркнем, что важно, чтобы отыскиваемая функция обладала нечетной симметрией, в противном случае появляется постоянная составляющая, которую не создает основной упругий элемент подвешивания.

Подставляя формулу (3) в (2) и минимизируя целевую функцию Φ , т. е. отыскивая частные производные по коэффициентам аппроксимирующего полинома a_1 и a_3 и приравнявая их к нулю, находим систему алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов (отметим, что используемая методика в принципе является методом наименьших квадратов, широко применяемым в регрессионном анализе):

$$\begin{cases} \frac{1}{3}a_1 + \frac{1}{5}a_3 = -\frac{1}{3}C; \\ \frac{1}{5}a_1 + \frac{1}{7}a_3 = -\frac{1}{5}C, \end{cases} \quad (4)$$

решение которой дает следующие значения:

$$\begin{cases} a_1 = -C; \\ a_3 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Получили важный и очевидный результат с точки зрения как механики, так и теории автоматических систем управления, откуда родом идея инвариантности подвешивания, где значительно легче осуществить инвертирование исходного сигнала во втором канале передачи возмущения, оно должно быть обязательно инвертировано.

Итак, второй канал передачи внешнего возмущения должен обладать «отрицательной» жесткостью, т. е. физическое устройство, реализующее второй канал, должно иметь падающую силовую характеристику, когда касательная к ней и ось абсцисс образуют тупой угол, следовательно, тангенс такого угла обладает отрицательным значением. Поэтому мы говорим об отрицательной жесткости в смысле утверждения указанного выше, в реальности жесткость всегда является положительной величиной.

Подчеркнем, что данное доказательство необходимости создания квазиинвариантных систем подвешивания значительно проще, чем то, которое используется учениками школы ученых-механиков до сих пор, когда параметры компенсатора внешнего возбуждения отыскиваются сразу для суммарной силовой характеристики рессорного подвешивания механического объекта.

Однако мы не получили пока нужного результата в том смысле, что не указали на необходимость выполнения достаточных условий инвариантности, заключающихся в физической реализации необходимых условий (двухканальности передачи внешнего воздействия). Конечно, можно указать физические устройства, обладающие, если допустимо так выразиться, «отрицательной» жесткостью, – это устройства, имеющие как минимум несколько положений равновесия, например, три, из которых два устойчивых и одно неустойчивое (например, ферма Мизеса, или масленка).

Рассмотрим отношение сил:

$$\alpha = \frac{F}{Q} = \frac{a_1D + a_3D^3}{CD} = \frac{a_1 + a_3D^2}{C}, \quad (6)$$

где α – безразмерный коэффициент, равный минус единице для абсолютно инвариантной системы подвешивания. Как указывалось выше, создать абсолютно инвариантную систему подвешивания сегодня невозможно хотя бы потому, что реальные механические системы всегда обладают трением, а как ввести в систему «антитрение» сегодня неизвестно. Следовательно, будем полагать, что величина коэффициента α нам задана.

Тогда коэффициент a_1 может быть вычислен с помощью формулы (6):

$$a_1 = \alpha C - a_3 D^2. \quad (7)$$

Подставляя выражение (7) в (3), найдем:

$$F(\delta) = (\alpha C - a_3 D^2) \delta + a_3 \delta^3, \quad (8)$$

или

$$F(\delta) = \alpha C \delta + a_3 (\delta^2 - D^2) \delta. \quad (9)$$

Внося формулу (9) в выражение (2), имеем новое уравнение для целевой функции в виде:

$$\Phi = \int_0^D [C(1 + \alpha) \delta + a_3 (\delta^2 - D^2) \delta]^2 d\delta \rightarrow \min. \quad (10)$$

Вычисляя интегралы в формуле (10), которые являются табличными, получаем значение целевой функции:

$$\Phi = \frac{8}{105} a_3^2 D^7 - \frac{4}{15} a_3 C (1 + \alpha) D^5 + \frac{1}{3} C^2 (1 + \alpha)^2 D^3. \quad (11)$$

Для определения коэффициента a_3 достаточно взять частную производную от целевой функции к нему:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_3} = \frac{16}{105} D^7 a_3 - \frac{4}{15} (1 + \alpha) C D^5 \quad (12)$$

и приравнять ее к нулю, в результате после необходимых расчетов получим:

$$a_3 = \frac{7(1 + \alpha)C}{4D^2}. \quad (13)$$

По формулам (7) и (13) было получено: $a_1 = -1212,5$ и $a_3 = 27250$.

На рисунке 1 представлены силовые характеристики нелинейной системы при следующих исходных данных: $C = 1500$ кгс/м, $D = 0,1$ м, $\alpha = -0,875$. Из рисунка 1 нетрудно установить, что на отрезке изменения прогиба подвешивания от $-0,05$ до $0,05$ м суммарная силовая характеристика близка к нулю, т. е. на этом отрезке система подвешивания обладает квазиинвариантными свойствами. Другими словами, внешнее возмущение на защищаемый объект практически не передается.

Ниже будет показан характер изменения суммарной силовой характеристики подвешивания нелинейной механической системы в зависимости от коэффициента α (рисунок 2).

Таким образом, с уменьшением коэффициента α механическая система приближается к инвариантности, достигает которую при $\alpha = -1$. Вблизи нулевого прогиба подвешивания теоретически можно обнаружить «отрицательную» жесткость, которая в реальных условиях будет уничтожена трением, которым неизбежно обладает любая реальная система.

Силовая характеристика компенсирующего устройства, основанная на принципе компенсации внешнего возмущения (часто в статьях можно найти термин «система с перескоком», что отражает физическую суть данных физически нелинейных систем) [5, 6, 8], приведена на рисунке 3, из которого можно сделать вывод о том, что в пределах изменения прогиба основного упругого элемента от $-0,05$ до $0,05$ м силовая характеристика хорошо представляется прямой. Следовательно, на этом отрезке можно обеспечить хорошую виброзащиту механическому объекту.

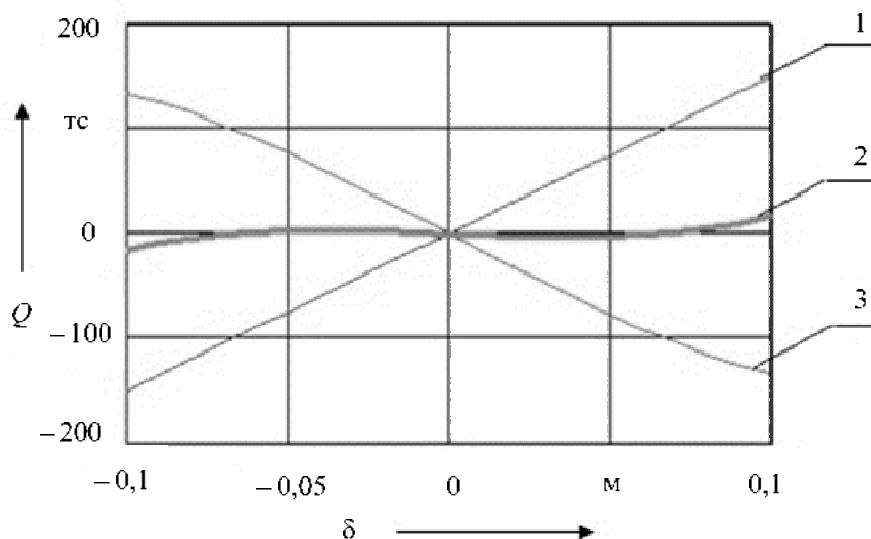


Рисунок 1 – Силовые характеристики рассматриваемой системы:
1 – основной упругий элемент $Q(\delta)$; 2 – суммарная силовая $Q(\delta) + F(\alpha, \delta)$; 3 – компенсатор $F(\alpha, \delta)$

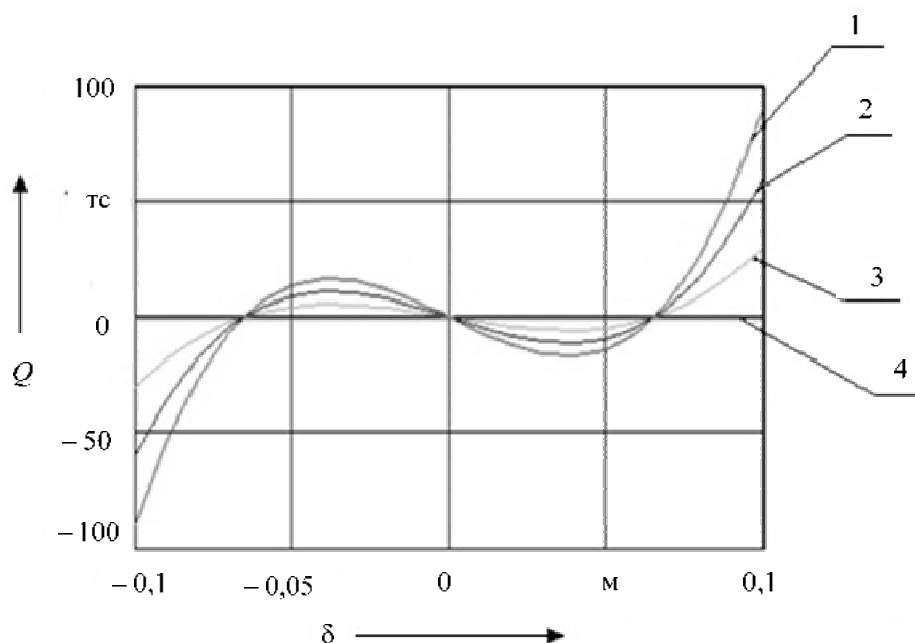


Рисунок 2 – Изменение суммарной силовой характеристики подвешивания нелинейной механической системы: 1 – $Q(\delta) + F(-0,4, \delta)$; 2 – $Q(\delta) + F(-0,6, \delta)$; 3 – $Q(\delta) + F(-0,8, \delta)$; 4 – $Q(\delta) + F(-1, \delta)$ (абсолютно инвариантная система)

Жесткостная характеристика полученной нелинейной механической системы представлена на рисунке 4.

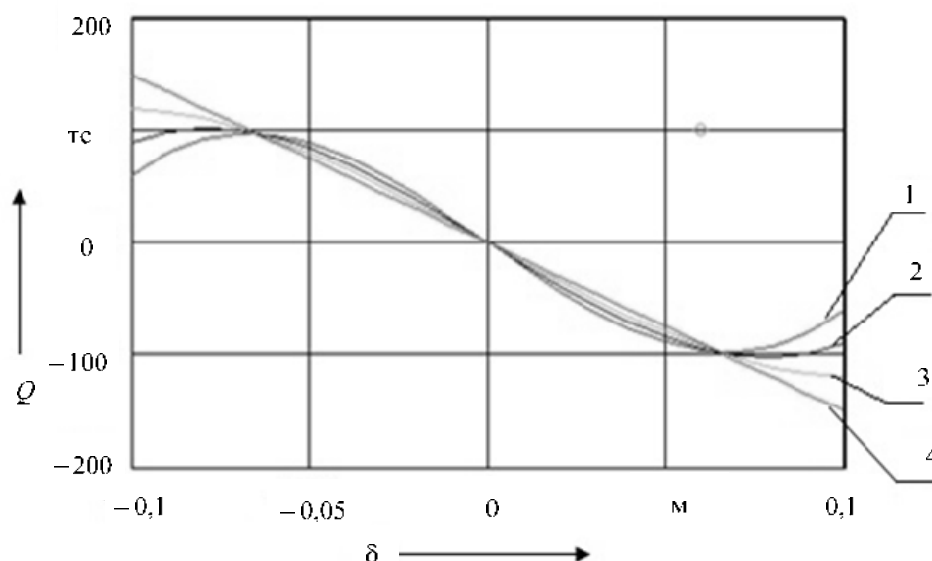


Рисунок 3 – Зависимость силовой характеристики компенсирующего устройства от коэффициента α : 1 – $F(-0,4, \delta)$; 2 – $F(-0,6, \delta)$; 3 – $F(-0,8, \delta)$; 4 – $F(-1, \delta)$

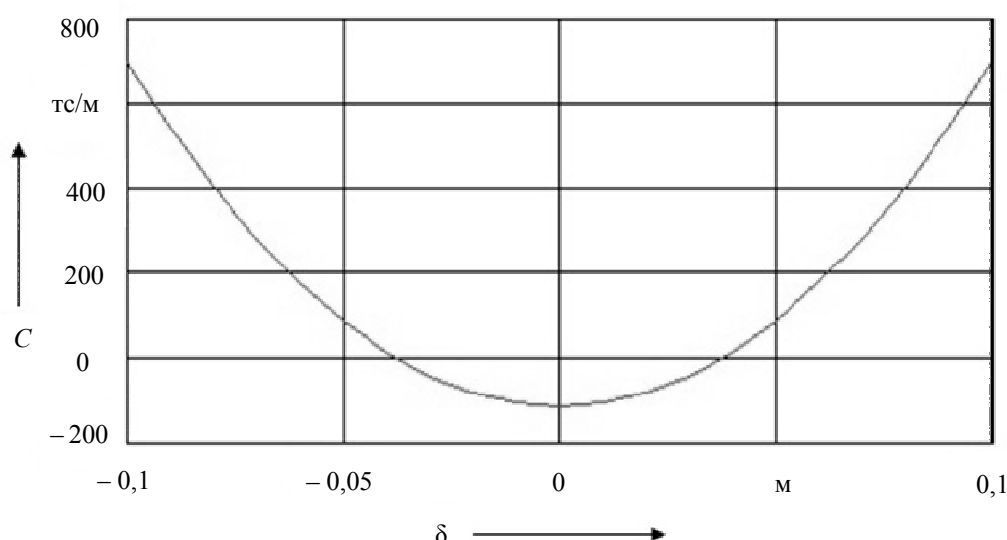


Рисунок 4 – Жесткостная характеристика нелинейной механической квазиинвариантной системы

На отрезке прогибов от $-0,05$ до $0,05$ м вблизи положения статического равновесия система обладает отрицательной жесткостью.

На рисунке 5 показана оценка отношения нелинейной части суммарной силовой характеристики к линейной части, что позволит оценить характер колебательной системы для таких систем подвешивания объекта.

Квазиинвариантная система подвешивания защищаемого объекта гарантированно носит квазилинейный характер, ибо в пределах защитного хода от 0 до $0,02$ м отношение нелинейного слагаемого к линейному изменяется всего-то на $0,008$. Таким образом, математическая модель колебания защищаемого объекта будет описываться квазилинейными дифференциальными уравнениями, а коэффициент малости μ можно принять равным приблизительно

0,2. Для их интегрирования можно будет применять практически любые методы нелинейной механики, в том числе и асимптотические. Авторы в дальнейшем, видимо, ограничатся методами гармонического баланса и гармонической линеаризации. В последнем случае важно, что нелинейная суммарная силовая характеристика обладает нечетной симметрией и не имеет постоянной составляющей.

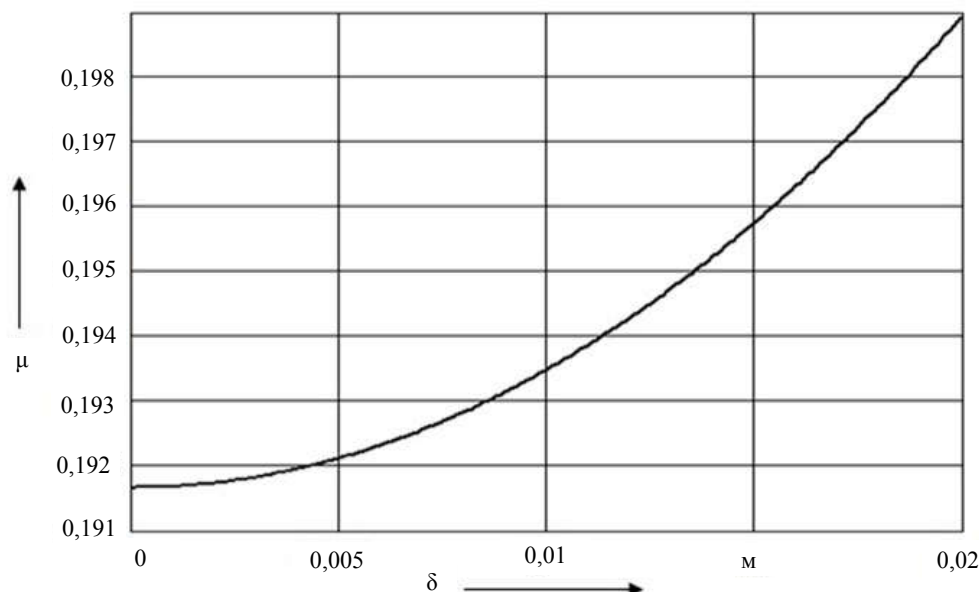


Рисунок 5 – Оценка малости нелинейного слагаемого суммарной силовой характеристики квазиинвариантной системы подвешивания объекта

Итак, следует сделать следующий вывод: создана новая методика построения квазиинвариантных до ε систем поддрессирования механических объектов, требующая, однако, идентификации с помощью соответствующих физических элементов (удовлетворение второму достаточному условию теории инвариантности динамических систем). Для ее применения достаточно в качестве исходной информации знать жесткость основного несущего элемента подвешивания C и величину защитного хода системы D .

Список литературы

1. Хоменко, А. П. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев, Ю. В. Ермошенко / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2012. – 288 с.
2. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов [Текст] / С. В. Елисеев, Ю. П. Резник и др. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2008. – 523 с.
3. Eliseev S. V., Lukyanov A. V., Reznik Yu.N., Khomenko A. P. Dynamics of Mechanical Systems with Additional Ties. Irkutsk, 2006. – 315 p.
4. Кухтенко, А. И. Проблема инвариантности в автоматике [Текст] / А. И. Кухтенко. – Киев: Гостехиздат, 1963. – 376 с.
5. Петров, Б. Н. О реализуемости условий инвариантности. Теория инвариантности и ее применение в автоматических системах [Текст] / Б. Н. Петров / АН СССР. – М., 1959. – С. 59.
6. Петров, Б. Н. Методы проектирования систем автоматического управления [Текст] / Б. Н. Петров, В. В. Солодовникова, Ю. И. Топчиева. – М.: Машиностроение, 1967. – 704 с.
7. Елисеев, С. В. Структурная теория виброзащитных систем [Текст] / С. В. Елисеев. – Новосибирск: Наука, 1978. – 224 с.

8. Кухаренко, В. П. Механические колебательные системы с дополнительными инерционными элементами [Текст]: Автореф. дис... канд. техн. наук: 01.02.06 / Кухаренко Виктор Петрович. – Новосибирск, 1985. – 28 с.
9. Nekhaev V. A., Nikolayev V. A. Synthesis of invariant vibroprotection system (theory and practice). Nonlinear vibration problems. Poland, Warszawa, 1993. pp. 313 – 324.
10. Galiev I. I., Nekhaev V. A., Nikolaev V. A., Gorbachev A. N. Dynamic properties of vehicles with invariant vibroprotection system. The papers of the 1-st Russian Korean International Symposium on Applied Mechanics. Novosibirsk, 2001. pp. 63 – 68.
11. Нехаев, В. А. Взаимодействие экипажа с квазиинвариантной системой подвешивания и неравноупругого по протяженности пути [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Нехаев Виктор Алексеевич. – Омск, 1983. – 217 с.
12. Николаев, В. А. Синтез системы виброизоляции машиниста локомотива, основанной на принципе компенсации возмущений [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Николаев Виктор Александрович. – Омск, 1985. – 198 с.
13. Виброзащита человека-оператора на основе применения принципа регулирования по возмущению [Текст] / В. А. Нехаев, В. А. Николаев и др. // Материалы междунар. конф. / Омский гос. ун-т. – Омск, 2018. – № 2. – С. 33.
14. Тележечные экипажи локомотивов для повышенных скоростей движения [Текст] / Науч. тр. ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 248. – 304 с.
15. Каудерер, Г. Нелинейная механика: Пер. с нем [Текст] / Г. Каудерер. – М., 1961. – 372 с.

References

1. Homenko A. P., Eliseev S. V., Ermoshenko Yu. V. *Sistemnyi analiz i matematicheskoe modelirovanie v mehatronike vibrozashitnih system* (Systems analysis and mathematical model operation in mechatronics of vibroprotective systems). Irkutsk: izd. IrGUPS, 2012, 288 p.
2. Eliseev S. V., Reznik Yu.P., Homenko A. P., Zasyadko A. A. *Dinamicheskii sintez v obobshchennih zadachah vibrozashiti i vibroizolyacii tehnikeskikh obektov* (Dynamic synthesis in the generalized problems of vibroprotection and a vibration insulation of technical objects). Irkutsk: izd. IrGUPS, 2008, 523 p.
3. Eliseev S. V., Lukyanov A. V., Reznik Yu.N., Khomenko A. P. Dynamics of Mechanical Systems with Additional Ties. Irkutsk: Irkutsk State University, 2006, 315 p.
4. Kuhtenko A. I. *Problema invariantnosti v avtomatike* (Invariancy problem in automatic equipment). Kiev: Gostehizdat, 1963, 376 p.
5. Petrov B. N. *O realizuemosti uslovii invariantnosti. Teoriya invariantnosti I ee primeneniye v avtomaticheskikh sistemah* (About feasibility of conditions of invariancy. The theory of invariancy and its application in automatic systems). Moscow: AN USSR, 1959, 59 p.
6. Solodovnikova B. N., Topcheeva Yu V. V. *Metodi proektirovaniya system avtomaticheskogo upravleniya* (Design methods of systems of automatic control). Moscow: Mashinostroenie, 1967, 704 p.
7. Eliseev S. V. *Strukturnaya teoriya vibrozashitnih system* (Structural theory of vibroprotective systems). Novorossiysk: Nauka, 1978, 224 p.
8. Kuharenko V. P. *Mehanicheskie kolebatelnye sistemi s dopolnitelnimi inercionnymi elementami: avtoreferat dis. Kandidata tehnikeskikh nauk*. Candidate of Technical Sciences. Novosibirsk, 1985, 28 p.
9. Nekhaev V. A., Nikolayev V. A. Synthesis of invariant vibroprotection system (theory and practice). Nonlinear vibration problems, Poland, Warszawa, 1993, pp. 313 – 324.
10. Galiev I. I., Nekhaev V. A., Nikolaev V. A., Gorbachev A. N. Dynamic properties of vehicles with invariant vibroprotection system. The papers of the 1-st Russian Korean International Symposium on Applied Mechanics. Novosibirsk, 2001. pp. 63 – 68.

11. Nekhaev V. A. *Vzaimodeistvie ekipaja s kvaziinvariantnoi sistemoi podveshivaniya inervnouprugogo po protyajennosti puti: Dissertaciya kandidata tehnikeskikh nauk*. Candidate of Technical Sciences. Omsk: OSTU, 1983, 217 p.
12. Nikolayev V. A. *Sintez system ivibroizolyacii mashinista lokomotiva, osnovannoi na principe kompensacii vozmuschenii: Dissertaciya kandidata tehnikeskikh nauk*. Candidate of Technical Sciences. Omsk: OSTU, 1985, 198 p.
13. Nehaev V. A., Nikolaev V. A., Zakernichnaya N. V., Baglaichuk S. V. *Vibrozaschita cheloveka operatora na osnove primeneniya principa regulirovaniya po vozmuscheniyu* (Vibroprotection of the person of the operator on the basis of use of the principle of regulation on indignation). OSTU, 2018, 33 p.
14. *Telejechnie ekipaji lokomotivov dlya povishennih skorostei dvizheniya* (Cart crews of locomotives for the increased traveling speeds). Nauch. tr. VNIITa. M.: Transjeldorizdat, 1962, 304 p.
15. Kauderer G. *Nelineinaya mehanika* (Nonlinear mechanics). Per. s nem. M.: IL, 1961, 372 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нехаев Виктор Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор, ОмГУПС.
Тел.: +7(3812) 37-60-82.

Сафронова Марина Юрьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Аспирантка кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nekhaev Viktor Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation
Doctor of Technical Sciences, Professor, OSTU.
Phone: +7(3812)376082.

Safronova Marina Yurevna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation
Post-graduate student of the department «Theoretical Mechanics», OSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нехаев, В. А. Новый подход к построению квазиинвариантной виброзащитной системы [Текст] / В. А. Нехаев, М. Ю. Сафронова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 61 – 70.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nekhaev V. A., Safronova M. Y. New approach to creation of quasiinvariantvibroprotective system. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 3, no 35, pp. 61 – 70 (In Russian).

УДК 629.4.027.4

А. А. Рауба, В. В. Дюндин

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ В СОЕДИНЕНИИ «КОЛЕСНЫЙ ЦЕНТР – БАНДАЖ»

Аннотация. Из-за непредвиденного ослабления натяга бандажа на колесном центре замена бандажа может производиться раньше закладываемого ресурса, что влечет за собой не только повышение затрат на ремонт, но и длительный простой локомотива. В статье приведены факторы, сгруппированные по характеру возникновения, которые оказывают существенное влияние на прочность соединения «колесный центр – бандаж». В работе основное внимание уделено механическим свойствам материалов сопряжения. Представлены расчеты, демонстрирующие существенное снижение контактного давления при тепловых нагрузках как для

нового, так и для изношенного бандажа. Показано, что повышение прочностных характеристик, связанных с возрастанием твердости материалов, может оказать существенное влияние на прочность посадки бандажа на колесный центр. Проведены предварительные расчеты по оценке влияния твердости материалов бандажа и колесного центра на коэффициент трения в соединении.

Приведенный в статье анализ влияния механических свойств материалов бандажных колес может быть использован при совершенствовании технологии формирования колесных пар локомотивов, а также при разработке новых материалов, что в свою очередь будет способствовать повышению работоспособности колесных пар локомотивов.

Ключевые слова: колесный центр, бандаж, прочность, контактное давление, фактическая площадь, твердость.

Alexander A. Rauba, Vadim V. Dyundin

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS ON THE STRENGTH IN THE «WHEEL CENTER – BANDAGE» COMPOUND

Abstract. The cranking of the bandages in service leads to an earlier replacement of the bandage than the pawned resource, which entails both an increase in maintenance costs and a long, simple locomotive for repair. The article shows the main factors that have a significant effect on the strength of the «wheel center – bandage» connection. Particular attention is paid to the mechanical properties of materials.

The calculation of the reduction of the contact pressure from the heating of the bandage has been carried out, both for the new and for the worn out. New materials for manufacturing of bandage wheels are considered. It was found that the hardness of the materials can have a significant effect on the strength of the bandage fit to the wheel center.

Preliminary calculations of the influence of hardness on the strength of the joint are carried out. The analysis of the influence of the mechanical properties of banding wheel materials on the strength of the joint can be used in the improvement of new materials in the manufacture of bandage wheels and in the development of technology for the formation of wheel sets of locomotives, which in turn will improve the efficiency of wheel sets of locomotives.

Keywords: wheel center, bandage, strength, contact pressure, actual area, hardness.

Согласно утвержденной стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года предполагается существенное увеличение наработки на отказ тягового подвижного состава (ТПС) в 1,3 – 1,4 раза и установление ресурса бандажей колесных пар локомотивов не менее 1 млн км. Использование в современных локомотивах бандажных колес по-прежнему остается актуальным направлением, так как значительно повышается ремонтпригодность локомотивов и снижаются затраты на ремонт колесных пар. В связи с этим продолжаются разработка и внедрение новых материалов для изготовления бандажей и цельнокатаных колес. Тенденция к повышению срока службы локомотивных бандажей также требует создание новых и совершенствование существующих способов соединения бандажа с колесным центром. В настоящее время в эксплуатации ТПС все чаще фиксируются случаи проворота бандажа на колесном центре. Формирование колесной пары тепловым способом в соответствии с техническими требованиями и стандартами обеспечивает требуемый запас прочности для передачи крутящего момента, однако из-за воздействия конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов возникает ослабление посадки бандажей на колесном центре.

Эксплуатационные проблемы колесных пар, связанные с разупрочнением посадки бандажей на колесном центре, уже давно были в поле зрения исследователей. Сгруппировав и дополнив факторы, которые влияют на прочность соединения «колесный центр – бандаж», авторы составили схему, приведенную на рисунке 1.

Статистические данные ремонтных предприятий и научные публикации отечественных и зарубежных ученых подтверждают, что вероятность ослабления посадки бандажа на колесном центре существенно возрастает при совместном действии конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов. В частности, превышение допустимого значения погрешности формы (например, овальности) при обточке внутренней поверхности бандажа не всегда влечет за собой разупрочнение соединения, однако в эксплуатации при длительном фрикционном торможении возникает механическое и тепловое воздействие, что может привести к провороту бандажа на колесном центре.

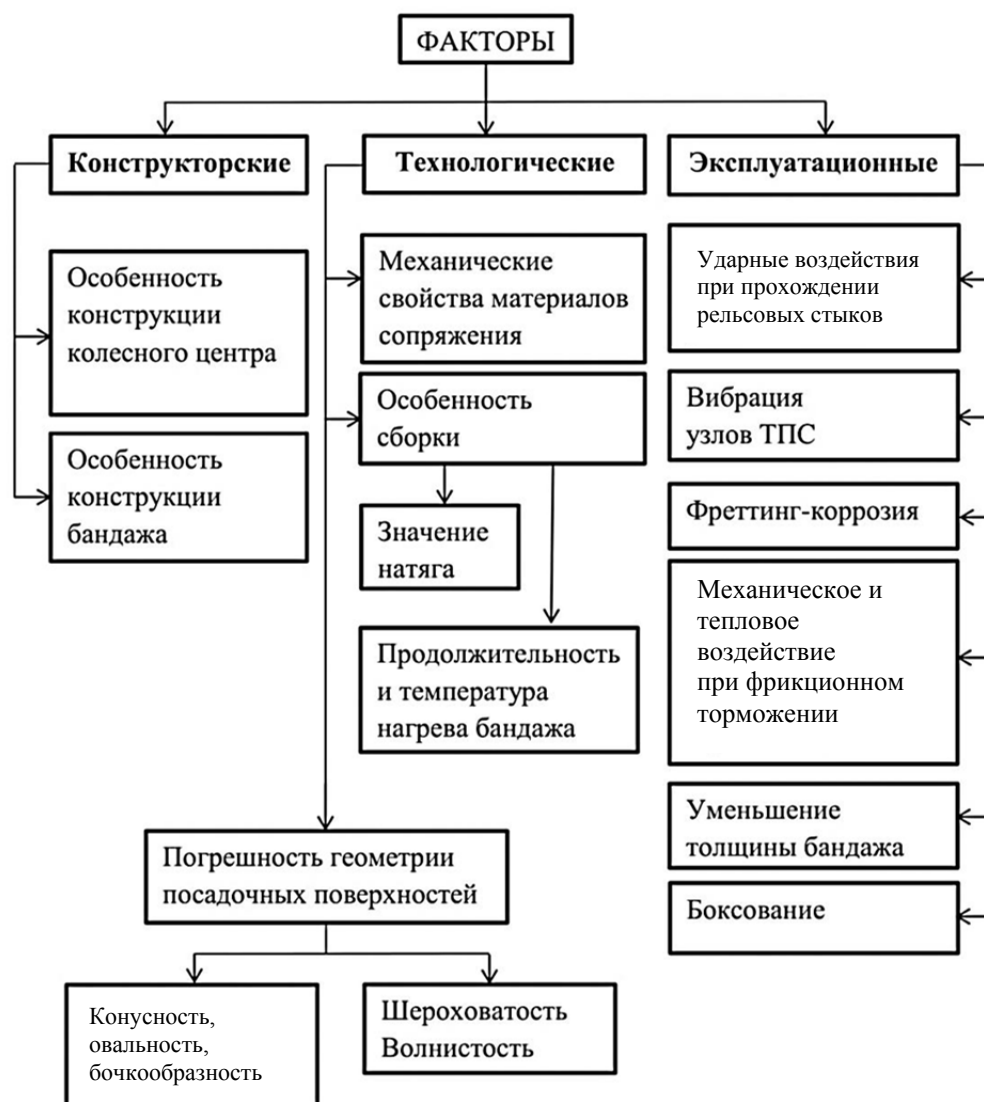


Рисунок 1 – Факторы, влияющие на прочность посадки бандажа на колесном центре

По сведениям ЛокоТех-Сервиса, за 2017 г. на электровозах 3ЭС5К было зафиксировано четыре случая проворота бандажей, на тепловозах серии ТЭ – 42 случая проворота, на тепловозах ТЭМ – 18 случаев проворота бандажей. На предприятиях промышленного железнодорожного транспорта (Магнитогорский «ГОК», Качканарский «ГОК», Ураласбест, Первоуральское рудоуправление) за 2017 г. зафиксировано 20 случаев ослабления посадки бандажа на колесном центре.

Поэтому для повышения работоспособности колесных пар локомотивов в условиях непрерывного роста эксплуатационных нагрузок необходимо проводить исследования по повышению несущей способности соединения «колесный центр – бандаж». Инженерами и учеными предлагаются новые конструктивные методы повышения прочности соединения путем установки дополнительных промежуточных элементов, изменения профиля посадочных поверхностей, формы сопряжения и модификации поверхностей [1].

Разрабатываются и внедряются современные средства контроля шероховатости посадочных поверхностей бандажа и колесного центра, а также методы контроля натяга [2, 3]. Исследуются режимы работы индукционно-нагревательных устройств, используемых при формировании колесных пар [4]. Однако проведенных исследований пока недостаточно для существенного сокращения количества проворотов бандажей в эксплуатации. Таким образом, проблема по повышению работоспособности бандажных колес локомотивов остается актуальной.

Критериями работоспособности соединения «колесный центр – бандаж» являются прочность соединения, заключающаяся в неподвижности соединяемых деталей посредством тепловой посадки с натягом, и прочность деталей, образующих сопряжение. Неплотное прилегание бандажа к колесному центру и превышение допустимого натяга могут привести к разрыву бандажа в эксплуатации. С целью предотвращения потери работоспособности соединения производятся соответствующие расчеты на прочность.

Условие прочности для соединений с натягом при нагружении вращающим моментом зависит от контактного давления на поверхности посадки, площади сопряжения и коэффициента трения:

$$KM_{кр} \leq \pi d^2 l q f_{кр} / 2, \quad (1)$$

где K – коэффициент запаса ($K = 1,5 - 2$);

d – посадочный диаметр соединения, мм;

l – длина посадочной поверхности, мм;

q – контактное давление на поверхности посадки, МПа;

$f_{кр}$ – коэффициент трения при кручении.

Контактное давление между соединяемыми элементами, изготовленными из разных материалов, ориентировочно определяют по зависимости Ляме:

$$q = \frac{\delta}{d(C_1/E_1 + C_2/E_2)}; \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{1 + (d_1/d)^2}{1 - (d_1/d)^2} - \mu_1; \quad C_2 = \frac{1 + (d/d_2)^2}{1 - (d/d_2)^2} + \mu_2, \quad (3)$$

где C_1, C_2 – коэффициенты Ляме;

d_1, d_2 – диаметры соединяемых деталей, мм;

E_1, E_2 – модули упругости материалов охватываемой и охватывающей деталей соответственно, МПа;

δ – натяг, мм;

μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей.

В конструкции составного колеса бандаж изготавливается из стали высокой прочности и твердости, а колесный центр – из более вязкого материала, имеющего твердость 120 – 160 HB. За счет сопряжения более мягкого с более твердым материалом возникает упруго-пластическая деформация, влекущая за собой возникновение контактного давления и сил трения, которые обеспечивают прочность соединения.

Контактное давление в соединениях с натягом в первую очередь зависит от значения натяга и модуля упругости соединяемых деталей. Натяг представляет собой разницу диаметров посадочных поверхностей соединения. Для бандажных колес ТПС натяг составляет 1,2 – 1,6 мм на каждые 1000 мм диаметра обода колесного центра. Для обеспечения сборки бандаж нагревают до температуры 250 – 300 °С в газовом или электрическом горне и далее насаживают на колесный центр [5].

В эксплуатации при тепловых нагрузках, возникающих при торможении, значение натяга и модуля упругости может измениться. С повышением температуры до 500 °С модуль упругости при растяжении и сдвиге углеродистых сталей падает примерно на 30 %, а коэффициент Пуассона незначительно увеличивается и становится близким к 0,5 [6]. Исследователи отмечают, что при длительном торможении температура на поверхности бандажа повышается до 550 °С, а в месте сопряжения с колесным центром может достигать 130 – 200 °С.

Расчет контактного давления с учетом изменения упругих свойств и расширения бандажа при нагреве можно провести, воспользовавшись методикой [7], согласно которой бандаж делится на простые составные части, в пределах которых элементы сопряжения могут быть представлены в виде кольца или цилиндра. Такой прием позволяет использовать для определения контактного давления формулу Ляме.

На рисунке 2 представлена схема для расчета контактного давления на примере бандажного колеса тепловоза.

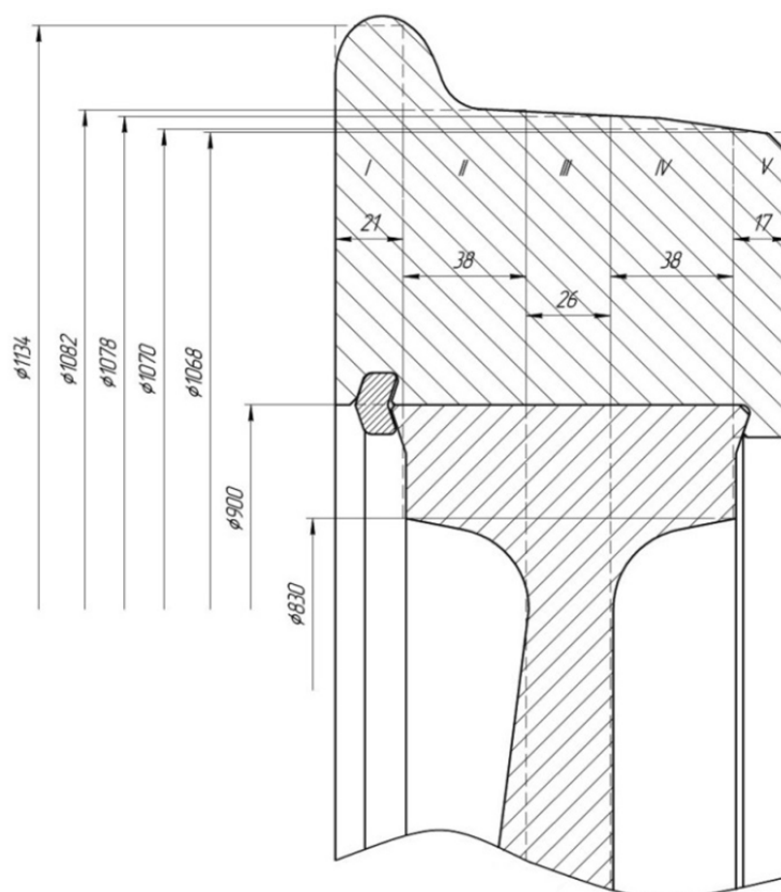


Рисунок 2 – Схема для расчета контактного давления в соединении «колесный центр – бандаж»

Данные расчета контактного давления приведены в таблице 1. В расчете приняты следующие допущения: не учитываются зоны влияния со стороны консолей частей I и V на контактное давление в частях II – IV; нагрев бандажа происходит равномерно по всему материа-

лу и не приводит к тепловому расширению материала колесного центра; сопрягаемые поверхности гладкие и имеют идеальную форму; в расчете контактного давления по зависимостям Ляме диаметр сопряжения деталей d и коэффициент Пуассона ($\mu_1, \mu_2 = 0,28$) с повышением температуры не изменяются.

Натяг, создаваемый при насадке бандажа на колесный центр и используемый при расчете контактного давления q , вычисляют по формулам (ГОСТ 33783-2016):

$$\delta_p = \delta_m - \delta_{cm} - \delta_{yc}; \quad (4)$$

$$\delta_{cm} = 1,2(R_{z1} + R_{z2}); \quad (5)$$

$$\delta_{yc} \leq 0,2\delta_m, \quad (6)$$

где δ_m – монтажный (технологический) натяг посадки бандажа на колесный центр по ГОСТ 11018-2011, мм;

δ_{cm} – значения смятия микронеровностей поверхностей сопряжений, мм;

δ_{yc} – «усадка» колесного центра вследствие пластических деформаций по ГОСТ 11018-2011, мм.

Расчетный натяг δ_p уменьшается пропорционально тепловому расширению бандажа:

$$\delta_p = \delta - \Delta\delta; \quad (7)$$

$$\Delta\delta = \alpha d \Delta t, \quad (8)$$

где $\Delta\delta$ – изменение размера бандажа, мм;

α – коэффициент температурного расширения ($\alpha = 11,5 \dots 13,5 \text{ мкм} \cdot \text{K}^{-1}$);

Δt – изменение температуры в соединении, °C.

Таблица 1 – Данные расчета контактного давления в соединении «колесный центр – бандаж»

Параметры		Температура бандажа t , °C				
		20	60	100	140	180
δ_p , мм		1,45	1,03	0,59	0,14	0
$E_1 \times 10^5$, МПа		2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
$E_2 \times 10^5$, МПа		2,10	2,06	2,05	2,01	1,97
Толщина бандажа $b = 90$ мм						
II	d_1 , мм	830	830	830	830	830
	d , мм	900	900	900	900	900
	d_2 , мм	1082	1082,5	1083,0	1083,6	1084,1
III	d_1 , мм	234	234	234	234	234
	d_{mm}	900	900	900	900	900
	d_2 , мм	1078	1078,5	1079,0	1079,6	1080,1
IV	d_1 , мм	830	830	830	830	830
	d_{mm}	900	900	900	900	900
	d_2 , мм	1070	1070,5	1071,0	1071,6	1072,1
q , МПа		29,22	20,53	11,74	2,76	0
Толщина бандажа $b = 45$ мм						
II	d_1 , мм	830	830	830	830	830
	d , мм	900	900	900	900	900
	d_2 , мм	1037	1037,5	1038,0	1038,6	1039,1
III	d_1 , мм	234	234	234	234	234
	d_{mm}	900	900	900	900	900
	d_2 , мм	1033	1033,5	1034,0	1034,6	1035,1
IV	d_1 , мм	830	830	830	830	830
	d_{mm}	900	900	900	900	900
	d_2 , мм	1025	1025,5	1026,0	1026,6	1027,1
q , МПа		24,75	17,39	9,95	2,34	0

По полученным расчетам построена зависимость контактного давления в соединении «колесный центр – бандаж» при тепловых нагрузках для нового и изношенного бандажей тепловоза, приведенная на рисунке 3.

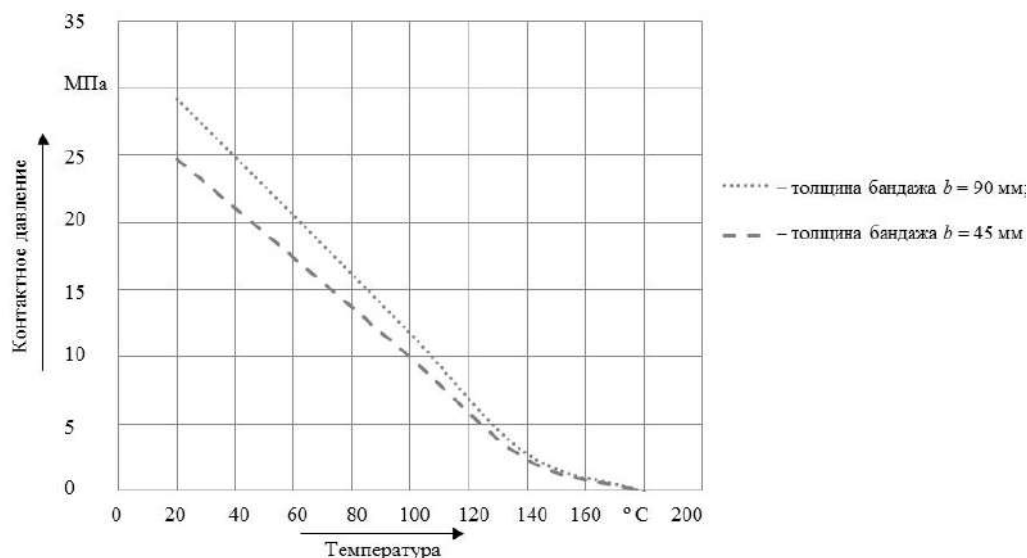


Рисунок 3 – График зависимости контактного давления в соединении «колесный центр – бандаж» от температуры нагрева бандажа

Согласно расчетам нагрев бандажа приводит к уменьшению контактного давления, что влечет за собой уменьшение крутящего момента, при котором может произойти проворот. При наличии погрешностей геометрии посадочных поверхностей проворот бандажа может произойти раньше достижения температуры разупрочнения соединения. Кроме того, применение новых материалов для изготовления бандажных колес также может оказать существенное влияние на прочность соединения.

Новые материалы имеют более высокие прочностные характеристики, обладают высоким пределом выносливости и повышенной трещиностойкостью [8, 9]. В таблице 2 приведены механические свойства сталей, применяемых для изготовления бандажей (марки 2 и 4, ГОСТ 398-2010), а также новых опытных марок, проходящих лабораторные и эксплуатационные испытания (марки Б, Н, П) и сталей для колесных центров (литейные – 20Л, 25Л, 20ГЛ по ГОСТ Р 4491-2016; цельнокатаные – марок С и М по ГОСТ Р 55498-2013).

Таблица 2 – Механические свойства материалов для изготовления бандажных колес

Марка стали	Временное сопротивление разрыву σ_B , Н/мм ²	Ударная вязкость KCU при +20 °С, Дж/см ²	Относительное сужение ψ , %	Относительное удлинение δ , %	Твердость на глубине 20 мм HV , кгс/мм ²
2	930 – 1110	25	14	10	Не менее 269
4	Не менее 1050	20	12	9	320 – 360
Б	1135	36	33	13,5	341
П	1196	28	32	13,5	360
Н (требование)	1060	40	20	11	335
Н (фактическое)	1150 – 1200	48 – 62	45 – 52	17 – 19	360 – 380
20Л	440	49	32	22	–
25Л	470	49	30	20	–
20ГЛ	490	49	30	20	–
С	720	35	25	15	–
М	490	50	30	20	–

Как видно из данных таблицы 2, новые марки бандажей имеют повышенную прочность, что позволяет увеличить монтажное значение натяга δ_m без опасности их разрушения, кроме того, уменьшается «усадка» колесного центра вследствие пластических деформаций δ_{yc} . Более высокая твердость поверхности катания обеспечивает высокую износостойкость бандажа. Однако в настоящее время не рассмотрено влияние твердости материалов в сопряжении «колесный центр – бандаж».

Возможно, что повышение твердости колесного центра будет способствовать повышению несущей способности соединения. Известно, что при обработке твердых поверхностей уменьшается шероховатость поверхностей, так как металл меньше пластически деформируется при точении, вследствие этого имеет место увеличение натяга за счет уменьшения значения смятия микронеровностей поверхностей сопряжений δ_{cm} . Кроме того, повышение твердости снижает износ, связанный с влиянием фреттинг-коррозии.

Расчет вращающего момента в соединениях с натягом производится с учетом площади контакта между соприкасающимися поверхностями и коэффициента трения. Между тем коэффициент трения и фактическая площадь контактирующих поверхностей зависят от параметров шероховатости поверхностей, твердости материалов соединяемых деталей и контактного давления.

Авторы работы [10] М. С. Дрозд, М. М. Матлин и Ю. И. Сидякин исследовали характер изменения основных параметров упругопластического контакта шероховатых поверхностей и прочности цилиндрических соединений, собранных с натягом тепловым способом, а также уточнили расчет коэффициентов трения. В таблице 3 приведены характеризующие параметры, изменяющиеся при возрастании определяющих факторов ($\uparrow$ – увеличение; $\downarrow$ – уменьшение; * – наличие максимума) [10].

Таблица 3 – Качественные результаты анализа факторов в соединениях, собранных тепловым способом

Характеризуемые параметры	Определяющие факторы											
	δ	q	d	НД	E	d_1/d	d/d_2	R	R_{max}	b_k	v	$\sqrt{\quad}$
η_r	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
q	$\uparrow$	-	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
$P_{ос}, M_{кр}$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	*	$\uparrow$

Коэффициент трения в окружном направлении предложено определять по уточненному выражению с учетом фактической площади контакта и пластической твердости материала:

$$f_{кр} = v_k \eta_r^{1/v} \left(\frac{НД}{q} \right)^{w_k}; \quad (9)$$

$$\eta_r = \frac{A_r}{A_a}, \quad (10)$$

где v_k, w_k – коэффициенты удельной прочности, учитывающие взаимное расположение следов обработки сопрягаемых поверхностей и направление их относительного сдвига ($v_k = 0,178$; $w_k = 0,054$);

η_r – относительная фактическая площадь контакта в цилиндрическом соединении;

v – параметры кривой опорной поверхности;

НД – пластическая твердость менее твердого из материалов сопрягаемых деталей, МПа;

A_r – фактическая площадь контакта, мм²;

A_a – номинальная площадь контакта, мм².

Для расчета коэффициента трения в зависимости от твердости колесного центра выбраны следующие параметры: среднее контактное давление $q = 29,22$ МПа; длина сопряжения $L = 112$ мм; диаметр соединения $d = 900$ мм; пластическая твердость НД = $0,468 \text{ HB}^{1,124}$ по

данным работы [11]. Параметры опорной кривой $\nu = 2$ и данные фактической площади контакта $A_r = 2$ % от номинальной A_a приняты из работы [12]. В таблице 4 приведены данные расчета коэффициентов трения в соединении «колесный центр – бандаж» в зависимости от твердости колесного центра.

Таблица 4 – Данные расчета коэффициента трения в соединении

Параметры	Твердость колесного центра HB , кгс/мм ²				
	120	140	160	180	200
НД, МПа	1322	1573	1829	2087	2350
$f_{кр}$	0,21	0,23	0,25	0,27	0,31

Согласно расчетам полученное большое значение коэффициента наблюдается только в пятнах фактического касания сопряженных поверхностей. При расчетах, как правило, коэффициент трения $f_{кр}$ принимается равным 0,14. Увеличение твердости менее твердого материала способствует увеличению коэффициента трения, а следовательно, и повышению прочности соединения. Это предположение требует более детального изучения, так как в расчете не учитывалось изменение фактической площади контакта в зависимости от увеличения твердости колесного центра, а известно, что с повышением твердости материалов уменьшается контурная и фактическая площадь контакта.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости обоснования расчетного значения натяга с учетом оценки влияния физико-механических свойств материалов на несущую способность в соединении «колесный центр – бандаж».

Проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по оценке влияния механических свойств, в частности твердости сопряженных материалов, позволит детально оценить прочность посадки бандажа на колесном центре. Кроме того, переход на катаные колесные центры открывает возможность изменения свойств посадочной поверхности.

Список литературы

1. Бородин, А. В. Повышение несущей способности соединения «колесный центр – бандаж» [Текст] / А. В. Бородин, Л. В. Ярышева // Локомотив. – 2015. – № 6. – С. 39 – 41.
2. Контроль натяга бандажей колес методом акустоупругости [Текст] / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак и др. // Локомотив. – 2014. – № 5. – С. 39 – 41.
3. Контроль шероховатости внутренней поверхностей бандажей колесных пар электровазов [Текст] / А. П. Буйносов, К. А. Стаценко и др. // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 143 – 148.
4. Андреев, Г. А. Причины ослабления соединений элементов колеса тепловоза [Текст] / Г. А. Андреев, В. А. Щенкин // Вестник машиностроения. – 2014. – № 1, С. 37, 38.
5. Инструкция по формированию, ремонту и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм: ЦТ/329. Утверждена указанием МПС России от 23 августа 2000 г. № К-2273у / Министерство путей сообщения России. – М., 2000. – 78 с.
6. Работнов, Ю. Н. Сопротивление материалов: Учебник [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
7. Бородин, А. В. Высоконагруженные соединения с гарантированным натягом для локомотивов: Монография [Текст] / А. В. Бородин, В. М. Волков, И. Л. Рязанцева. – Омск: Русь, 2011. – 165 с.

8. Катанные колесные центры для магистральных тепловозов 2ТЭ10, 2ТЭ116 [Текст] / Г. И. Брюнчуков, А. В. Сухов и др. // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ – 2015. – № 2. – С. 45 – 52.
9. Лабораторные и стендовые испытания бандажей повышенной прочности и трещиностойкости [Текст] / Г. И. Брюнчуков, А. С. Разумов и др. // Вестник ВНИИЖТа / ВНИИЖТ. – М. – 2015. – № 5. – С. 44 – 50.
10. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации: Учебник [Текст] / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
11. Анализ влияния различных факторов на фактическую площадь контакта деталей соединений с натягом [Текст] / М. М. Матлин, Г. П. Барабанов и др. // Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении: Материалы межвуз. сб. науч. ст. / Волгоградский гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2009. – С. 88 – 91.
12. Ярышева, Л. В. О фактической площади контакта в соединении «колесный центр – бандаж колеса тепловоза» [Текст] / Л. В. Ярышева // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 186 – 193.

References

1. Borodin A. V., Iarysheva L. V. Increasing the carrier compound to the center of the wheel bandage [Povyshenie nesushchei sposobnosti soedineniia kolesnyi tsentr-bandazh]. *Lokomotiv – The Locomotive*, 2015, no. 6, pp. 39 – 41.
2. Murav'ev V. V., Strizhak V. A., Volkova L. V., Priakhin A. V. Control interference of bandage wheels by acoustoelasticity method [Kontrol' natiaga bandazhei koles metodom akustouprugosti]. *Lokomotiv – The Locomotive*, 2014, no. 5, pp. 39 – 41.
3. Buinosov A. P., Statsenko K. A., Zhizhakin K. S., Pakhomov A. P. Checking the roughness of the inner surfaces of the bandages of the wheel sets of electric locomotives [Kontrol' sherokhovatosti vnutrennei poverkhnosti bandazhei kolesnykh par elektrovozov]. *Materialy tret'ei Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava»* (Materials of the third All-Russian Scientific and Technical Conference «Technological maintenance of repair and increase of dynamic qualities of a railway rolling stock»). Omsk, 2015, pp. 143 – 148.
4. Andreev G. A., Shchenkin V. A. The reasons for weakening the connections of the elements of the diesel locomotive wheel [Prichiny oslableniia soedinenii elementov kolesa teplovoza]. *Journal of mechanical engineering*. 2014, no. 1, pp. 37 – 38.
5. *Instruktsiia po formirovaniu, remontu i soderzhaniiu kolesnykh par tiagovogo podvizhnogo sostava zheleznikh dorog kolei 1520 mm* (Instructions for the formation and repair of wheel pairs locomotives railways of 1520 mm), Moscow, Ministry of Transport of the Russian Federation, 2000, 78 p.
6. Rabotnov, Iu. N. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials). Moscow: Fizmatgiz, 1962. 456 p.
7. Borodin A. V., Volkov V. M., Riazantseva I. L. *Vysokonagruzhennye soedineniia s garantirovannym natiagom dlia lokomotivov* (Highly loaded connections with guaranteed interference for locomotives). Monograph. Omsk: OSTU, 2011, 165 p.
8. Briunchukov G. I., Sukhov A. V., Kerentsev D. E., Razumov A. S. Mill-rolled wheel centers for main diesel locomotives 2TE10, 2TE116 [Katannye kolesnye tsentry dlia magistral'nykh teplovozov 2TE10, 2TE116]. *Research Institute of Railway Engineering. transp.* Moscow, 2015, no. 2, pp. 45 – 52.

9. Briunchukov G. I., Razumov A. S., Sukhov A. V. Laboratory and bench trials bandages increased strength and fracture toughness [Laboratornye i stendovye ispytaniia bandazhei povyshennoi prochnosti i treshchinostoikosti]. *Research Institute of Railway Engineering. transp.* Moscow, 2015, no. 5, pp. 44 – 50.

10. Drozd M. S. *Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoi kontaktnoi deformatsii* (Engineering calculations of elastoplastic contact deformation). Moscow: Mashinostroenie, 1986. 224 p.

11. Matlin M. M., Barabanov G. P., Kazankina E. N., Kazankin V. A. Analysis of the influence of various factors on the actual contact area of joint parts with interference [Analiz vliianiia razlichnykh faktorov na fakticheskuiu ploshchad' kontakta detalei soedinenii s natiagom]. *Materialy mezhvuzovskogo sbornika nauchnykh statei «Problemy materialovedeniia, svarki i prochnosti v mashinostroenii»* (Materials interuniversity collection of scientific articles «Problems of Materials Science, Welding and Strength in Mechanical Engineering»). Volgograd, 2009, pp. 88 – 91.

12. Iarysheva L. V. On the actual contact area in the connection «wheel center – wheel of a diesel locomotive wheel» [O fakticheskoi ploshchadi kontakta v soedinenii «kolesnyi tsentr – bandazh kolesa teplovoza»]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferencii posvyashchennoi Dnyu rossiyskoi nauki* (Materials of the scientific-practical conference devoted to the Day of Russian Science). Omsk, 2015, pp. 186 – 193.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рауба Александр Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: aleksandr_rauba@mail.ru

Дюндин Вадим Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: dyundinvv@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Рауба, А. А. Оценка влияния механических свойств материалов на несущую способность в соединении «колесный центр – бандаж» [Текст] / А. А. Рауба, В. В. Дюндин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 70 – 80.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rauba Alexander Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Technology of transport engineering and repair rolling stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: aleksandr_rauba@mail.ru

Dyundin Vadim Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Graduate student of the department «Technology of transport mechanical engineering and repair of a rolling stock », OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: dyundinvv@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Рауба А. А., Дюндин В. В. Evaluation of the influence of mechanical properties of materials on the strength in the «wheel center-bandage» compound. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 3, no 35, pp. 70 – 80 (In Russian).

В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. И. Стретенцев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

СПОСОБ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОММУТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. В статье рассматривается проблема диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла двигателей постоянного тока. Особо отмечена актуальность данной проблемы в двигателях, работающих на железнодорожном транспорте, находящихся в наиболее тяжелых условиях эксплуатации. Приведенные исследования направлены на повышение достоверности диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла за счет применения нового способа диагностирования состояния коммутации коллекторных двигателей постоянного тока. Предлагаемый способ диагностирования основан на новом принципе обработки диагностической информации об импульсах искрения под щетками. В статье представлены полученные в результате экспериментальных исследований гистограммы распределения интенсивности искрения различных секций обмотки якоря двигателя ПЗ1, применяемого для работы в электроприводах компрессоров электровозов и электропоездов. Авторами статьи проведен эксперимент с использованием специально разработанного ранее цифрового прибора контроля коммутации, позволяющего выделить и оцифровать полезный диагностический сигнал напряжения с разнополярных щеток с высокой частотой дискретизации и передать его на ЭВМ для последующей обработки. Анализ результатов проведенного эксперимента показал, что среднее значение площади импульсов увеличивается при повышении интенсивности искрения. Однако при сильном искрении на коллекторе (2 балла) закон распределения становится двухмодальным и, как следствие, резко возрастает среднеквадратическое отклонение значений площадей импульсов. Данный эффект вносит дезинформацию в процедуру диагностирования с применением параметров законов распределения интенсивности искрения. Предложенный способ диагностирования позволяет устранить данный эффект, что отражено на гистограммах, полученных в результате соответствующей обработки диагностического сигнала. На новый способ диагностирования состояния коммутации коллекторных электрических машин получен патент на изобретение Российской Федерации.

Ключевые слова: способ диагностирования, двигатель постоянного тока, коллекторно-щеточный узел, коммутация, закон распределения, интенсивность искрения.

Viktor V. Kharlamov, Denis I. Popov, Andrey I. Stretentsev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

METHOD OF DIAGNOSING THE CONDITION OF THE COMMUTATION OF COLLECTOR DC MOTORS

Abstract. The article deals with the problem of diagnosing the technical condition of the collector-brush unit of DC motors. The topicality of this problem in the engines operating on the railway transport, which are in the most severe operating conditions, is particularly noted. These studies are aimed at improving the reliability of diagnosing the technical condition of the collector-brush unit through the use of a new method of diagnosing the condition of collector DC motors' commutation. The proposed method of diagnosis is based on a new principle of processing diagnostic information about the spark pulses under the brushes. The article presents the histograms of the distribution of the pulses' intensity of different sections of the armature winding. The research conducted an experiment using a digital control device that allows to identify and digitize a useful diagnostic signal from multipolar brushes with a high sampling rate and transfer it to a computer. Analysis of the experiment's results showed that the average value of the pulse's area increases with increasing the spark's intensity. Nevertheless, severe sparking at the collector leads to the law of distribution becomes double-modal, and as a result, dramatically increases the standard deviation of the values of the pulses' areas. Described effect makes misinformation in the diagnosis procedure using the parameters of the laws of distribution of the spark's intensity. The proposed method of diagnosis allows to eliminate this effect. The copyright for a new method of diagnosing is protected by a patent.

Keywords: method of diagnosis, DC motor, collector-brush unit, commutation, distribution law, the intensity of the sparking.

Коллекторные двигатели постоянного тока (ДПТ) в настоящее время повсеместно эксплуатируются в промышленности, на транспорте, в бытовых приборах и других областях техники. С учетом сложных условий эксплуатации при относительно длительном сроке работы ряд узлов ДПТ подвержен ускоренному износу и требует периодического диагностирования и профилактического обслуживания. Наиболее тяжелые условия эксплуатации двигатели данного типа испытывают на железнодорожном транспорте. Наименее надежным узлом ДПТ является коллекторно-щеточный узел (КЩУ), неисправности которого приводят к большому количеству отказов [1].

Для выполнения объективной оценки степени искрения ДПТ разработан цифровой прибор контроля коммутации (МПКК) [2]. Данный прибор позволяет осуществлять оценку степени искрения по площади импульсов дуговых разрядов, характеризующей количество электричества, прошедшего через дугу, сохранять во внутренней памяти полученную информацию о зафиксированных импульсах и передавать данные на ЭВМ для обработки и анализа.

Параметры закона распределения интенсивности искрения секций обмотки якоря могут быть включены в двудольные графы соответствия дефектов и диагностических параметров коллекторно-щеточного узла ДПТ и применяться в процессе диагностирования технического состояния КЩУ [3 – 5]. Статистический анализ интенсивности искрения отдельных секций обмотки якоря может быть выполнен с применением следующих параметров закона распределения: среднего значения, а также среднеквадратического отклонения, асимметрии и эксцесса, являющихся моментами случайной величины первого, третьего и четвертого порядка соответственно [6, 7].

С целью проверки влияния на параметры закона распределения интенсивности искрения, обусловленной неидентичностью условий коммутации различных секций в пазу якоря, проведен эксперимент на двигателе постоянного тока ПЗ1, применяемом в электроприводах компрессоров электровозов и электропоездов. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

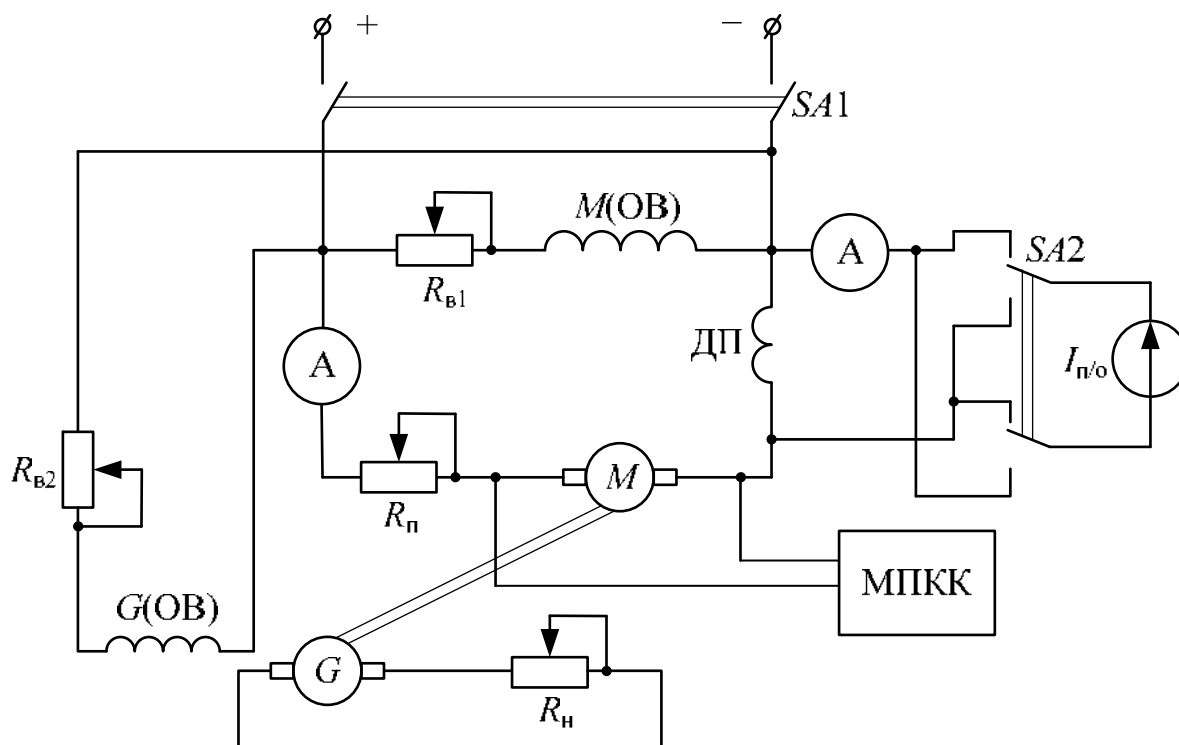


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из источника питания постоянного тока, подключенных к нему двух электрических машин типа ПЗ1 с независимым возбуждением, валы которых жестко соединены между собой, регулируемого источника тока ($I_{п/о}$) для осуществления подпитки/отпитки добавочных полюсов (ДП), цифрового прибора контроля коммутации МПКК, амперметров, нагрузочного и добавочных реостатов. В качестве источника питания экспериментальной установки использовался генератор постоянного тока.

Эксперимент проводился при отсутствии видимого искрения (степень искрения – 1 балл) и при наличии искрения от недокоммутации 1 ¼, 1 ½ и 2 балла [8]. В ходе эксперимента для получения необходимого уровня искрения производилось изменение тока $I_{п/о}$, после чего фиксировались массивы значений сигнала с разнополярных щеток с помощью МПКК. Длительность записи массива значений напряжения составляла 400 мс при частоте дискретизации 10 МГц. Частота вращения якоря и его ток составляли 3000 об/мин и 32 А соответственно.

Для исключения низкочастотных пульсаций (пазовых, коллекторных и др.), обусловленных различными физическими явлениями, проводилась амплитудная селекция сигнала с разнополярных щеток, полученного в результате эксперимента.

Выделенный сигнал напряжения был разделен на временные интервалы, соответствующие повороту якоря на одно коллекторное деление. В каждом таком интервале производился подсчет площади импульса напряжения дугового разряда, определяющей интенсивность искрения. На рисунке 2 представлен пример диаграммы импульса дугового разряда, где по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат – величина, пропорциональная оцифрованному значению напряжения.

Площадь импульса дугового разряда может быть вычислена по выражению:

$$S_{\text{и}} = T_{\text{д}} \sum_{i=0}^N x_i, \quad (1)$$

где $T_{\text{д}}$ – период дискретизации;

x_i – значение i -го отсчета выборки k -й ламели;

N – количество отсчетов, входящих в интервал времени прохода коллекторной пластины под щеткой.

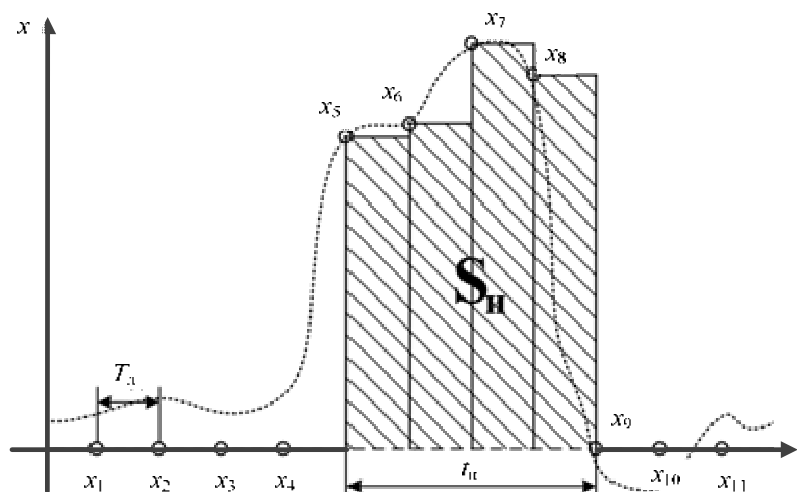


Рисунок 2 – Временная диаграмма импульса дугового разряда

Так как период дискретизации является величиной постоянной, то интенсивность искрения k -й ламели в относительных единицах.

$$A_k = \sum_{i=0}^N x_i. \quad (2)$$

В результате выполненного расчета для каждого измерения был получен массив значений площади импульсов дуговых разрядов и построены гистограммы распределения площади импульсов напряжения дуговых разрядов, представленные на рисунках 3 – 6.

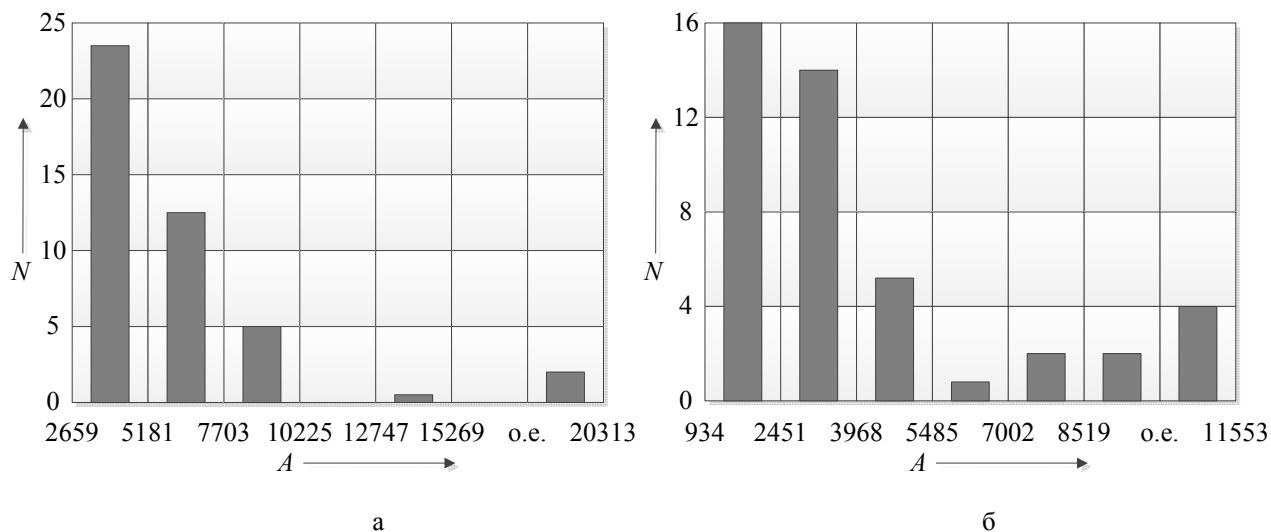


Рисунок 3 – Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов при степени искрения 1 балл: а – распределение импульсов недокоммутации; б – распределение импульсов перекоммутации

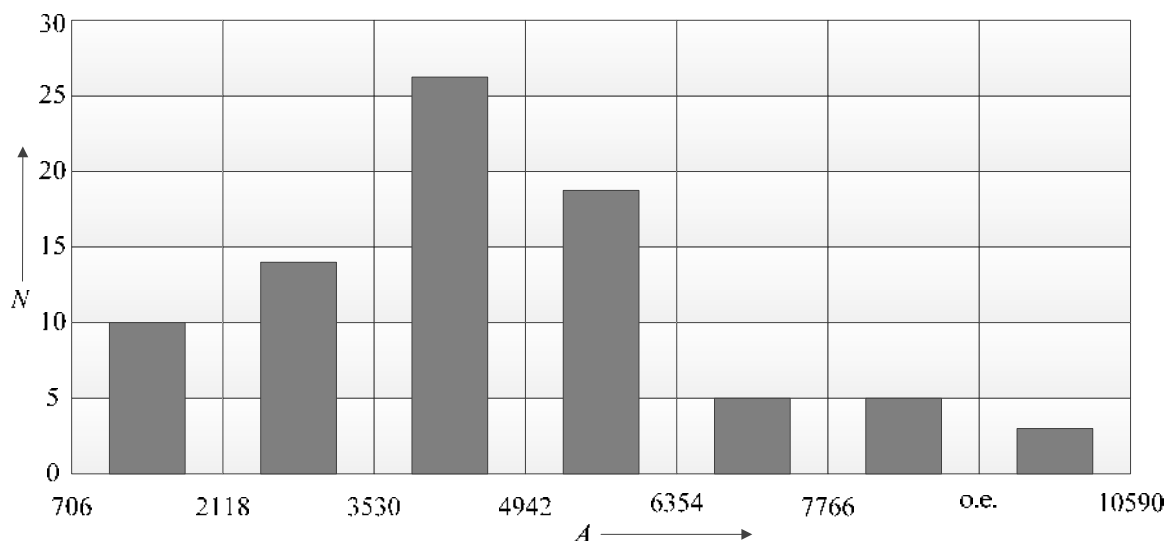


Рисунок 4 – Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов от недокоммутации при степени искрения 1 ¼ балла

Анализ приведенных гистограмм показывает, что среднее значение площади импульсов увеличивается при повышении интенсивности искрения. Однако при сильном искрении на коллекторе (2 балла) закон распределения становится двухмодальным и, как следствие, резко возрастает среднеквадратическое отклонение значений площадей импульсов.

Данное явление можно объяснить тем, что при малых интенсивностях искрения закон распределения дуговых разрядов обусловлен искрением только секций, коммутирующих последними в пазу. При увеличении тока подпитки/отпитки ($I_{п/о}$) начинают искрить остальные секции обмотки якоря, что обуславливает искрение с меньшей средней интенсивностью.

Для проверки данной гипотезы выполнена математическая обработка экспериментальных данных. Массивы значений площади импульсов дуговых разрядов были разделены на группы, число которых равно числу секций обмотки якоря, лежащих в пазу.

Если обозначить номера пазов $i = 1 \dots N$, то к первой группе должны быть отнесены все i -е значения площади, ко второй группе – все значения площади $(i + 1)$ и т. д.

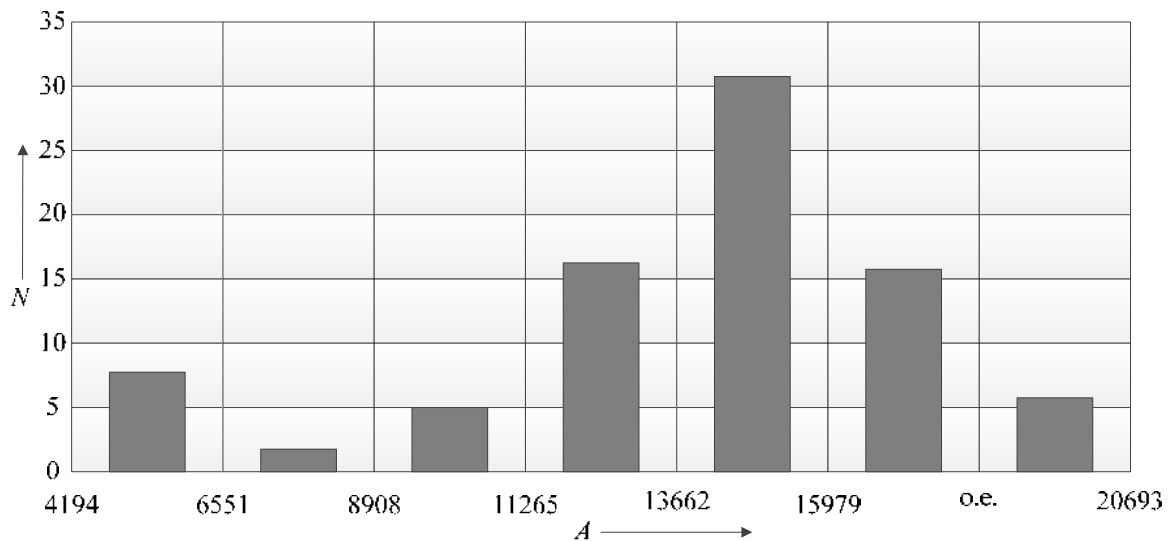


Рисунок 5 – Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов от недокоммутации при степени искрения 1 ½ балла

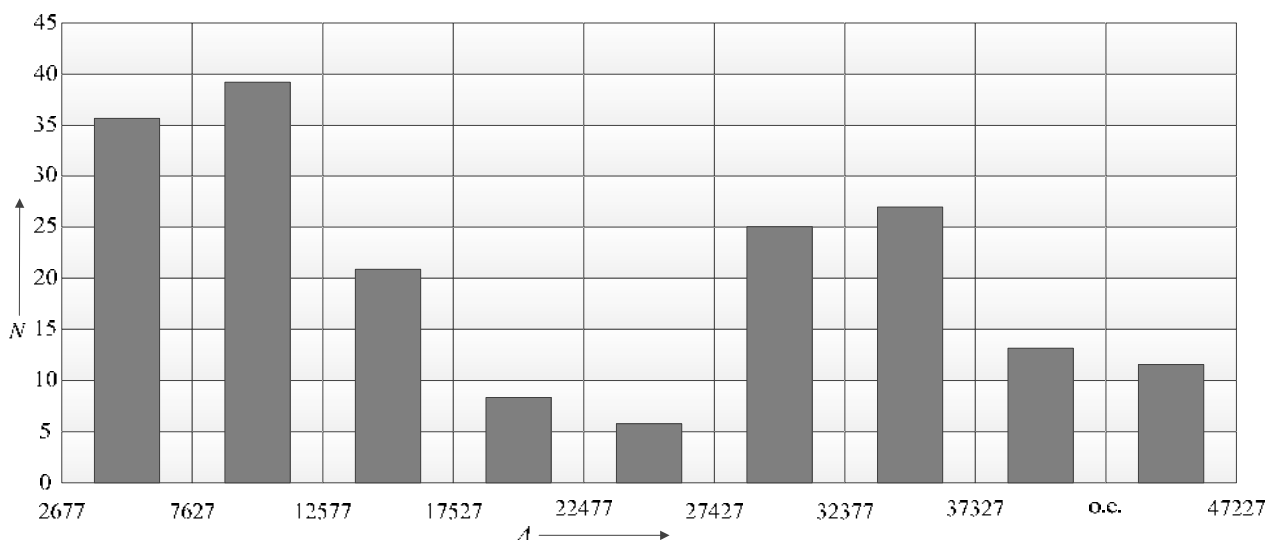


Рисунок 6 – Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов от недокоммутации при степени искрения 2 балла

Например, на рисунке 7 условно изображен фрагмент якоря машины постоянного тока с уложенными в пазах секциями обмотки (по четыре секции на паз). Цифрами от 1 до 4 обозначены проводники секций внутри каждого паза.

У машины ПЗ1 якорь имеет 18 пазов, в которых уложены 72 секции.

Таким образом, для каждого оборота массивы значений площади импульсов дуговых разрядов должны быть разделены на четыре группы. Тогда площади импульса напряжения дугового разряда с номерами 1, 5, 9, 13 и т. д. попадут в первую группу. Аналогично для остальных трех секций в пазу.

Данная процедура была произведена для массивов значений площади импульсов при степени искрения 2 балла, после чего были получены гистограммы распределения отдельно по каждой из четырех групп, которые представлены на рисунках 8 – 11.

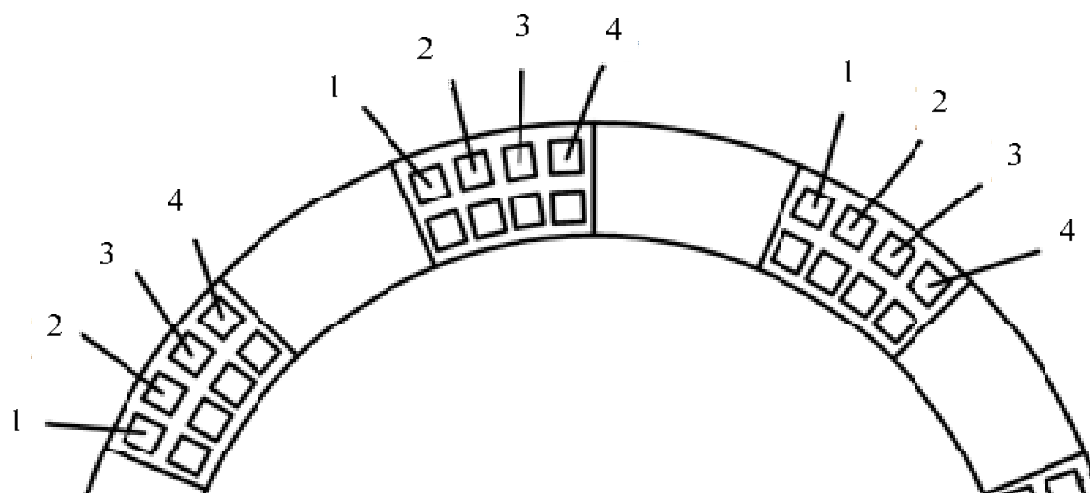


Рисунок 7 – Фрагмент якоря двигателя ПЗ1 с нумерацией секций в зависимости от их расположения в пазах

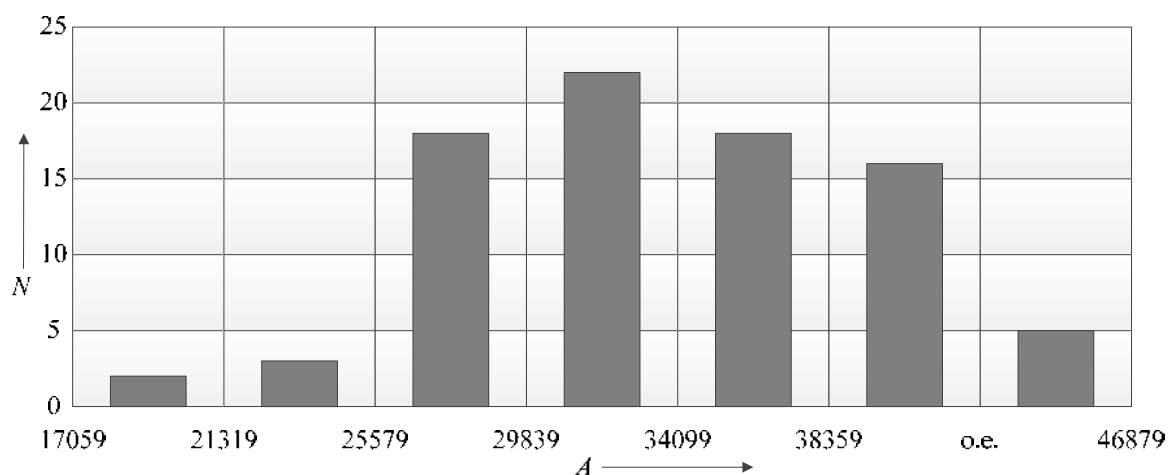


Рисунок 8 – Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов для первой группы секций при степени искрения 2 балла

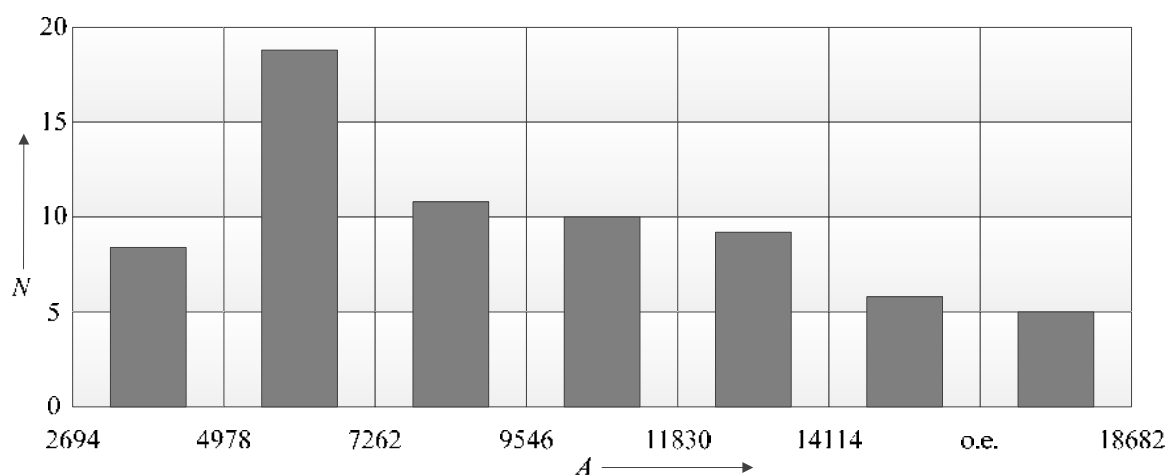


Рисунок 9 – Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов для второй группы секций при степени искрения 2 балла

Как известно, за счет влияния взаимоиндуктивной связи условия коммутации секций в пазу различны [9]. По сравнению с остальными секциями секция, коммутирующая последней в пазу, имеет более слабую связь со следующей за ней секцией, так как они находятся в разных пазах [10]. Этот факт подтверждается гистограммами, анализ которых показывает, что первая группа секций выделяется бóльшей интенсивностью искрения, чем остальные, следовательно, в данную группу включены секции, коммутирующие последними в пазу.

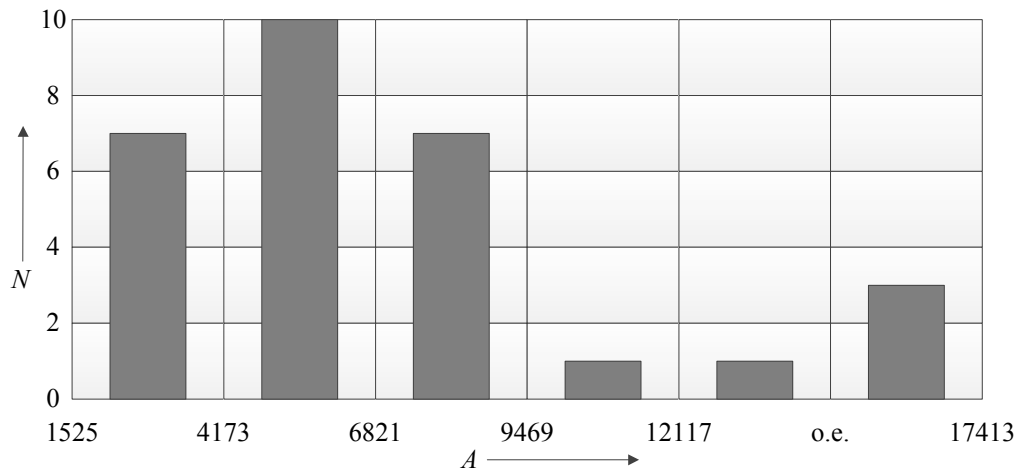


Рисунок 10 – Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов для третьей группы секций при степени искрения 2 балла

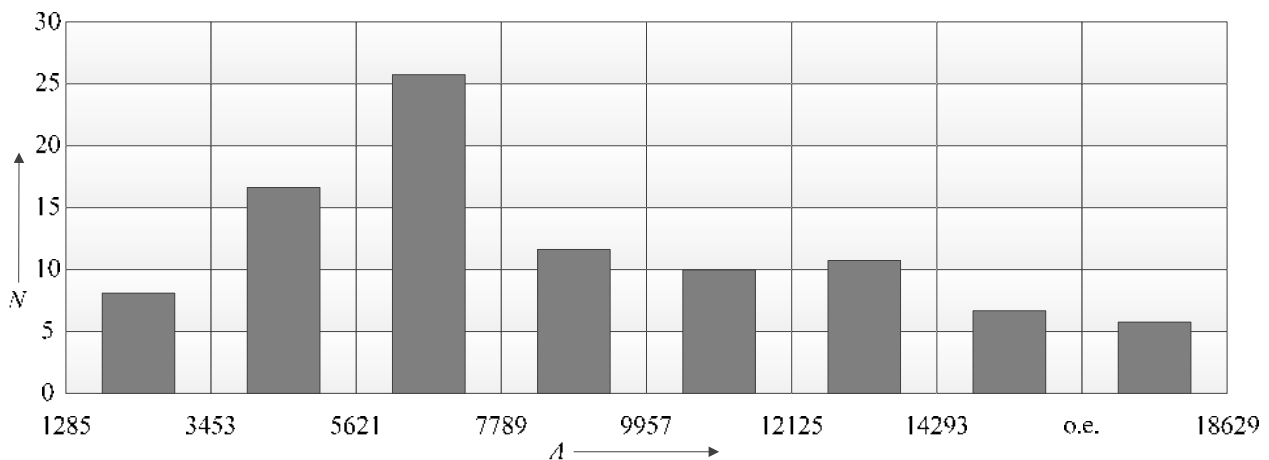


Рисунок 11 – Гистограмма распределения площадей импульсов дуговых разрядов для четвертой группы секций при степени искрения 2 балла

Следовательно, в целях получения диагностической информации при анализе сигнала с разнополярных щеток целесообразно рассматривать закон распределения по отдельным группам секций, как представлено на рисунках 8 – 11.

Таким образом, предлагаемый способ диагностирования состояния коммутации коллекторных электрических двигателей [11] реализуется в соответствии со следующей последовательностью действий. Сигнал импульсов напряжения, обусловленных искрением между электрическими щетками и коллектором, записывается и обрабатывается устройством МПКК. Диагностическая информация, получаемая в процессе измерений, представляет собой значения напряжений импульсов искрения и соответствующие им значения времени. Временной диапазон измерений диагностического сигнала разбивается на участки, равные периоду следования коллекторных пластин. Длина каждого такого участка равна периоду

коммутации секции обмотки якоря, и на каждом из данных участков может присутствовать или отсутствовать только один импульс напряжения искрения. Далее полученным участкам поочередно присваиваются номера от 1 до N , где N – число секций обмотки якоря, приходящихся на один паз. После каждого N -го участка нумерация начинается с первого номера. Таким путем полученные в процессе обработки сигнала параметры импульсов искрения разделяются на группы. Каждая группа параметров импульсов соответствует группе секций обмотки якоря, проводники которой расположены в пазах якоря идентично. Анализ значений параметров импульсов искрения ведется по каждой группе отдельно: определяются средняя интенсивность искрения и среднее квадратическое отклонение интенсивности искрения.

Описанный способ диагностирования, применяющий цифровую обработку полученного диагностического сигнала, позволяет учитывать влияние неидентичности коммутации различных секций обмотки якоря, обусловленной механическими и электромагнитными факторами раздельно по группам секций, каждая из которых имеет определенное местоположение в пазу. В секциях, объединенных в группы по описанному принципу, отсутствует электромагнитная неидентичность условий коммутации, обусловленная различными по величине коэффициентами взаимной индуктивности с другими секциями, вызванная различным местоположением в пазу. Это позволяет исключить влияние неидентичности данного рода на результаты анализа диагностической информации и повысить достоверность диагностирования технического состояния КЩУ.

Список литературы

1. Афонин, А. П. Совершенствование методики и устройства диагностирования коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока с учетом неидентичности коммутационных циклов [Текст]: Автореферат дис... канд. техн. наук: 05.09.01 / Афонин Александр Петрович. – Омск, 2018. – 22 с.
2. Харламов, В. В. Разработка цифрового прибора контроля коммутации тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. И. Стретенцев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 52 – 64.
3. Афонин, А. П. Микропроцессорное устройство для контроля технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей в условиях неидентичности коммутационных циклов [Текст] / А. П. Афонин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта. – Новосибирск. – 2012. – № 2. – С. 286 – 290.
4. Харламов, В. В. Экспериментальные исследования процесса коммутации в коллекторных тяговых двигателях подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. П. Афонин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4 (32). – С. 45 – 53.
5. Повышение достоверности диагностирования коллекторно-щеточного узла электрических машин с учетом неидентичности коммутационных циклов [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов и др. // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2016. – № 4 (148). – С. 65 – 69.
6. Харламов, В. В. Диагностирование состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока в условиях приемосдаточных испытаний с учетом параметров неидентичности коммутационных циклов [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. П. Афонин // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск. – 2017. – № 5 (155). – С. 66 – 71.
7. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В. Е. Гмурман. – М.: Юрайт, 2018. – 479 с.

8. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 26 с.
9. Авилов, В. Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: Монография [Текст] / В. Д. Авилов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – 356 с.
10. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы [Текст] / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб: Питер, 2008. – 320 с.
11. Пат. 2668996 Российская Федерация, МПК Н 01 R 39/58, Н 02 К 11/20, G 01 R 31/34. Способ диагностирования состояния коммутации коллекторных электрических машин [Текст] / Харламов В. В., Попов Д. И., Стретенцев А. И.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2017143285; заявл. 11.12.2017; опубл. 05.10.2018, Бюл. № 28.

References

1. Afonin A. P. *Sovershenstvovanie metodiki i ustroystva diagnostirovaniya kollektorno-shchetochного узла машин postoyannogo toka с учетом неидентичности коммутационных циклов* (Improvement of methods and devices for diagnosing collector-brush unit of DC machines taking into account non-identity of switching cycles). Abstract of dissertation, Omsk, 2018, 22 p.
2. Kharlamov V. V., Popov D. I., Stretentsev A. I. Development of railway traction motors commutation control digital device [Razrabotka tsifrovogo pribora kontrolya kommutatsii tyagovykh elektrodvigatelyey podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 2 (30), pp. 52 – 64.
3. Afonin A. P. Microprocessor device for control the technical condition of the collector-brush assembly traction motors in nonidentity conditions of operating cycles [Mikroprotsessornoe ustroystvo dlya kontrolya tehnikeskogo sostoyaniya kollektorno-shchetochного узла tyagovykh elektrodvigatelyey v usloviyakh neidentichnosti kommutatsionnykh tsiklov]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2012, no. 2, pp. 286 – 290.
4. Kharlamov V. V., Popov D. I., Afonin A. P. Experimental research of commutation process in traction dc motors of rolling stock [Eksperimental'nye issledovaniya protsessa kommutatsii v kollektornykh tyagovykh dvigatelyakh podvizhnogo sostava]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 4 (32), pp. 45 – 53.
5. Kharlamov V. V., Popov D. I., Afonin A. P., Ognevskiy A.S. The increase in reliability of diagnosing of collector-brush unit of electric machines under condition of identical switching cycles [Povyshenie dostovernosti diagnostirovaniya kollektorno-shchetochного узла ehlektricheskikh mashin s uchetom neidentichnosti kommutatsionnykh tsiklov]. *Omskiy nauchnyy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 4 (148), pp. 65 – 69.
6. Kharlamov V. V., Popov D. I., Afonin A. P. Diagnosis of condition of DC machine's collector-brush unit in terms of commissioning tests using parameters of nonidentity of commutation [Diagnostirovanie sostoyaniya kollektorno-shchetochного узла mashin postoyannogo toka v usloviyakh priemosdatochnykh ispytaniy s uchetom parametrov neidentichnosti kommutatsionnykh tsiklov]. *Omskiy nauchnyy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2017, no. 5 (155), pp. 66 – 71.
7. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* (Probability theory and mathematical statistics). Moscow: Urait, 2018, 479 p.
8. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Obshchie tehnikeskie usloviya, GOST 183-74.* (Electric rotating machines. General specifications). Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2001, 26 p.
9. Avilov V. D. *Optimizatsiya kommutatsionnogo protsessa v kollektornykh elektricheskikh mashinah postoyannogo toka* (Optimization of the switching process in the collector DC machines). Omsk, 2013, 356 p.

10. Voldek A. I. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* (Electric machine. Introduction to electrical engineering. DC machines and transformers). Saint-Petersburg: Peter, 2008, 320 p.

11. Kharlamov V. V., Popov D. I., Stretentsev A. I. *Patent RU 2668996*, 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: popovomsk@yandex.ru

Стретенцев Андрей Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: utes.gorniy@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Способ диагностирования состояния коммутации коллекторных электрических двигателей [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. И. Стретенцев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 81 – 90.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Victor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: popovomsk@yandex.ru

Stretentsev Andrey Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate of department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: utes.gorniy@yandex.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kharlamov, V. V., Method of diagnosing the condition of the commutation of collector DC motors [Text] / V. V. Kharlamov, D. I. Popov, A. I. Stretentsev Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 3, no 35, pp. 81 – 90 (In Russian).

УДК 004.032.26

А. Т. Бурков¹, Г. Р. Ермачков², А. В. Рыжков²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;

²Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. Предложен метод прогнозирования показателей системы токосъема при увеличении скоростей движения с помощью машинного обучения. Рассмотрены способы получения статистически достоверных данных о контактном нажатии токоприемников электроподвижного состава без необходимости прямого измерения на основе проектных данных и анализа внешних факторов (погодных, эксплуатационных), сопровождающих взаимодействие.

Ключевые слова: контактная сеть, токоприемник, износ, нейронная сеть, контактное нажатие, среднеквадратичная ошибка, прогнозирование.

Anatoly T. Burkov¹, Gleb R. Ermachkov², Alexander V. Ryzhkov²

¹Saint-Petersburg Railway Transport University (SPRTU), St. Petersburg, the Russian Federation;

²Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF PROGNOSTICATION THE INDICATORS OF THE CURRENT COLLECTION SYSTEM UNDER THE INCREASE OF MOTION SPEEDS

Annotation. A method for predicting the performance of the current collection with increasing speeds using machine learning is proposed. Methods for obtaining statistically reliable data on the contact pressure of current-carrying electric rolling stock without the need for direct measurement based on design data and analysis of external factors (weather, operational) accompanying the interaction are considered.

Keywords: catenary, current collector, wear, neural network, contact pressure, root-mean-square error, prediction.

В рамках Программы организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации до 2030 года в ОАО «РЖД» предусмотрена реализация более 50 скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) общей протяженностью более 7 000 км (рисунок 1) [1].

Системообразующими проектами программы ОАО «РЖД» являются ВСМ Москва – Казань – Екатеринбург, Москва – Адлер и Москва – Санкт-Петербург. Задача создания этих ВСМ – модернизация опорного каркаса сети железных дорог РФ и приведение его в соответствие с сегодняшним и будущим спросом на пассажирские и грузовые перевозки.

Перед принятием того или иного проекта принимается решение о его целесообразности из соотношения затрат и возможных эффектов от этих затрат. В соответствии с международным опытом стоимость 1 км ВСМ с максимальной скоростью 250 км/ч почти в 1,75 раза меньше стоимости строительства ВСМ со скоростями до 400 км/ч [1]. Отмечается, что кроме капитальных затрат расходы на эксплуатацию при повышении скоростей движения также возрастают. Одной из существенных статей расходов на содержание ВСМ является замена токосъемных элементов токоприемников электроподвижного состава (ЭПС) и контактных проводов, прогнозирование износа которых является актуальной задачей.

При движении ЭПС должна обеспечиваться высокая экономическая и техническая эффективность, экологичность и безопасность движения всех систем должны соответствовать

отраслевым стандартам. В системе токосъема основными показателями качества являются процент искрений, частота измерений контактного нажатия, среднее значение контактного нажатия, стандартное отклонение, статистическое максимальное и минимальное значения контактного нажатия и т. д. [2]. Наиболее информативным материалом для расчета показателей качества является мгновенное значение контактного нажатия токоприемника на контактный провод ($P_{кт}$). Чем стабильнее $P_{кт}$, тем меньше изнашиваются контактные провода и токосъемные пластины. Измерение $P_{кт}$ производится с помощью натуральных полигонных испытаний контактной сети [3, 4].

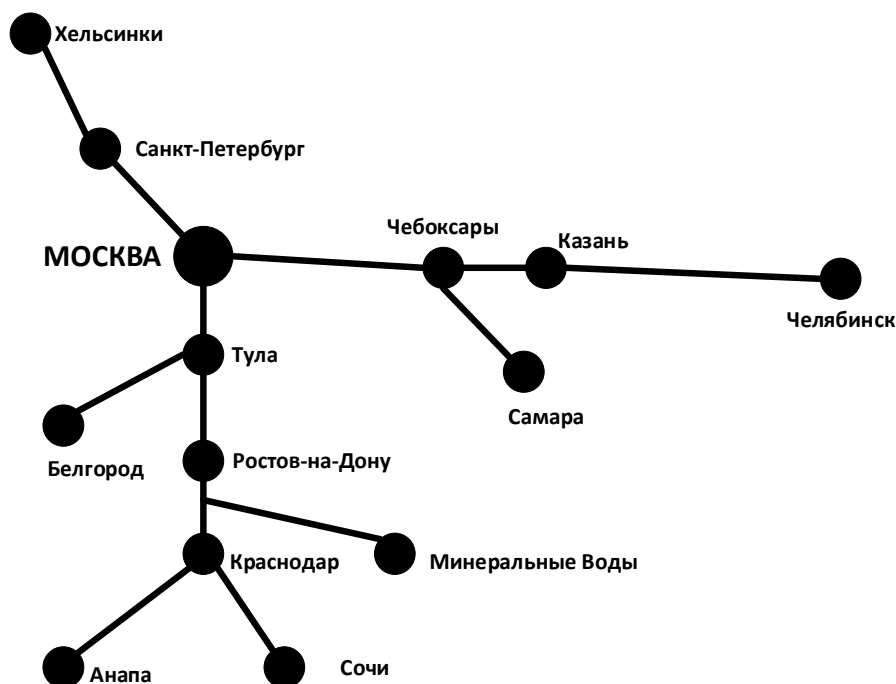


Рисунок 1 – Маршрутная сеть перспективных скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей ОАО «РЖД»

В передовых железнодорожных университетах ведутся исследования, направленные на повышение качества электрической энергии, передаваемой в скользящем контакте. Разрабатываются методики расчета оптимальных участковых скоростей и износа контактных вставок [3 – 9]. Для выбора наилучших сочетаний параметров взаимодействия контактной сети и токоприемника применяется математическое и натурное моделирование.

Известны следующие модели для оценки работы пары «токоприемник – подвеска контактной сети (ПКС)»: А. В. Ефимова (УрГУПС); А. С. Голубкова (ОмГУПС) [5]; Е. В. Кудряшова (ПГУПС) [6], Zhigang Liu (School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, China) [7].

Указанные математические модели характерны тем, что элементы в них представлены в виде материальных точек или стержней, а выполнение статических и динамических расчетов связано с решением соответствующих их числу дифференциальных уравнений. В связи с этим недостатками данных моделей является частичное или полное отсутствие учета особенностей движения подвижного состава (может быть представлено как сумма колебаний основания токоприемника на различных частотах). Принимается ряд допущений относительно конструкции токоприемников, не позволяющих достоверно моделировать взаимодействие.

Задачей исследования является разработка имитационной модели системы токосъема для прогнозирования показателей износа при увеличении скоростей движения ЭПС. Для данного исследования разрабатываемая модель должна имитировать $P_{\text{кт}}$ в ответ на изменение влияющих факторов. Экспериментальные данные должны иметь необходимый объем, наиболее полно описывающий изучаемые закономерности процесса токосъема.

Перед началом реализации имитационной модели определялись факторы (предикторные переменные), оказывающие влияние на $P_{\text{кт}}$. Установлено, что на исследуемый процесс влияют следующие факторы [8, 9]: эластичность контактного провода (η), высотное положение без нажатия (h_n), зигзаг контактного провода (z), скорость ЭПС (U).

Слабая корреляционная зависимость (полученная с помощью коэффициента корреляции Пирсона) между некоторыми предикторными переменными с искомой переменной указывает на наличие в них нелинейной связи, которую необходимо учитывать при составлении математической модели (таблица 1).

Таблица 1 – Корреляционная таблица предикторных переменных

Предикторная переменная	η	z	U	h_n	$P_{\text{кт}}$
η	1,00	0,033	– 0,374	– 0,093	– 0,392
z	0,033	1,00	– 0,018	– 0,023	– 0,035
U	– 0,374	– 0,018	1,00	– 0,043	0,957
h_n	– 0,093	– 0,023	– 0,043	1,00	– 0,012
$P_{\text{кт}}$	– 0,392	– 0,035	0,957	– 0,012	1,00

Предлагается использовать аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) в связи с наличием нескольких предикторных переменных и их нелинейной связью с искомым параметром [8]. Важной особенностью ИНС является возможность ее «обучения» на имеющемся наборе данных с целью его аппроксимации или экстраполяции. ИНС представляет собой архитектуру взаимосвязанных между собой элементов с наличием входных и выходных переменных. Реализация модели ИНС осуществляется в программном комплексе *Matlab* ввиду его обширных возможностей. Для прогнозирования временных рядов в *Matlab* представлены два типа моделей: нелинейная авторегрессионная нейронная сеть с внешними входами (*Nonlinear autoregressive neural network with external input – NARX*) и нелинейная авторегрессионная нейронная сеть (*Nonlinear autoregressive neural network – NAR*). *NARX* относится к классу рекуррентных нейронных сетей. Наличие обратных связей позволяет *NARX*-сети выдавать результат, основываясь не только на входных данных, но и с учетом предыстории состояний динамического объекта [10]. В дальнейшем в качестве базовой архитектуры применялась *NARX*-сеть.

Для оптимизации износа важнейшим фактором является определение среднего $P_{\text{кт}}$ на участках моделируемой скоростной магистрали. Предложено определять наилучшее среднее $P_{\text{кт}}$ с помощью имитационной модели, последовательно изменяя его в диапазоне допустимых значений и анализируя полученный результат по критерию уменьшения износа.

Настройка архитектуры ИНС осуществляется путем подбора параметров на основании известных исследований и рекомендаций [8 – 13] (рисунки 2). Параметры архитектуры *NARX* для данного исследования представлены в таблице 2.

Ввиду особенностей *NARX*-сети результат обучения может быть различным даже при одинаковом исходном наборе данных, поэтому *NARX*-сеть проходит обучение несколько раз, сравнивая полученные результаты по критерию наименьшего значения среднеквадратической ошибки (*Mean square error, MSE*). Для получения результата количество повторов (эпох) тренировки должно быть не менее 200, количество ошибок на контрольном массиве составляет 200. Сеть с минимальным значением *MSE* принимается наилучшей для моделирования и используется для дальнейшей работы.

Для обучения сети применялся открытый (разомкнутый) цикл *NARX* (рисунок 3, а). В нем используются истинные значения $P_{кт}$ для оценки результата моделирования. Экспериментально установлено, что обучающая выборка для подготовки ИНС к работе должна иметь не менее 20 000 отсчетов, полученных на участке длиной не менее 5 000 м. Обучающая выборка содержит в себе следующий набор мгновенных значений, привязанных к путевой координате и времени: эластичность контактного провода, высотное положение без нажатия, зигзаг контактного провода, скорость ЭПС, контактное нажатие.

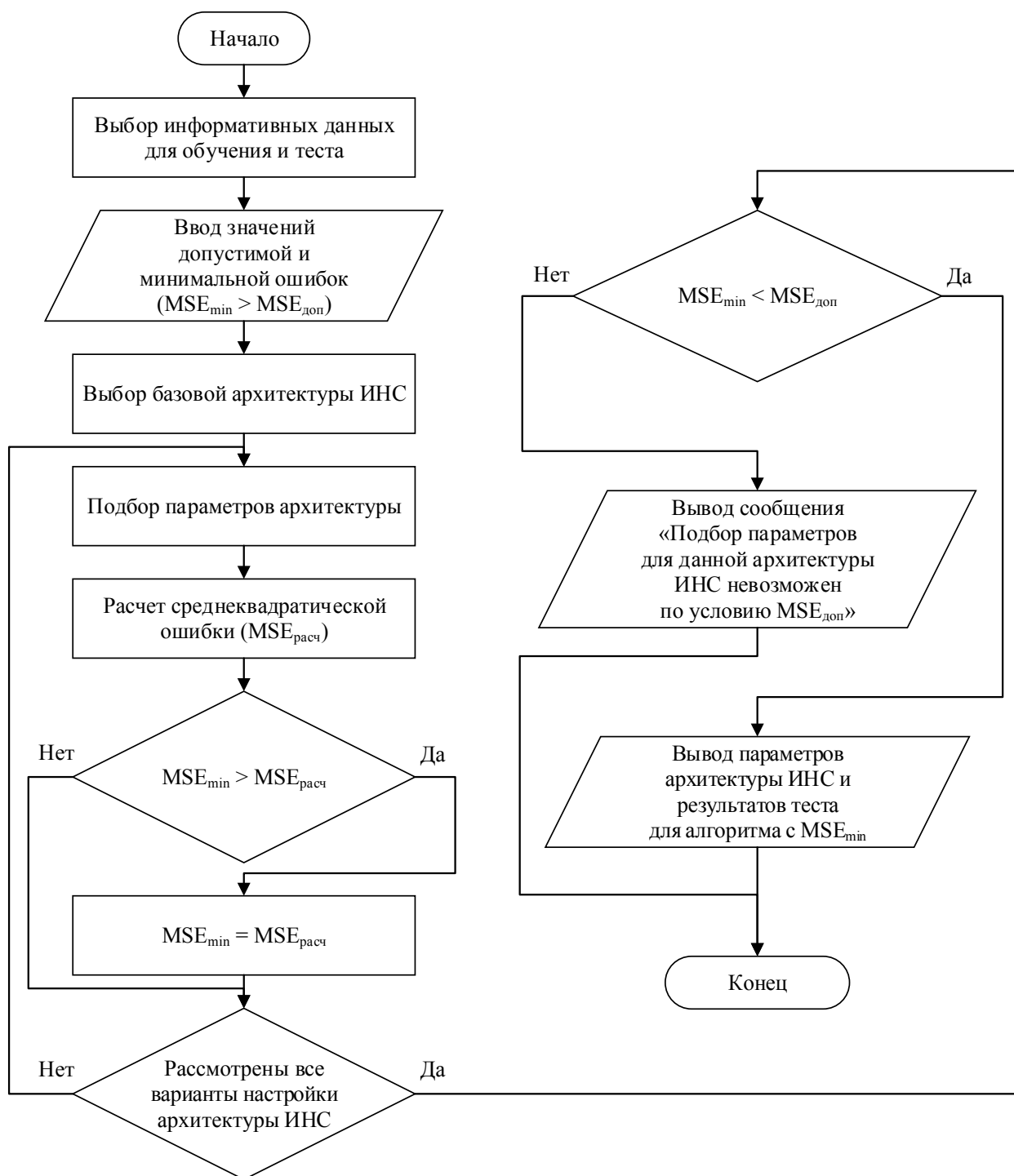


Рисунок 2 – Алгоритм выбора параметров ИНС для определения оптимального среднего контактного нажатия

Таблица 2 – Параметры архитектуры ИНС для поиска $P_{кт}$

Наименование параметра	Параметр
Число скрытых слоев	1
Количество нейронов в скрытом слое	9
Функция активации в первом (скрытом) слое	Сигмоидная функция в виде гиперболического тангенса (<i>TANSIG</i>)
Функция выполнения в выходном слое	Среднеквадратичная ошибка (<i>MSE</i>)
Алгоритм обучения сети	Функция на основе обратного распространения ошибки с использованием байесовской регуляризации (<i>trainbr</i>)
Задержка входных данных	0:19
Задержка обратной связи	1:3

Для получения практических результатов моделирования используется замкнутый цикл *NARX* (рисунок 3, б), в котором присутствует обратная связь (подача расчетного выходного значения обратно на вход). Наличие обратной связи хорошо подходит для многоступенчатого прогнозирования. Для преобразования сетей *NARX* из открытого цикла в замкнутый цикл применяется функция *closeloop*.

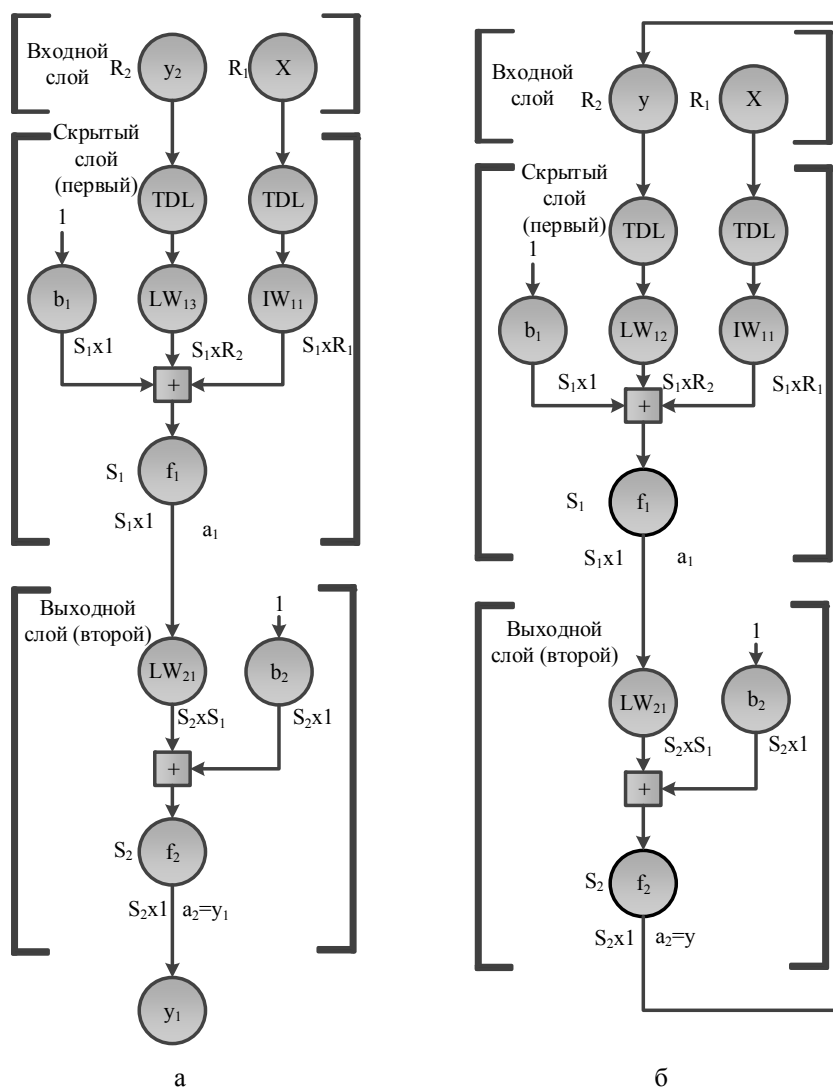


Рисунок 3 – Структурная схема двухслойной нейронной сети:
 а – разомкнутый цикл; б – замкнутый цикл; X – входной вектор; TDL – задержка;
 $Y_1 - P_{кт}$ (расчетное); $Y_2 - P_{кт}$ (экспериментальное)

Когда сеть имеет несколько слоев (многослойные нейронные сети), то каждый слой имеет свою матрицу весов W , вектор смещения b и вектор выхода a . Чтобы различать весовые матрицы, векторы выхода и т. д. для каждого из этих слоев, введем номер слоя как верхний индекс для представляющей интерес переменной.

Разработанная сеть имеет R входов, S_1 нейронов в первом слое и S_2 нейронов во втором слое. На смещение для каждого нейрона подан постоянный входной сигнал 1. Слои многослойной сети имеют различные назначения. Слой, который образует выход сети, называется слоем выхода. Все другие слои называются скрытыми слоями.

Весовая матрица, связанная с входами (IW_{11}), имеет верхние индексы, которые указывают, что источником входов является первый слой (второй индекс) и адресатом является также первый слой (первый индекс). В дальнейшем для матриц весов входа и выхода слоя будут использованы обозначения IW (*Input Weight*) и LW (*Layer Weight*) соответственно [12]:

IW – матрицы входных весов ($net.IW$).

$net.IW$ – массив $N_l \times N_i$ ячеек, где N_l – число слоев в сети, а N_i – число входов сети.

Матрица весов имеет количество строк, равное количеству нейронов в слое, к которому она относится ($n = 9$). Количество столбцов в матрице равно произведению размерности входа на количество задержек, ассоциированных с весом ($c = 80$);

LW – матрицы весов связей между слоями ($net.LW$);

$net.LW$ – массив $N_l \times N_l$ ячеек, где N_l – число слоев в сети.

Матрица весов имеет количество строк, равное количеству нейронов в слое, к которому она относится ($n = 9$). Содержит количество столбцов, равное произведению размерности слоя на количество задержек, ассоциированных с весом ($c = 3$);

b – определяет векторы смещений для каждого слоя со смещением ($net.b$).

$net.b$ – массив $N_l \times 1$ ячеек, где N_l – число слоев в сети.

Число элементов в векторе смещения всегда равно размеру слоя, с которым он связан ($n = 9$). Сети со смещением позволяют формировать более сложные связи между входами и выходами, чем сети без смещения.

Вектор смещения для второго слоя ($net.b$).

Нейрон активируется, когда суммарный уровень сигналов, пришедших в него, превысит определенный уровень (порог активации).

Вход функции активации нейрона определяется смещением и суммой взвешенных входов. Выход нейрона зависит как от входов нейрона, так и от вида функции активации. Один нейрон не может решать сложные задачи, однако несколько нейронов, объединенных в один или несколько слоев, обладают большими возможностями [12].

Векторы выходных данных слоев сети:

разомкнутый цикл –

$$a_1 = f_1 \cdot (IW_{11} \cdot X + LW_{13} \cdot Y_2 + b_1); \quad (1)$$

$$a_2 = f_2 \cdot (LW_{21} \cdot a_1 + b_2); \quad (2)$$

замкнутый цикл –

$$a_1 = f_1 \cdot (IW_{11} \cdot X + LW_{13} \cdot Y + b_1); \quad (3)$$

$$a_2 = f_2 \cdot (LW_{21} \cdot a_1 + b_2) = Y. \quad (4)$$

Итогом работы ИНС являются матрицы входных весов и весов связей между слоями, а также матрицы векторов смещений первого и второго слоев. Анализ полученных результатов моделирования в сравнении с результатами натурных экспериментов представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Показатели качества прогноза

Показатели качества	Значение
<i>MSE</i>	111
Коэффициент корреляции Пирсона	0,9827
Коэффициент корреляции Кендалла	0,8947
Коэффициент корреляции Спирмена	0,986
Средняя относительная ошибка	4,62%

Разработанная ИНС выполняет следующие функции:

- расчет контактного нажатия на основании влияющих экспериментальных данных (рисунк 4);
- расчет износа контактных вставок токоприемника по методике [14];
- расчет максимальной скорости ЭПС при допустимом износе контактных вставок.

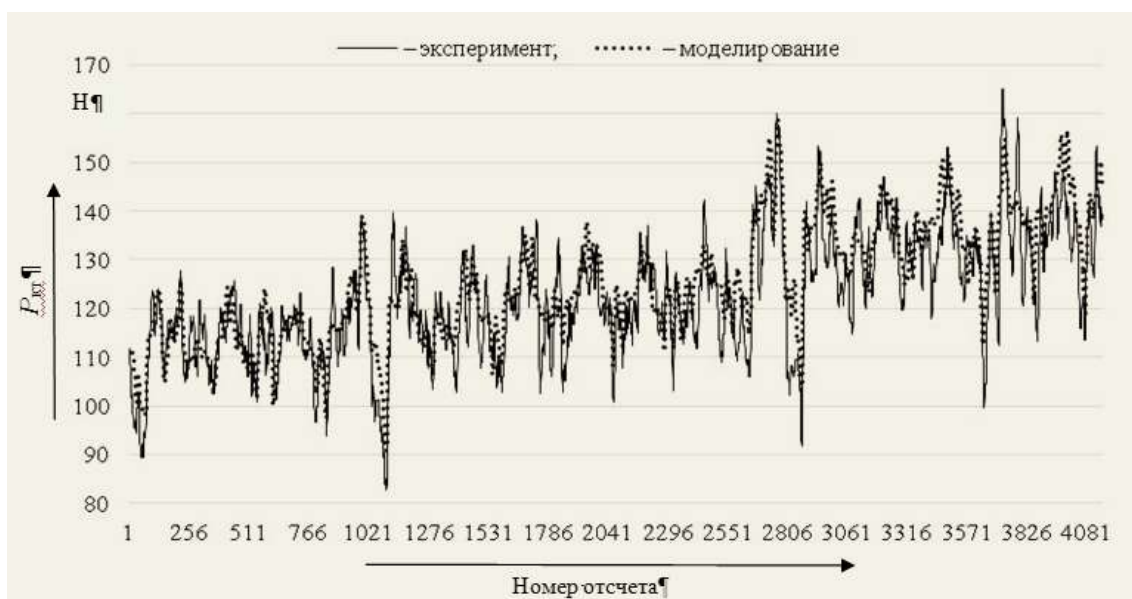


Рисунок 4 – Зависимость экспериментального и смоделированного контактного нажатия от номера отсчета

Данный набор функций позволяет оптимизировать нажатие токоприемника и подобрать оптимальные регулировки контактной сети для расчетной скорости ЭПС. Кроме того, зная значение $P_{кт}$ на участке, можно повысить точность прогнозирования износа. Расчет износа (J) контактных вставок токоприемника осуществляется на основании экспериментально полученных U -образных зависимостей удельного износа от нажатия [14]. На основании методов регрессии для аппроксимации функции одной переменной была составлена модель (аппроксимированная степенной и квадратичной функциями), которая описывает экспериментальную зависимость износа. Суммарный износ рассчитывается по формуле:

$$J(i) = \sum_{i=1}^n \begin{cases} (0,0001 \cdot (P_{кт}(i))^{1,6875} \cdot l(i); & 40 < P_{кт}(i) \leq 100; \\ (0,0011 \cdot (P_{кт}(i))^2 - 0,2244 \cdot P_{кт}(i) + 11,9703) \cdot l(i); & 100 < P_{кт}(i) < 300, \end{cases} \quad (5)$$

где l – длина участка на рассматриваемом отсчете, м;

n – количество отсчетов;

i – номер отсчета;

J – суммарный износ, мм³.

Для получения тестового набора данных был использован участок линии Москва – Санкт-Петербург длиной 10 000 м. После обучения ИНС и генерации требуемого числа вариаций нажатия по предложенной методике были получены результаты в виде гистограммы

износа контактных вставок по ширине полоза токоприемника после пробега 60 000 км (рисунк 5). Наибольший износ был зафиксирован в центральной части полозов, при этом края полозов изнашивались значительно меньше.

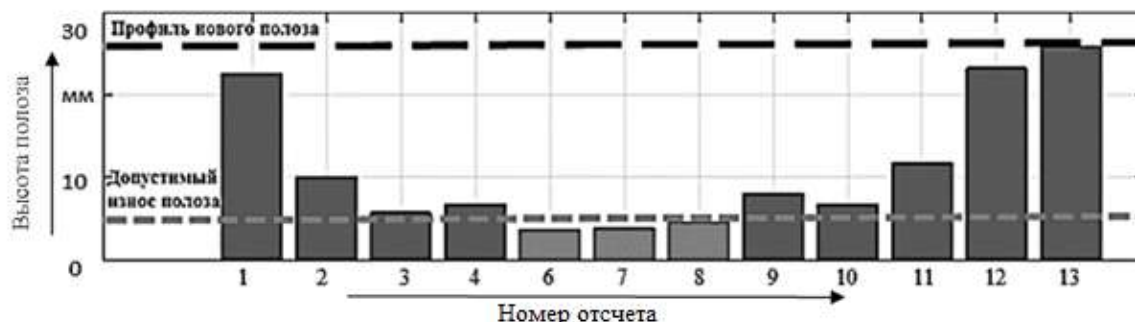


Рисунок 5 – Гистограмма износа контактных вставок токоприемника

Разработанная модель ИНС, обученная на основании выборки, содержащей значения высотного положения, эластичности контактной подвески, зигзага контактных проводов, скорости ЭПС, контактного нажатия, может быть использована без дополнительного обучения для прогнозирования $P_{кт}$ на других участках обращения данного типа ЭПС с контактной подвеской, выполненной по аналогичному проекту.

Практическая ценность применения предлагаемой методики заключается в возможности прогнозирования срока службы контактных элементов токоприемника до начала эксплуатации. Модель может быть использована также для проверки характеристик контактного нажатия при регулировке ПКС для расчетной скорости ЭПС

Разработанный метод предлагается применять для моделирования работы системы токосъема разрабатываемых скоростных и высокоскоростных линий, в том числе Москва – Казань.

Список литературы

1. Программа организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5098
2. *Pantographs for mainline vehicles, IEC 60494-1*. (Railway applications – Rolling stock – Pantographs – Characteristics and tests, International Standard IEC 60494-1). International Standard, 2013. 58 p.
3. Применение цифровых средств измерения для определения динамических характеристик устройств токосъема [Текст] / О. А. Сидоров, В. М. Павлов и др. // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2007. – № 4. – С. 76 – 79.
4. Павлов, В. М. Использование измерительных полозов для определения параметров токосъема в ходе линейных испытаний высокоскоростного поезда «Сапсан» [Текст] / В. М. Павлов, А. Н. Смердин // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении: Сб. науч. тр. – М.: Интекст, 2010. – С. 109 – 117.
5. Голубков, А. С. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечно-элементной модели [Текст] / А. С. Голубков, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 1. С. 30 – 37.
6. Кудряшов, Е. В. Информационное сопровождение жизненного цикла контактной сети на основе конечно-элементной математической модели [Текст] / Е. В. Кудряшов // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: Сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2010. – С. 52 – 66.
7. Zhigang L, Song Y, Han Y., Wang H., Zhang J., Han Z. Advances of research on high-speed railway catenary, *Journal of Modern Transportation*, 2018, no. 26(1), pp. 1 – 23.
8. Применение нейронных сетей при моделировании системы токосъема на электрических железных дорогах [Текст] / Г. Р. Ермачков, А. С. Голубков и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 1 (33). – С. 69 – 79.

9. Мещеряков, В. А. Предпосылки получения статистически достоверных данных в ходе имитационного моделирования токосъема [Текст] / В. А. Мещеряков, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения / Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт электровозостроения. – М. – 2013. – № 2 (66). – С. 104 – 121.

10. MathWorks. Neural Network Toolbox. Documentation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/tansig.html> (Дата обращения: 03.10.2018).

11. Чучуева, И. А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимально-го подобия [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.13.18 / Чучуева Ирина Александровна. – М., 2012. – 154 с.

12. Matlab.Exponenta [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru> (Дата обращения: 03.10.2018).

13. Swingler K. Applying neural networks: a practical guide, *Academic Press*, 1996, 303 p.

14. Чепурко, А. Е. Повышение качества токосъема при высоких скоростях движения путем обеспечения рациональной аэродинамической характеристики токоприемника электроподвижного состава [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Чепурко Алексей Евгеньевич. – Омск, 2015. – 178 с.

References

1. Programma organizatsii skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo soobshcheniya v Rossiyskoy Federatsii. [The program of the organization of high-speed and high-speed rail service in the Russian Federation]. Access mode: http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5098, free (access date: 03.10.2018).

2. *Pantographs for mainline vehicles, IEC 60494-1*. (Railway applications – Rolling stock – Pantographs – Characteristics and tests, International Standard IEC 60494-1.). International Standard, 2013, 58 p.

3. Sidorov O. A., Pavlov V. M., Smerdin A. N., Zarenkov S. V., Golubkov A. S. The use of digital measuring instruments to determine the dynamic characteristics of current collection devices [Primenenie tsifrovyykh sredstv izmereniya dlya opredeleniya dinamicheskikh harakteristik ustroystv tokos"ema]. *Transport Urala – The journal of Transport of the Urals*. 2007. no. 4. pp. 76 – 79.

4. Pavlov V. M., Smerdin A. N. Use of measuring strips for determining current collector parameters during linear tests of the Sapsan high-speed train [Ispol'zovanie izmeritel'nykh polozov dlya opredeleniya parametrov tokos"ema v hode lineynykh ispytaniy vysokoskorostnogo poezda «Sapsan»]. *Sb. nauch. tr. «Tokos"em i tyagovoe `elektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii»* (Sat. sci. tr. «Current-current and traction power supply for high-speed traffic). M.: Intetext, 2010. pp. 109 – 117.

5. Golubkov A. S., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. Perfection of a technique for studying wave processes in a contact suspension based on a finite element model [Sovershenstvovanie metodiki issledovaniya volnovykh protsessov v kontaktnoy podveske na osnove konechno-`elementnoy modeli]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2011. № 1. pp. 30 – 37.

6. Kudryashov E. V. Information support of the life cycle of the contact network based on the finite element mathematical model [Informacionnoe soprovozhdenie zhiznennogo tsikla kontaktnoy seti na osnove konechno-ehlementnoy matematicheskoy modeli]. *Sb. nauch. trudov OAO «VNIIZHT» «Tokos"em i tyagovoe ehlektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyannom toke»* (Sat. sci. works of JSC VNIIZhT «Current-acquisition and traction power supply in high-speed DC motion»). M.: Intetext, 2010. pp. 52 – 66.

7. Zhigang L, Song Y, Han Y., Wang H., Zhang J., Han Z. Advances of research on high-speed railway catenary, *Journal of Modern Transportation*, 2018, no. 26(1), pp. 1 – 23.

8. Ermachchikov G. R., Sidorov O. A., Golubkov A. S., Smerdin A. N. The use of neural networks in modeling a current collection system on electric railways [Primeneniye neyronnykh setey pri modelirovanii sistemy tokos"yema na elektricheskikh zheleznnykh dorogakh] *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2018. no. 1(33), pp. 69 – 79.

9. Meshherjakov V. A., Smerdin A. N., Golubkov A. S. The prerequisites for obtaining statistically reliable data in the simulation of the current collection simulation [Predposylki poluchenija statisticheskikh dostovernih dannykh v hode imitacionnogo modelirovaniya tokos"ema]. *Vestnik Vse-rossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta el-ektrovozostroeniia* (Vestnik of the All-Russian Scientific Research and Design Institute of Electric Locomotive Building). 2013, no. 2 (66), pp. 104 – 121.
10. MathWorks. Neural Network Toolbox Documentation. Access mode: <https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/tansig.html> (access date: 03.10.2018).
11. Chuchueva I. A. *Model' prognozirovaniya vremennykh rjadov po vyborke maksimal'nogo podobija* (Model of forecasting time series for a sample of maximum similarity). Doctor's thesis, Moscow, MSTU, 2012, 154 p.
12. Matlab.Exponenta. Access mode: <http://matlab.exponenta.ru> (access date: 03.10.2018).
13. Swingler K. Applying neural networks: a practical guide, *Academic Press*, 1996, 303 p.
14. Chepurko A. E. *Povysheniye kachestva tokos"yema pri vysokikh skorostyakh dvizheniya s obespecheniyem ratsional'noy aerodinamicheskoy kharakteristiki tokopriyemnika el-ektopodvizhnogo sostava* (Improving the quality of the current collection at high speeds by providing a rational aerodynamic characteristic of the current collector of an electric rolling stock). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2015, 178 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурков Анатолий Трофимович

Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС).

Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железных дорог», ПГУПС.

Тел.: +7 (812) 457-83-16.

E-mail: elsnabgd@mail.ru

Ермачков Глеб Романович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: gl.ermachkov@gmail.com.

Рыжков Александр Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

E-mail: AleksandrRyzhkov@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Совершенствование методики прогнозирования показателей системы токосъема при увеличении скоростей движения [Текст] / А. Т. Бурков, Г. Р. Ермачков, А. В. Рыжков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 91 – 100.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burkov Anatoly Trofimovich

Saint-Petersburg Railway Transport University (SPRTU).

9, Moskovskiy av., Saint-Petersburg, 190031, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, professor of the «Power Supply of Railways», SPRTU.

Phone +7 (812) 457-83-16.

E-mail: elsnabgd@mail.ru

Ermachkov Gleb Romanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Electricity supply of railway transport», OSTU.

E-mail: gl.ermachkov@gmail.com.

Ryzhkov Alexander Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Electricity supply of railway transport», OSTU.

E-mail: AleksandrRyzhkov@inbox.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Yermachkov G.R., Burkov A.T., Ryzhkov A.V. Improvement of the method of prognostication the indicators of the current collection system under the increase of motion speeds. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 3, no 35, pp. 91 – 100 (In Russian).

УДК 629.423

К. И. Доманов, В. Т. Черемисин, И. И. Галиев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ТЯГОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ 2ЭВ120 ПРИ СЛЕДОВАНИИ НА ЛИМИТИРУЮЩИХ ПОДЪЕМАХ СРЕДНЕСИБИРСКОГО ХОДА

Аннотация. В статье рассмотрены тяговые параметры электровоза двойного питания нового поколения. Представлены существующие схемы участков обслуживания электровозами и локомотивными бригадами на исследуемом полигоне железных дорог. Приведено сравнение основных параметров электровозов постоянного тока и однофазного переменного, эксплуатация которых в настоящее время организована на участках движения с поездами расчетной массы в длительном режиме тяги на подъемах различной крутизны. Представлена схема предполагаемой организации эксплуатации электровоза двойного питания и локомотивных бригад. Рассчитаны тяговые параметры двухсистемного электровоза с учетом плана и профиля пути на предполагаемых участках эксплуатации, удельное основное сопротивление движению локомотива и составу поезда при расчетной скорости движения, удельные ускоряющие и замедляющие силы поезда. При внедрении в эксплуатацию двухсистемных электровозов появится возможность сократить эксплуатируемый парк локомотивов, количество тяговых плеч за счет их удлинения и количество пунктов смены локомотивных бригад, уменьшить время следования грузовых поездов, повысить техническую и участковую скорости, среднесуточный пробег и среднесуточную производительность локомотива, снизить расход электроэнергии на тягу. Эксплуатация таких электровозов способствует развитию полигонных технологий управления перевозочным процессом, улучшению количественных и качественных показателей различных железнодорожных хозяйств.

Ключевые слова: электровоз двойного питания, двухсистемный, «Князь Владимир», тяговые расчеты, 2ЭВ120, удельные силы сопротивления движению.

Kirill I. Domanov, Vasily T. Cheremisin, Ilham I. Galiev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

TRACTION POSSIBILITIES OF A DOUBLE-LOCOMOTIVE POWER SUPPLY 2EV120 WHEN FOLLOWING ON THE LIMITING RISES OF THE CENTRAL SIBERIAN RAILWAY

Abstract. The article discusses the traction parameters of a new generation electric locomotive. The existing schemes of service areas by electric locomotives and locomotive brigades on the studied railway test site are presented. A comparison is made of the main parameters of DC and single-phase AC electric locomotives, the operation of which is currently organized on sections of movement with trains of calculated mass in the long-term mode of thrust on the climbs of various steepness. The scheme of the proposed organization of operation of a double power locomotive and locomotive crews is presented. Calculated traction parameters of a two-system electric locomotive, taking into account the plan and profile of the track in the proposed areas of operation, specific resistivity to the movement of the locomotive and the composition of the train at the estimated speed, specific accelerating and decelerating forces of the train. When two-system electric locomotives are put into operation, it will be possible to reduce the fleet of locomotives in operation, the number of traction arms due to their lengthening and the number of locomotive change points, reduce the transit time of freight trains, increase technical and local speed, average daily mileage and average daily performance of the locomotive, reduce power consumption per traction. The operation of such electric locomotives contributes to the development of polygon technologies for managing the transportation process, improving the quantitative and qualitative indicators of various railway enterprises.

Keywords: dual power electric locomotive, two-system, «Knyaz' Vladimir», traction calculations, 2EV120, specific forces of resistance to movement

Повышение эффективности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте зависит от комплексного развития инфраструктуры. Наиболее важными элементами данной системы являются вагонный парк, пути, система электроснабжения, устройства, обеспечивающие безопасность движения поездов, отвечающий современным техническим требованиям тяговый подвижной состав [1].

Наиболее экономически важным направлением грузовых перевозок России является транспортный коридор Кузбасс – Центр, часть которого пролегает по Западно-Сибирской железной дороге. Железнодорожные магистрали дороги соединяют крупнейшие бассейны по

добыче угля, руды, углеводородов с предприятиями перерабатывающей промышленности и сухопутными пограничными переходами. Вынужденные технические стоянки для смены локомотивов и локомотивных бригад на станциях стыкования электротяги постоянного тока с номинальным напряжением в контактной сети 3 кВ с переходом на питание однофазным переменным током с номинальным напряжением в контактной сети 25 кВ с промышленной частотой 50 ГЦ отрицательно влияют на важнейшие показатели грузопотока [2, 3].

Ранее для таких участков была выпущена сравнительно небольшая партия отечественных грузовых электровозов двойного питания серии ВЛ82М с коллекторными тяговыми двигателями, которые до сих пор эксплуатируются на электрифицированных участках Южной (Украина), Северо-Кавказской и Октябрьской железных дорог. Данные электровозы физически и морально устарели, их тяговые и эргономические показатели не соответствуют намеченному в компании ОАО «РЖД» вектору развития грузового движения и комфортным условиям труда локомотивных бригад. В настоящее время для увеличения объема перевозок и повышения показателей работы железнодорожного транспорта возрастает актуальность применения электровозов двойного питания [4].

Качественные и количественные показатели перевозочного процесса могут быть улучшены путем внедрения в эксплуатацию инновационного магистрального грузового электровоза двойного питания 2ЭВ120 «Князь Владимир». В статье дан анализ возможности внедрения в эксплуатацию представленного локомотива прежде всего на плечах обслуживания Западной Сибири, имеющих лимитирующие подъемы. Большая часть Западно-Сибирской железной дороги электрифицирована на постоянном токе и только Среднесибирский ход Артышта II – Иртышское электрифицирован на однофазном переменном токе. При этом южный ход дороги состоит из электрифицированного участка постоянного тока Междуреченск – Артышта II длиной 160 км, граничащего в Междуреченске с полигоном переменного тока Красноярской железной дороги, участка переменного тока Артышта II – Иртышское длиной 840 км и участка постоянного тока Иртышское – Входная длиной 164 км с выходом на полигоны постоянного тока Южно-Уральской и Свердловской железных дорог (рисунок 1). Таким образом, на полигоне Среднесибирского хода длиной 1164 км три станции стыкования двух родов тока: Междуреченск, Артышта II, Иртышское [5].

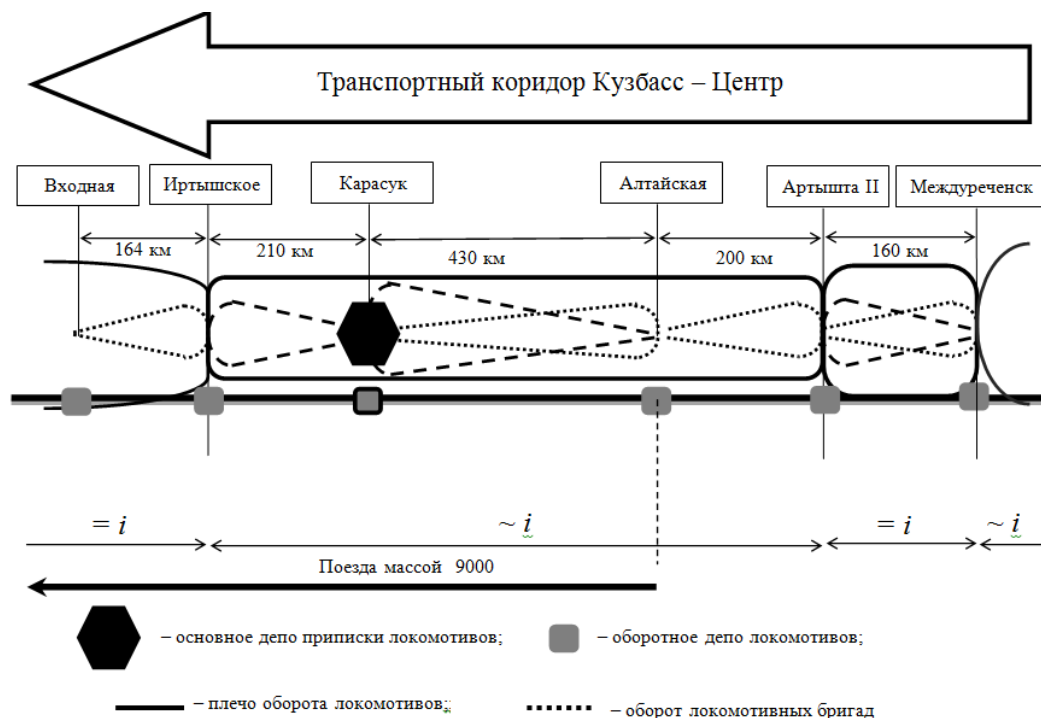


Рисунок 1 – Участки поездной работы электровозов и локомотивных бригад на Среднесибирском ходу Западно-Сибирской железной дороги

Двухсистемный электровоз 2ЭВ120 предназначен для повышения тягового обслуживания различных видов грузовых перевозок с повышенными скоростями движения и массами составов. Концепция проекта данного электровоза создана на основе анализа особенностей грузовых перевозок в России и за рубежом для безотцепочного вождения грузовых поездов на расстояния свыше 3 тыс. км на участках, питающихся током разного рода. В таблице 1 представлены основные технические характеристики электровозов новых серий, широко эксплуатируемых на сети ОАО «РЖД» [3].

Проведя анализ основных технических характеристик грузового двухсистемного двухсекционного электровоза 2ЭВ120, можно заключить, что за счет асинхронного привода он имеет более высокие тяговые параметры, чем электровозы, использующие коллекторный тип тяговых электродвигателей. Так же он сравним и с локомотивами, оснащенными асинхронным тяговым двигателем.

Основные сравнительные технические данные электровозов новых серий, эксплуатируемых на сети ОАО «РЖД»

Показатель	Серия электровоза				
	2ЭВ120 «Князь Владимир»	2ЭС10 «Гранит»	2ЭС6 «Синара»	2ЭС4К «Дончак»	2ЭС5К «Ермак»
Номинальное напряжение на токоприемнике, кВ: постоянный ток переменный ток	3 25 (50 Гц)	3 —	3 —	3 —	— 25 (50 Гц)
Максимальная эксплуатационная скорость, км/ч	120	120	120	120	110
Служебная масса с 2/3 запаса песка, т	200	200	200	192	192
Тип ТЭД	Асинхронный		Коллекторный		
Осевая формула	2 (2 ₀ – 2 ₀)				
Статическая нагрузка от колес- ной пары на рельс, кН	245	249	245	235	235
Максимальная мощность на обо- де колесных пар, кВт	9600	8800	6440	6440	6560
Мощность на валах ТЭД в про- должительном режиме, кВт	8800	8400	600	5735	6120
Скорость длительного режима, км/ч	52,8	55	51	53,4	51
Сила тяги на ободе колесных пар в продолжительном режиме, кН	600	538	466	391	423
Максимальная сила тяги (часово- го режима) на ободе колесных пар при трогании с места, кН	700	784	667	434	464
КПД в продолжительном режиме работы, % : постоянный ток переменный ток	88 86	87,5 —	86 —	88 —	— 85

Важнейшими показателями электровозов в эксплуатации являются максимальная масса поездов, которые они могут водить на различных участках, скорость движения, от которой зависит время хода, и удельный расход электроэнергии на тягу [6]. Подконтрольная эксплуатация электровоза «Князя Владимира» на Южно-Уральской и Северо-Кавказской железных дорогах показала, что в номинальном продолжительном режиме тяги за счет большей мощности и силы тяги электровоз 2ЭВ120 может водить грузовые поезда, масса которых в 1,1 – 1,5 раза больше, чем для электровозов 2ЭС5К, 2ЭС6, 2ЭС10, и почти в два раза больше, чем для электровоза 2ЭС4К. При этом скорость движения электровоза 2ЭВ120 выше на 3 – 6 %, а удельный расход энергии на 2 – 3 % выше, чем для электровозов одного рода тока [7, 8].

Вследствие большой протяженности рассматриваемого транспортного коридора выбран участок, имеющий лимитирующий подъем с начальным пунктом формирования грузового поезда. Ключевым элементом в определении тяговых возможностей электровоза на конкретном плече обслуживания является продольный профиль пути, который на участке Междуреченск – Алтайская наиболее сложный. В результате проведенного анализа выбранного участка определены перегоны и участки с наихудшими условиями для движения поездов, имеющие лимитирующие подъемы. Таким перегонном стал Артышта II – Аламбай. При расчетах принята начальная скорость 0 км/ч от станции Артышта II. В расчетах не учитывались кратная тяга, подталкивание и применение бустерного режима.

Протяженность исследуемого участка Артышта II – Аламбай – 30 км. Он имеет 53 участка, 10 из которых являются спусками небольшой величины, а 43 участка представляют собой подъемы, максимальный из которых равен 9,1 ‰. При проведении расчетов, а также для учета длины поезда при определении сил, действующих на поезд от уклонов, смежные участки, близкие по крутизне и одинаковые по знаку элементов реального профиля пути, спрямляют. Крутизна уклона определяется по формуле [9]:

$$i'_c = \frac{\sum_{j=1}^z i_j l_j}{\sum_{j=1}^z l_j} = \frac{l}{l_c} \sum_{j=1}^z i_j l_j = \frac{10^3}{l_c} (h_k - h_n), \quad (1)$$

где z – количество спрямленных элементов;

i_j – крутизна j -го элемента, ‰;

l_j, l_c – длина j -го элемента и суммарная длина спрямленных элементов, м;

h_k, h_n – конечная и начальная высота над уровнем моря спрямленного участка, м.

При наличии кривых в плане элементов пути на спрямленном участке их заменяют фиктивным подъемом, крутизну которого определяют с помощью выражения

$$i''_c = \frac{l}{l_c} \sum_{j=1}^z w_{rj} l_{rj}, \quad (2)$$

где w_{rj} – удельное дополнительное сопротивление движению от j -й кривой, Н/кН;

l_{rj} – длина j -й кривой, м;

z – количество кривых на участке.

Расчетным подъемом при определении параметров электровоза для осуществления поездной работы является наиболее крутой и длинный на исследуемом участке подъем, на котором локомотив реализует расчетную касательную силу тяги при установившейся расчетной скорости движения. Этот подъем выбирают путем анализа спрямленного и приведенного профилей пути. На тяговом плече Артышта II – Тягун наиболее крутой подъем находится на первом перегоне до станции Аламбай.

Во время движения по перегону на поезд действуют различные силы. Силы сопротивления движению делят на основные, действующие при движении поезда всегда, и дополнительные, возникающие только при движении по отдельным участкам пути или в отдельные периоды времени. Важная составляющая при определении тяговых возможностей двухсистемного электровоза ЭВ120 – величина удельного основного сопротивления движению поезда w'_0 (3). Она определяется при расчетной скорости V в зависимости от типа пути по эмпирическим формулам, причем для электровоза находят удельное основное сопротивление движению под током, а для вагонов данную величину определяют в зависимости от типа вагонов, буксовых подшипников и массы, приходящейся на одну ось вагона. Для перегона Артышта II – Аламбай, имеющего бесстыковой путь [9],

$$w'_0 = 18,6 + 8 \cdot 10^{-3} V + 2,4 \cdot 10^{-4} V^2. \quad (3)$$

Примем в расчетах, что при экспериментальной поездке в состав поезда вошли самые многочисленны на сети ОАО «РЖД» грузовые четырехосные вагоны на подшипниках качения. Удельное основное сопротивление движению таких вагонов w''_c определяется с помощью выражения [9]

$$w''_c = 0,7 + \frac{3 + 0,1V + 0,0024V^2}{m_{в.о}}, \quad (4)$$

где $m_{в.о}$ – масса, приходящаяся на ось вагона в груженом состоянии, равная 22 т.

Одной из важнейших составляющих при проведении тяговых расчетов служит величина массы состава вагонов грузового поезда. Она рассчитывается (5) по разным критериям исходя из полного использования мощности и тяговых качеств электровоза. Прежде всего рассчитывают наибольшую массу состава m_c по условиям сцепления колес электровоза массой m_d с рельсами при движении в установившемся режиме тяги с расчетной скоростью V и касательной силой тяги $F_{к.р}$ на расчетном подъеме крутизной i_p [9]:

$$m_c = \frac{F_{к.р} \cdot 10^3 - m_d g (w'_0 + i_p)}{g (w''_0 + i_p)}. \quad (5)$$

Для усредненных неблагоприятных условий движения (влажные рельсы с применением песка по необходимости автоматически или вручную) ограничение по сцеплению для электровоза 2ЭВ120 при работе как на переменном, так и на постоянном токе рекомендуется принимать с использованием формулы расчета коэффициента сцепления на ободу колесной пары (в среднем для электровоза) [3]:

$$\psi_k = 0,31 + \frac{4,5}{50 + 6 \cdot V} - 0,0006 \cdot V. \quad (6)$$

Формула (6) дает величины коэффициента сцепления по сравнению с Правилами тяговых расчетов для электровозов с коллекторными тяговыми двигателями и контакторным регулированием силы тяги:

- примерно на 12 % выше, чем у электровозов переменного тока;
- примерно на 19 % выше, чем у электровозов постоянного тока.

На конкретных участках эксплуатации электровоза 2ЭВ120 ограничение по сцеплению может отличаться от рекомендованного: выше в зависимости от характерных особых видов загрязнения рельсов (масляная пленка, угольная пыль и др.).

В тяговых расчетах рассматриваются только те слагаемые полных и удельных сил, приложенных к поезду, которые направлены вдоль линии движения поезда, так как именно они влияют на поступательное движение поезда по рельсовой колее. Удельная сила – это сила сопротивления каждой единицы веса поезда. Без значений удельных ускоряющих и замедляющих сил невозможно решить тормозную задачу. Эти силы характеризуют ускорение, а также замедление поезда в различных режимах движения на прямом горизонтальном участке пути, они используются при решении уравнения движения поезда. Удельная ускоряющая сила поезда массой m в режиме тяги [9]

$$f_y = f_k - w_0 = \frac{F_k \cdot 10^3}{mg} - w_0, \quad (7)$$

где w_0 – основное удельное сопротивление движению всего поезда, кН (8);

F_k – значения силы тяги на ходовых позициях, кН;

m – масса поезда (сумма m_d и m_c).

Тогда

$$w_0 = \frac{w'_0 \cdot m_{\text{л}} + w''_0 \cdot m_{\text{с}}}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}} \quad (8)$$

Расчет f_y целесообразно выполнить для ограничивающих линий и тяговых характеристик F_k на ходовых позициях регулирования напряжения тягового двигателя с интервалом скорости 5 – 10 км/ч, включая расчетную скорость V и скорости в других характерных точках [3].

Примем в расчетах, что удельная замедляющая сила движения поезда $f_{\text{з.в}}$ равна основному удельному сопротивлению движения поезда. Тогда удельная тормозная сила поезда при экстренном пневматическом торможении [9]

$$b_{\text{п.т}} = 1000 \cdot \varphi_{\text{к.р}} \cdot \vartheta_{\text{р}}, \quad (9)$$

где $\varphi_{\text{к.р}}$ – расчетный коэффициент трения тормозных колодок;

$\vartheta_{\text{р}}$ – расчетный тормозной коэффициент.

При проведении комплекса приемочных и сертификационных испытаний двухсистемного электровоза 2ЭВ120 в октябре 2017 г., которые проводились специалистами ВНИИЖТа, первыми согласно графику проводились тормозные испытания. Здесь разработчиков электровоза ожидали отрицательные результаты в части несоответствия нормативам тормозного пути экстренного торможения. На электровозе двойного питания «Князь Владимир» с момента его выпуска были применены чугунные колодки без гребней, ранее используемые на чехословацких электровозах серии ЧС. По окончании первичных испытаний было выявлено, что фрикционный коэффициент примененных колодок не соответствует расчетной формуле, приведенной в Правилах тяговых расчетов для стандартных чугунных колодок с относительно низким содержанием фосфора. Это несоответствие привело к ошибке в проектных расчетах тормозной силы.

Для устранения выявленной проблемы необходимо было повысить фрикционный коэффициент тормозных колодок за счет увеличения концентрации содержания фосфора. Опытная партия тормозных колодок была изготовлена на электровозоремонтном заводе в городе Ярославль. Новые колодки были сертифицированы, так как при повторных испытаниях они показали положительный результат. На исследуемом участке перегона Артышта II – Тягун коэффициент трения тормозных колодок в зависимости от скорости движения для тормозных колодок с повышенным содержанием фосфора [9]

$$\varphi_{\text{к.р}} = 0,30 + \frac{V + 100}{5V + 100} \quad (10)$$

Наименьшее значение расчетного тормозного коэффициента $\vartheta_{\text{р}}$ согласно нормативам тормозных расчетов для грузовых груженых поездов с тормозными колодками, имеющих повышенное содержание фосфора и максимальную скорость движения, на исследуемом участке до 80 км/ч принимают 0,33.

Для решения тормозной задачи необходимо определить удельную замедляющую силу поезда в режиме служебного пневматического торможения [9]:

$$f_{\text{з.п.т}} = w_0 + k_{\vartheta_{\text{р}}} \cdot b_{\text{п.т}}, \quad (11)$$

где $k_{\vartheta_{\text{р}}}$ – расчетный тормозной коэффициент при графиковых остановках на отдельных пунктах и проверке действия автотормозов на эффективность для грузовых поездов равен 0,5. При регулировочном торможении для поддержания установленной скорости движения на спусках используется, как правило, 1-я ступень служебного торможения и степень использования расчетного тормозного коэффициента принимается для грузовых поездов на груженом и среднем режимах воздухораспределителей 0,3.

Во время движения поезда на исследуемом перегоне, где есть участки профиля пути, выраженные в виде спуска, машинистом может быть использован режим электродинамического торможения. На двухсистемном электровозе 2ЭВ120 применяется рекуперативное и реостатное электрическое торможение. На скорость движения данный режим влияет как удельная замедляющая сила при электродинамическом торможении, которое можно определить по формуле [9]:

$$f_{3.p} = b_k + w_0 = \frac{B_k}{mg} + w_0, \quad (12)$$

где b_k – удельная тормозная сила электрического тормоза электровоза, Н/кН.

Расчет $f_{3.p}$ выполнен для ограничивающих линий и тормозных характеристик электровоза на всех позициях регулирования с интервалом скорости 5 – 10 км/ч с учетом электродинамического торможения, результаты расчетов для четырех уровней нагруженности по отношению к предельным характеристикам представлены на рисунке 2.

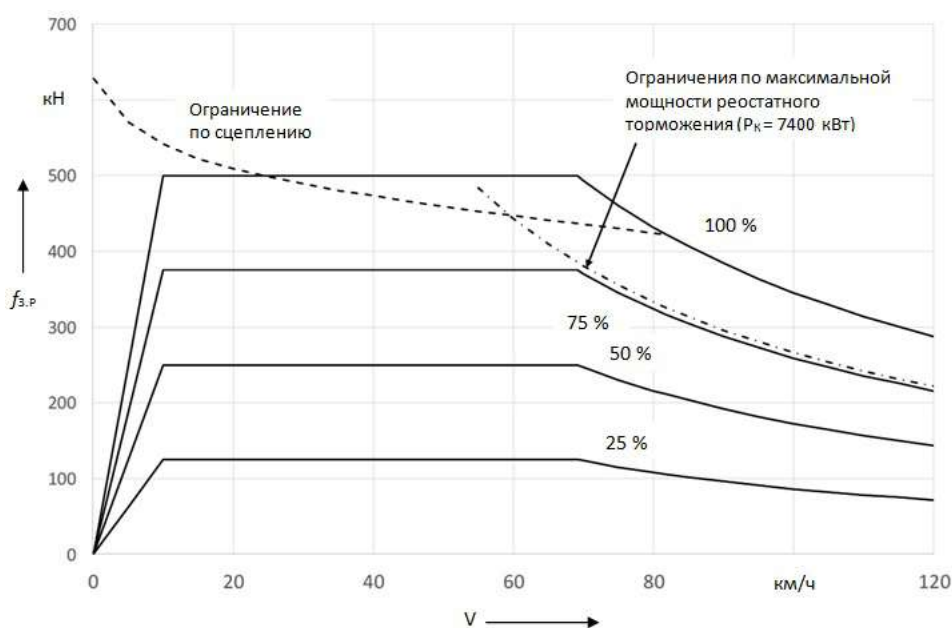


Рисунок 2 – Тормозные характеристики двухсистемного электровоза для четырех уровней нагруженности

Важнейшим нормативом грузоперевозок является осуществление заявленного количественного показателя, выражающегося в совершенной тонно-километровой работе, выполнение которой зависит от поездных весовых норм. Проведенные расчеты показали, что электровоз двойного питания 2ЭВ120 «Князь Владимир» может выполнять поездную работу на тяговом плече Артышта II – Алтайская в соответствии с установленной ранее нормой массы. Эта норма установлена приказом заместителя генерального директора ОАО «РЖД» – начальником дирекции тяги 3-СИБ ЦТ-108 от 30.05.2017 г. «Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Западно-Сибирской дирекцией тяги» [10]. Двухсистемный электровоз 2ЭВ120 в составе поезда, масса которого превышает критическую массу для поездов с ведущими локомотивами ВЛ80С и составляет от 4000 до 5520 т, может безостановочно проследовать участки, имеющие лимитирующие подъемы и требующие подталкивающие локомотивы. В трехсекционном исполнении электровоз 2ЭВ120 на данном тяговом плече может без подталкивания вести поезд массой до 7300 т, тогда как электровозы 1,5ВЛ80С без подталкивания имеют ограничения по массе поезда 5700 т.

На двухсистемном электровозе 2ЭВ120 установлен тяговый асинхронный привод. Считается, что он обеспечивает максимальные показатели сцепных свойств. На электровозе

применяются поосное регулирование тяги и специальные алгоритмы управления для повышения коэффициента сцепления. По результатам расчета коэффициент сцепления на тяговом плече Артышта II – Алтайская в расчетном режиме равен 0,294 при силе тяги в расчетном режиме 578 кН.

В случае внедрения в эксплуатацию на полигоне Междуреченск – Входная электровозов двойного питания 2ЭВ120 можно удлинить участки работы локомотивных бригад и вместо пяти получить три тяговых плеча: Междуреченск – Алтайская длиной 360 км, Алтайская – Иртышское длиной 640 км, Иртышское – Входная длиной 164 км (рисунок 3). Следовательно, в результате уменьшения количества тяговых плеч до трех сократится два пункта смены локомотивных бригад: в Артыште II и в Карасуке.

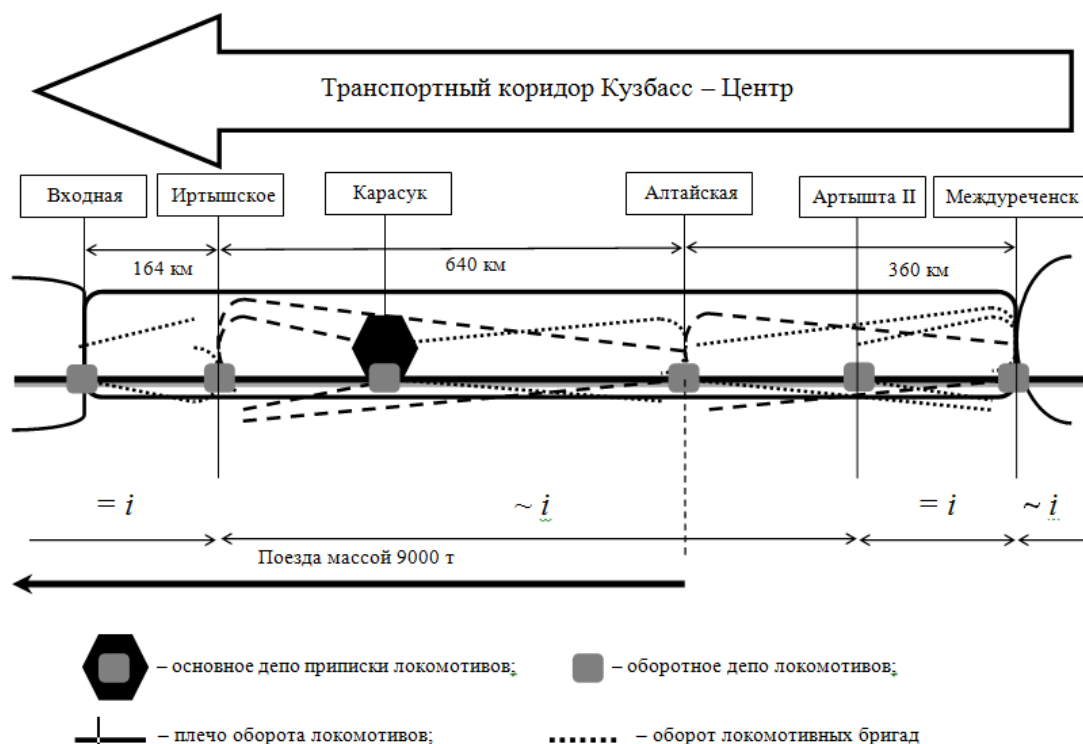


Рисунок 3 – Участки поездной работы электровозов и локомотивных бригад на Среднесибирском ходу Западно-Сибирской железной дороги

Для повышения эффективности перевозочного процесса и экономии средств на электрифицированном полигоне Междуреченск – Входная длиной 1164 км, на котором расположены три станции стыкования двух родов тока, целесообразно использовать инновационные электровозы нового поколения серии 2ЭВ120. В результате их применения на этом полигоне появляется возможность сократить эксплуатируемый парк локомотивов примерно на треть, количество тяговых плеч – с пяти до трех за счет их удлинения и количество пунктов смены локомотивных бригад – с шести до четырех, уменьшить время хода поездов, повысить техническую и участковую скорости, среднесуточный пробег и среднесуточную производительность локомотива, штат локомотивных бригад, увеличить массу поездов, снизить расход электроэнергии на тягу [11].

На основе проведенных расчетов возможно дать оценку технологическим эффектам от внедрения в эксплуатацию грузового двухсистемного электровоза 2ЭВ120 на полигоне Междуреченск – Входная в сравнении с ныне эксплуатируемыми электровозами. После удлинения тяговых плеч за счет безостановочного проследования станций стыкования увеличится среднесуточная производительность локомотивов за счет исключения времени на прицепки, отцепки и простои на станции. Возрастут среднесуточный пробег и участковая скорость грузовых составов, снизится потребление электроэнергии на тягу поездов ввиду отсутствия тра-

ты времени на разгон и торможение. Удельный расход электроэнергии на тягу поездов будет ниже, чем у электровазозов, эксплуатируемых на исследуемом участке в настоящее время.

Список литературы

1. О научной платформе стратегии развития железнодорожного транспорта России до 2050 года [Текст] / Б. М. Липидус, А. С. Мишарин и др. // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – М.: Селадо. – 2017. – № 2. – С. 1 – 21.
2. Осьминин, А. Т. Научные подходы к расчету границ полигонов управления перевозочным процессом и реализации полигонных технологий [Текст] / А. Т. Осьминин // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – М.: Селадо. – 2017. – № 2. – С. 42 – 57.
3. Покровский, С. В. Потенциал эффективности грузовых электровазозов с асинхронными тяговыми двигателями [Текст] / С. В. Покровский // Техника железных дорог / Институт проблем естественных монополий. – М. – 2018. – № 2 – С. 58 – 64.
4. Мишарин, А. С. Имитационная экспертиза проектов развития транспортной инфраструктуры [Текст] / А. С. Мишарин, П. А. Козлов // Железнодорожный транспорт / Центр научно-технической информации и библиотек ОАО «РЖД». – М. – 2014. – № 4. – С. 52 – 54.
5. Козлов, П. А. От Кузбасса до Усть-Луги – единая модель [Текст] / П. А. Козлов, И. О. Набойченко, В. Ю. Пермикин // Железнодорожный транспорт / Центр научно-технической информации и библиотек ОАО «РЖД». – М. – 2016. – № 3. – С. 26 – 29.
6. Заровняев, А. А. Принципы полигонной технологии пропуска совмещенного потока поездов [Текст] / А. А. Заровняев, И. О. Набойченко // Железнодорожный транспорт / Центр научно-технической информации и библиотек ОАО «РЖД». – М. – 2016. – № 7. – С. 41 – 43.
7. Тимухина, Е. Н. Метод выявления лимитирующих железнодорожных станций для пропуска тяжеловесных поездов на полигоне дороги [Текст] / Е. Н. Тимухина, В. Ю. Пермикин, Н. В. Кашеева // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 1 (52). – С. 40 – 44.
8. Бегагоин, Э. И. Сравнительный анализ тяговых свойств грузовых электровазозов ВЛ11, 2ЭС6, 2ЭС10 [Текст] / Э. И. Бегагоин, Д. Л. Худояров, В. А. Кукушкин // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2016. – № 2 (49). – С. 105 – 109.
9. Осипов, С. И. Теория электрической тяги: Учебник [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. – М.: Маршрут, 2006. – 436 с.
10. Валинский, О. С. Приказ «Об установлении норм масс и длин пассажирских и грузовых поездов на участках, обслуживаемых Западно-Сибирской дирекцией тяги» от 30.05.2017 № ЦТ-108 [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2017. – 32 с.
11. Бакланов, А. А. Возможности применения двухсистемных электровазозов на железных дорогах Урало-Сибирского региона [Текст] / А. А. Бакланов, Н. В. Есин, А. П. Шиляков // Материалы науч.-практ. конф. «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 22 – 28.

References

1. Lapidus B. M., Misharin A. S., Makhutov N. A., Fomin V. M., Zaytsev A. A., Macheret D. A. O nauchnoy platforme strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta Rossii do 2050 goda [About the scientific platform of the strategy for the development of railway transport in Russia until 2050]. *Bulletin of the United Scientific Council of Russian Railways – Science journal*, 2013, no. 2, pp. 1 – 21.
2. Os'minin A. T. Nauchnyye podkhody k raschetu granits poligonov upravleniya perevozochnym protsessom i realizatsii poligonnykh tekhnologiy [Scientific approaches to the calculation of the boundaries of landfill management of the transportation process and the implementation of poly-

gon technologies]. *Bulletin of the United Scientific Council of Russian Railways – Science journal*, 2013, no. 2, pp. 42 – 57.

3. Pokrovskiy S. V. Potentsial effektivnosti gruzovykh elektrovozov s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Efficiency potential of freight electric locomotives with asynchronous traction motors.]. *Technique of Railways – Institute of the Problems of Natural Monopolies Science journal*, 2018, no. 2, pp. 58 – 64.

4. Misharin A. S., Kozlov P. A. Imitatsionnaya ekspertiza proyektov razvitiya transportnoy infrastruktury [Imitating examination of transport infrastructure development projects]. *Railways transport – Center for Scientific and Technical Information and Libraries of JSC Russian Railways*, 2014, no. 4, pp. 52 – 54.

5. Kozlov P. A., Naboychenko I. O., Permikin V. YU. Ot Kuzbassa do Ust'-Lugi – yedinaya model' [From Kuzbass to Ust-Luga - a unified model]. *Railways transport – Center for Scientific and Technical Information and Libraries of JSC Russian Railways*, 2016, no. 3, pp. 26 – 29.

6. Zarovnyayev A. A., Naboychenko I. O. Printsipy poligonnoy tekhnologii propuska sovmeshchennogo potoka poyezdov [Principles of the landfill technology to allow combined flow of trains]. *Railways transport – Center for Scientific and Technical Information and Libraries of JSC Russian Railways*, 2016, no. 7, pp. 41 – 43.

7. Timukhina E. N., Peremkin V. YU., Kashcheyeva N. V. Metod vyyavleniya limitiruyushchikh zheleznodorozhnykh stantsiy dlya propuska tyazhelovesnykh poyezdov na poligone dorogi [The method of identifying the limiting railway stations for passing heavy trains on the road range]. *Transport Urala – Science journal*, 2017, no. 1(52), pp. 40 – 44.

8. Begagoin E. I., Khudoyarov D. L., Kukushkin V. A. Sravnitel'nyy analiz tyagovykh svoystv gruzovykh elektrovozov VL11, 2ES6, 2ES10 [Comparative analysis of traction properties of freight electric locomotives VL11, 2ES6, 2ES10]. *Transport Urala – Science journal*, 2016, no. 2(49), pp. 105 – 109.

9. Osipov S.I., Osipov S.S., Feoktistov V.P. *Teoriya elektricheskoy tyagi* (Theory of electric thrust). Moscow: Route., 2006, 436 p.

10. Valinskiy O. S. Prikaz «Ob ustanovlenii norm mass i dlin passazhirskikh i gruzovykh poyezdov na uchastkakh, obsluzhivayemykh Zapadno-Sibirskoy direktsiyey tyagi ot 30.05.2017 № TST-108» (Order “On the establishment of standards for the masses and lengths of passenger and freight trains in the sections served by the West Siberian Directorate of 30.05.2017 No. TsT-108) Moscow: 2017.

11. Baklanov A. A., Yesin N. V., Shilyakov A. P. Vozmozhnosti primeneniya dvukhsistemnykh elektrovozov na zheleznykh dorogakh Uralo-Sibirskogo regiona [Possibilities of using two-system electric locomotives on the railways of the Ural-Siberian region]. *Materialy nauch.-prakt. konf. «Eksploatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povysheniye effektivnosti tyagi poyezdov»* (Materials scientific-practical. conf. «Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction»). Omsk, 2016. pp. 22 – 28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Доманов Кирилл Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Инженер, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (923) 671-56-33.

E-mail: domanov35@gmail.com

Черемисин Василий Титович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Domanov Kirill Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Engineer, graduate student of the Department «Railway Rolling Stock», OSTU.

Phone: +7 (923) 671-56-33.

E-mail: domanov35@gmail.com

Cheremisin Vasily Titovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federa-

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Doctor of Technical Sciences, Head of Department «Railway Rolling Stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com

Галиев Ильхам Исламович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, президент ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

Galiev Ilham Islamovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, president of OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-16-09.

E-mail: Prezident@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Доманов, К. И. Тяговые возможности электровоза двойного питания 2ЭВ120 при следовании на лимитирующих подъемах Среднесибирского хода [Текст] / К. И. Доманов, В. Т. Черемисин, И. И. Галиев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 101 – 111.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Domanov K. I., Galiev I. I., Cheremisin V. T. Traction possibilities of a double-locomotive power supply 2EV120 when following on the limiting rises of the Central Siberian Railway. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 3, no 35, pp. 101 – 111 (In Russian).

УДК 621.316.99:621.331

В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Уткина

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМЕ ПРОВОДНИКОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРТЛИ

Аннотация. Статья посвящена вопросу влияния блуждающих токов на подземные металлические сооружения, находящиеся вблизи тяговой рельсовой сети. В статье рассмотрена система, состоящая из тяговой рельсовой сети, заземляющего устройства и двух изолированных подземных проводников, расположенных в зоне влияния блуждающих токов, обусловленных электрифицированным железнодорожным транспортом. Получены аналитические выражения для расчета распределения электрических величин в подземных сооружениях с учетом их взаимного влияния. Выражения получены с использованием интегрального преобразования Хартли, в отличие от Фурье осуществляющего преобразование только в вещественной области. Полученные выражения позволяют определить зоны опасного влияния и величину блуждающих токов, что в последующем используется при проектировании средств защиты подземных сооружений.

Ключевые слова: заземляющее устройство, тяговая рельсовая сеть, блуждающий ток, подземное сооружение, преобразование Хартли.

Vasilii A. Kandaev, Ksenia V. Avdeeva, Anastasia V. Utkina

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

DETERMINATION OF ELECTRICAL QUANTITIES IN THE SYSTEM OF CONDUCTORS UNDER THE INFLUENCE OF THE DC ELECTRIFIED RAILWAY TRANSPORT USING HARTLEY TRANSFORM

Abstract. The paper deals with the influence of stray currents on underground metal structures located near the traction rail network. The paper presents a system consisting of a traction rail network, a grounding grid and two iso-

lated underground conductors located under the stray currents influence caused by electrified railway transport. Analytical expressions for the calculation of the distribution of electrical quantities in underground structures with their mutual influence were obtained. The expressions were obtained using Hartley integral transform, which in contrast to the Fourier transform allows carrying out integral transformations only with real-valued functions. The obtained expressions allow determining the zone of dangerous influence of stray current and can be used in the design of underground structure protection.

Keywords: grounding grid, traction rail network, stray current, buried structure, Hartley transform.

В непосредственной близости от электрифицированного железнодорожного транспорта расположены различные металлические подземные сооружения, к которым относятся заземляющие устройства (ЗУ), трубопроводы и кабели различного назначения. Особенностью электрической тяги на железнодорожном транспорте является канализация обратного тягового тока по рельсам и земле. Блуждающие токи, обусловленные электрифицированным железнодорожным транспортом постоянного тока, оказывают значительное влияние на срок службы подземных металлических сооружений [1]. Для оценки опасного влияния блуждающих токов необходимо знать распределение электрических величин в тяговой рельсовой сети и подземных сооружениях. Решение данной задачи позволяет определить места установки средств защиты от влияния блуждающих токов на участке железной дороги. При этом необходимо понимать, что подземные сооружения подвержены влиянию не только со стороны тяговой рельсовой сети, но и соседних подземных сооружений. Таким образом, задачу, связанную с определением распределения электрических величин в подземных транспортных сооружениях, необходимо решать в системе.

На рисунке 1 приведена система подземных сооружений, расположенная в зоне влияния блуждающих токов, обусловленных плотностью токов утечки с тяговой рельсовой сети постоянного тока $j_p(x)$ (А/км). Тяговая рельсовая сеть длиной l (км) находится на поверхности однородной земли с удельным сопротивлением ρ (Ом·км). Система подземных сооружений включает в себя ЗУ произвольной формы и два изолированных подземных проводника, расположенных параллельно тяговой рельсовой сети. При условии, что расстояние между ЗУ и изолированными подземными проводниками много больше размеров ЗУ, ЗУ можно представить в виде полусферы радиусом r_{3y} (км), находящейся у поверхности земли [2]. Поскольку система подземных сооружений находится на конечном расстоянии от поверхности земли, каждый элемент системы дополнен зеркальным отражением по методу зеркальных изображений [3]. ЗУ подключено к тяговой подстанции дренажным кабелем с сопротивлением R_k (Ом).

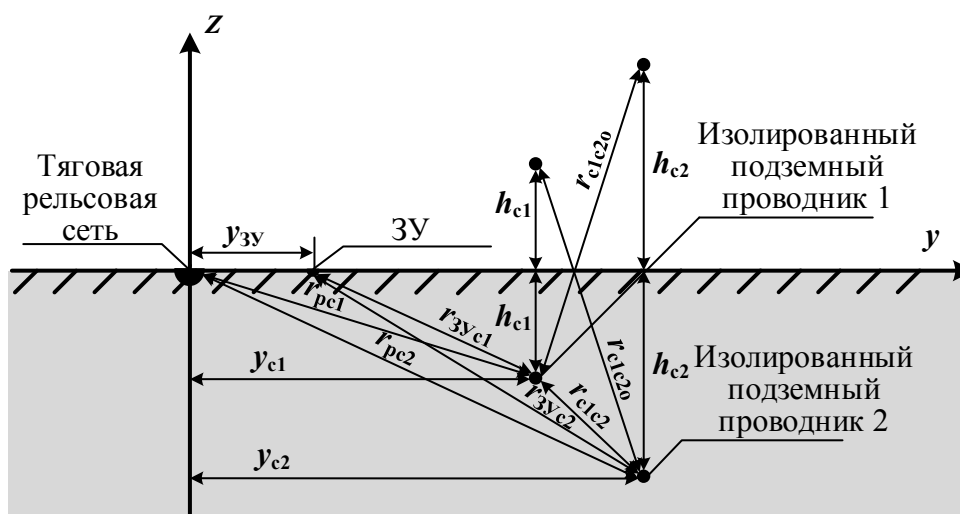


Рисунок 1 – Расположение тяговой рельсовой сети, подземных сооружений и их зеркальных отражений

Потенциал точки земли с координатами (x, y, z) относительно бесконечно удаленной точки (далее по тексту – потенциал), обусловленный токами утечки с тяговой рельсовой сети, определяется следующим образом [4]:

$$f_p(x, r_p) = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^l \frac{j_p(\xi) d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_p^2}}, \quad (1)$$

где r_p – расстояние от рассматриваемой точки до тяговой рельсовой сети, км;

l – длина участка тяговой рельсовой сети, км.

Потенциал точки земли с координатами (x, y, z) , обусловленный токами утечки с изолированного подземного проводника, рассчитывается по формуле [4]:

$$f_c(x, j_c(\xi), r_c, r_o) = \frac{\rho}{4\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{j_c(\xi) d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_c^2}} + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{j_c(\xi) d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_o^2}} \right), \quad (2)$$

где $j_c(\xi)$ – распределение плотности токов утечки с изолированного подземного проводника, А/км;

r_c – расстояние от рассматриваемой точки до изолированного подземного проводника, км;

r_o – расстояние от рассматриваемой точки до отражения изолированного подземного проводника, км.

Потенциал точки земли, обусловленный токами утечки с ЗУ, определяется следующим образом [2]:

$$f_{3y}(x, r_{3y}) = -\frac{\rho I_{3y}}{2\pi \sqrt{(x-x_{3y})^2 + r_{3y}^2}}, \quad (3)$$

где I_{3y} – тока ЗУ, А;

r_{3y} – расстояние от рассматриваемой точки до ЗУ, км;

x_{3y} – координата центра полусферического ЗУ, км.

Полный потенциал сооружения формируется путем наложения потенциалов, обусловленных собственным током сооружения и токами, стекающими с соседних сооружений. Запишем систему полных потенциалов для системы «тяговая рельсовая сеть – заземляющее устройство – два изолированных подземных проводника» с учетом падения напряжения на изоляции:

$$\begin{cases} \varphi_p(x) = f_p(x, a_p) + f_c(x, j_{c1}(\xi), r_{pc1}, r_{pc1}) + f_c(x, j_{c2}(\xi), r_{pc2}, r_{pc2}) + \\ + f_{3y}(x, y_{3y}) + R_{\Pi}^p j_p(x); \\ \varphi_{c1}(x) = f_p(x, r_{pc1}) + f_c(x, j_{c1}(\xi), a_{c1}, 2h_{c1}) + f_c(x, j_{c2}(\xi), r_{c1c2}, r_{c1c2o}) + \\ + f_{3y}(x, r_{3yc1}) + R_{\Pi}^{c1} j_{c1}(x); \\ \varphi_{c2}(x) = f_p(x, r_{pc2}) + f_c(x, j_{c2}(\xi), a_{c2}, 2h_{c2}) + f_c(x, j_{c1}(\xi), r_{c1c2}, r_{c1c2o}) + \\ + f_{3y}(x, r_{3yc2}) + R_{\Pi}^{c2} j_{c2}(x); \\ \varphi_{3y} = f_p(x_{3y}, y_{3y}) + f_c(x_{3y}, j_{c1}(\xi), r_{3yc1}, r_{3yc1}) + f_c(x_{3y}, j_{c2}(\xi), r_{3yc2}, r_{3yc2}), \end{cases} \quad (4)$$

где a_p, a_{c1}, a_{c2} – эквивалентные радиусы тяговой рельсовой сети, первого и второго изолированных подземных проводников соответственно, км;

$R_{\text{и}}^{\text{p}}, R_{\text{и}}^{\text{c1}}, R_{\text{и}}^{\text{c2}}$ – сопротивления изоляции тяговой рельсовой сети, первого и второго изолированных подземных проводников соответственно, Ом·км;

r_{pc1} – расстояние от тяговой рельсовой сети до первого изолированного подземного проводника, км;

r_{pc2} – расстояние от тяговой рельсовой сети до второго изолированного подземного проводника, км;

r_{c1c2} – расстояние между изолированными подземными проводниками, км;

r_{c1c2o} – расстояние от одного изолированного подземного проводника до отражения другого изолированного подземного проводника, км;

$r_{\text{3yc1}}, r_{\text{3yc2}}$ – расстояние от ЗУ до первого и второго изолированных подземных проводников соответственно, км.

В статье [5] было показано, что влиянием двух подземных сооружений на тяговую рельсовую сеть можно пренебречь. Принимая во внимание, что изменение потенциала сооружения $d\phi(x)$ на элементарном участке dx обусловлено падением напряжения на продольном сопротивлении, и заменяя плотность токов утечки $j(x)$ изменением тока $dI(x)$ на элементарном участке dx , запишем систему (4) в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left(-f_{\text{p}}(x, r_{\text{pc1}}) + f_{\text{c}}(x, \frac{d}{d\xi} I_{\text{c1}}(\xi), a_{\text{c1}}, 2h_{\text{c1}}) + f_{\text{c}}(x, \frac{d}{d\xi} I_{\text{c2}}(\xi), r_{\text{c1c2}}, r_{\text{c1c2o}}) - \right. \\ \left. - f_{\text{3y}}(x, r_{\text{3yc1}}) \right) + R_{\text{и}}^{\text{c1}} \frac{d^2}{dx^2} I_{\text{c1}}(x) - R_{\text{c1}} I_{\text{c1}}(x) = 0; \\ \frac{d}{dx} \left(-f_{\text{p}}(x, r_{\text{pc2}}) + f_{\text{c}}(x, \frac{d}{d\xi} I_{\text{c2}}(\xi), a_{\text{c2}}, 2h_{\text{c2}}) + f_{\text{c}}(x, \frac{d}{d\xi} I_{\text{c1}}(\xi), r_{\text{c1c2}}, r_{\text{c1c2o}}) - \right. \\ \left. - f_{\text{3y}}(x, r_{\text{3yc2}}) \right) + R_{\text{и}}^{\text{c2}} \frac{d^2}{dx^2} I_{\text{c2}}(x) - R_{\text{c2}} I_{\text{c2}}(x) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $R_{\text{c1}}, R_{\text{c2}}$ – продольные сопротивления первого и второго изолированных подземных проводников соответственно, Ом/км.

Решим данную систему интегродифференциальных уравнений методом интегральных преобразований. В качестве ядра интегрального преобразования выберем ядро Хартли. Преобразование Хартли в отличие от широко применяемого преобразования Фурье позволяет осуществлять интегральные преобразования только в вещественной области и обладает симметрией [6], что значительно ускоряет расчет при программной реализации.

Обозначим образ функции тока $I(x)$ [6],

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \text{cas}(\omega x) dx, \quad (6)$$

где ω – переменная интегрирования, 1/км;

$\text{cas}(\omega x)$ – ядро преобразования Хартли [6],

$$\text{cas}(\omega x) = \cos(\omega x) + \sin(\omega x). \quad (7)$$

Воспользовавшись теоремой преобразования производной [6], получим:

$$\left\{ \begin{aligned} & \omega f_p(x, r_{pc1}) \int_{-\infty}^{\infty} \text{cas}(-\omega x) dx + \omega^2 f_c(x, I_{c1}(\xi), a_{c1}, 2h_{c1}) \int_{-\infty}^{\infty} \text{cas}(\omega x) dx + \\ & + \omega f_{3y}(x, r_{3yc1}) \int_{-\infty}^{\infty} \text{cas}(-\omega x) dx + \omega^2 f_c(x, I_{c2}(\xi), r_{c1c2}, r_{c1c2o}) \int_{-\infty}^{\infty} \text{cas}(\omega x) dx + \\ & + \omega^2 R_{\Pi}^{c1} I_{c1}(\omega) + R_{c1} I_{c1}(\omega) = 0; \\ & \omega f_p(x, r_{pc2}) \int_{-\infty}^{\infty} \text{cas}(-\omega x) dx + \omega^2 f_c(x, I_{c2}(\xi), a_{c2}, 2h_{c2}) \int_{-\infty}^{\infty} \text{cas}(\omega x) dx + \\ & + \omega f_{3y}(x, r_{3yc2}) \int_{-\infty}^{\infty} \text{cas}(-\omega x) dx + \omega^2 f_c(x, I_{c1}(\xi), r_{c1c2}, r_{c1c2o}) \int_{-\infty}^{\infty} \text{cas}(\omega x) dx + \\ & + \omega^2 R_{\Pi}^{c2} I_{c2}(\omega) + R_{c2} I_{c2}(\omega) = 0, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где $\text{cas}(-\omega x)$ – выражение следующего вида:

$$\text{cas}(-\omega x) = \cos(\omega x) - \sin(\omega x). \quad (9)$$

Обозначив образ функции плотности токов утечки с тяговой рельсовой сети

$$j_p(\omega) = \int_0^l j_p(\xi) \text{cas}(-\omega \xi) d\xi, \quad (10)$$

и учитывая свойство преобразования Хартли в случае бесконечных пределов [7], запишем:

$$\left\{ \begin{aligned} & R_{c1} I_{c1}(\omega) + \frac{\rho}{2\pi} \omega \left(2K_0(|\omega| r_{pc1}) j_p(\omega) + \omega \left(K_0(|\omega| a_{c1}) + K_0(|\omega| 2h_{c1}) \right) I_{c1}(\omega) + \right. \\ & + \omega \left(K_0(|\omega| r_{c1c2}) + K_0(|\omega| r_{c1c2o}) \right) I_{c2}(\omega) - 2K_0(|\omega| r_{3yc1}) I_{3y} \left. \right) + \omega^2 R_{\Pi}^{c1} I_{c1}(\omega) = 0; \\ & R_{c2} I_{c2}(\omega) + \frac{\rho}{2\pi} \omega \left(2K_0(|\omega| r_{pc2}) j_p(\omega) + \omega \left(K_0(|\omega| a_{c2}) + K_0(|\omega| 2h_{c2}) \right) I_{c2}(\omega) + \right. \\ & + \omega \left(K_0(|\omega| r_{c1c2}) + K_0(|\omega| r_{c1c2o}) \right) I_{c1}(\omega) - 2K_0(|\omega| r_{3yc2}) I_{3y} \left. \right) + \omega^2 R_{\Pi}^{c2} I_{c2}(\omega) = 0, \end{aligned} \right. \quad (11)$$

где K_0 – функция Макдональда нулевого порядка.

Обозначим переходные сопротивления изолированных подземных проводников, Ом·км:

$$R_{\Pi}^{c1}(\omega) = R_{\Pi}^{c1} + \frac{\rho}{2\pi} \left(K_0(|\omega| a_{c1}) + K_0(|\omega| 2h_{c1}) \right); \quad (12)$$

$$R_{\Pi}^{c2}(\omega) = R_{\Pi}^{c2} + \frac{\rho}{2\pi} \left(K_0(|\omega| a_{c2}) + K_0(|\omega| 2h_{c2}) \right). \quad (13)$$

Аналогичным образом обозначим взаимные сопротивления, Ом·км: между изолированными подземными проводниками –

$$R_{c1c2}(\omega) = \frac{\rho}{2\pi} \left(K_0(|\omega| r_{c1c2}) + K_0(|\omega| r_{c1c2o}) \right); \quad (14)$$

между изолированными подземными проводниками и тяговой рельсовой сетью –

$$R_{c1p}(\omega) = \frac{\rho}{\pi} K_0(|\omega| r_{pc1}); \quad (15)$$

$$R_{c2p}(\omega) = \frac{\rho}{\pi} K_0(|\omega| r_{pc2}), \quad (16)$$

между изолированными подземными проводниками и ЗУ –

$$R_{c13y}(\omega) = \frac{\rho}{\pi} K_0(|\omega| r_{3yc1}); \quad (17)$$

$$R_{c23y}(\omega) = \frac{\rho}{\pi} K_0(|\omega| r_{3yc2}). \quad (18)$$

Перепишем систему (11) с учетом введенных обозначений:

$$\begin{cases} \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right) I_{c1}(\omega) + \frac{\omega^2 R_{c1c2}(\omega) I_{c2}(\omega)}{R_n^{c1}(\omega)} = \frac{-\omega R_{c1p}(\omega) j_p(\omega)}{R_n^{c1}(\omega)} + \frac{\omega R_{c13y}(\omega) I_{3y}}{R_n^{c1}(\omega)}; \\ \frac{\omega^2 R_{c1c2}(\omega) I_{c1}(\omega)}{R_n^{c2}(\omega)} + \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right) I_{c2}(\omega) = \frac{-\omega R_{c2p}(\omega) j_p(\omega)}{R_n^{c2}(\omega)} + \frac{\omega R_{c23y}(\omega) I_{3y}}{R_n^{c2}(\omega)}. \end{cases} \quad (19)$$

Решив данную систему методом Крамера, получим следующие образы токов изолированных подземных проводников:

$$\begin{aligned} I_{c1}(\omega) = & \frac{-\omega(R_{c1p}(\omega) j_p(\omega) - R_{c13y}(\omega) I_{3y})}{R_n^{c1}(\omega) \left(\left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right) + \frac{\omega^4 R_{c1c2}^2(\omega)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} \right)} + \\ & + \frac{\omega^3 R_{c1c2}(\omega) (R_{c2p}(\omega) j_p(\omega) - R_{c23y}(\omega) I_{3y})}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right) \left(\left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right) + \frac{\omega^4 R_{c1c2}^2(\omega)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} \right)}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} I_{c2}(\omega) = & \frac{-\omega(R_{c2p}(\omega) j_p(\omega) - R_{c23y}(\omega) I_{3y})}{R_n^{c2}(\omega) \left(\left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right) + \frac{\omega^4 R_{c1c2}^2(\omega)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right)} \right)} + \\ & + \frac{\omega^3 R_{c1c2}(\omega) (R_{c1p}(\omega) j_p(\omega) - R_{c13y}(\omega) I_{3y})}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right) \left(\left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right) + \frac{\omega^4 R_{c1c2}^2(\omega)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right)} \right)}. \end{aligned} \quad (21)$$

При замене в выражениях (20) и (21) слагаемого $\frac{\omega^4 R_{c1c2}^2(\omega)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)}$ в знамена-

теле нулем погрешность расчетов для любых значений аргументов составляет менее 1%, поэтому данным слагаемым можно пренебречь.

Возьмем обратное преобразование Хартли [6]:

$$I(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I(\omega) \text{cas}(\omega x) d\omega. \quad (22)$$

Тогда токи, протекающие в изолированных подземных проводниках, будут такими:

$$I_{c1}(x) = \frac{-1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega R_{c1p}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(\omega x)}{R_n^{c1}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right)} d\omega + \frac{I_{3y}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega R_{c13y}(\omega) \text{cas}(\omega x)}{R_n^{c1}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right)} d\omega +$$

$$+ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^3 R_{c2p}(\omega) R_{c1c2}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(\omega x)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} d\omega + \quad (23)$$

$$+ \frac{-I_{3y}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^3 R_{c23y}(\omega) R_{c1c2}(\omega) \text{cas}(\omega x)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} d\omega;$$

$$I_{c2}(x) = \frac{-1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega R_{c2p}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(\omega x)}{R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} d\omega + \frac{I_{3y}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega R_{c23y}(\omega) \text{cas}(\omega x)}{R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} d\omega +$$

$$+ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^3 R_{c1p}(\omega) R_{c1c2}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(\omega x)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} d\omega + \quad (24)$$

$$+ \frac{-I_{3y}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^3 R_{c13y}(\omega) R_{c1c2}(\omega) \text{cas}(\omega x)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} d\omega.$$

В полученных выражениях (23) и (24) полное распределение тока в изолированном подземном проводнике состоит из четырех слагаемых. Первое слагаемое представляет собой ток в изолированном подземном проводнике, обусловленный токами утечки с тяговой рельсовой сети. Значение данного слагаемого зависит от переходного сопротивления изолированного подземного проводника и взаимного сопротивления между изолированным подземным проводником и тяговой рельсовой сетью. Второе слагаемое представляет собой ток в изолированном подземном проводнике, обусловленный токами утечки с ЗУ, и зависит от переходного сопротивления изолированного подземного проводника и взаимного сопротивления между изолированным подземным проводником и ЗУ. Третье и четвертое слагаемые представляют собой токи, обусловленные токами утечки с соседнего изолированного подземного проводника. Величины третьего и четвертого слагаемых зависят от переходного сопротивления данного и соседнего изолированного подземного проводника, взаимного сопротивления между изолированными подземными проводниками, взаимного сопротивления между соседним изолированным

подземным проводником и тяговой рельсовой сетью для третьего слагаемого и ЗУ – для четвертого.

Первое слагаемое всегда больше остальных, поскольку взаимное сопротивление между изолированным подземным проводником и тяговой рельсовой сетью меньше, чем между изолированными подземными проводниками, а значение токов, стекающих с тяговой рельсовой сети, больше, чем значение токов, стекающих с соседнего изолированного подземного проводника и натекающих на ЗУ. Величина первого слагаемого составляет порядка 70 – 90 % от тока $I_c(x)$. В свою очередь значение четвертого слагаемого не превышает 2 % от тока $I_c(x)$ для всех значений переходных сопротивлений изолированных подземных проводников, и им можно пренебречь.

Применив закон Ома к соотношениям (23) и (24), получим распределение потенциалов в изолированных подземных проводниках:

$$\begin{aligned} \varphi_{c1}(x) = -R_{c1} \int I_{c1}(x) dx = & \frac{-R_{c1}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{c1p}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(-\omega x)}{R_{\Pi}^{c1}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_{\Pi}^{c1}(\omega)} \right)} d\omega + \\ & + \frac{R_{c1} I_{3y}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{c13y}(\omega) \text{cas}(-\omega x)}{R_{\Pi}^{c1}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_{\Pi}^{c1}(\omega)} \right)} d\omega + \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{R_{c1}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2 R_{c2p}(\omega) R_{c1c2}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(-\omega x)}{R_{\Pi}^{c1}(\omega) R_{\Pi}^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_{\Pi}^{c1}(\omega)} \right) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_{\Pi}^{c2}(\omega)} \right)} d\omega; \\ \varphi_{c2}(x) = -R_{c2} \int I_{c2}(x) dx = & \frac{-R_{c2}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{c2p}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(-\omega x)}{R_{\Pi}^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_{\Pi}^{c2}(\omega)} \right)} d\omega + \\ & + \frac{R_{c2} I_{3y}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{c23y}(\omega) \text{cas}(-\omega x)}{R_{\Pi}^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_{\Pi}^{c2}(\omega)} \right)} d\omega + \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{R_{c2}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2 R_{c1p}(\omega) R_{c1c2}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(-\omega x)}{R_{\Pi}^{c1}(\omega) R_{\Pi}^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_{\Pi}^{c1}(\omega)} \right) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_{\Pi}^{c2}(\omega)} \right)} d\omega. \end{aligned}$$

Распределение плотности токов утечки с изолированных подземных проводников определим как производную тока:

$$\begin{aligned} j_{c1}(x) = -\frac{dI_{c1}(x)}{dx} = & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2 R_{c1p}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(-\omega x)}{R_{\Pi}^{c1}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_{\Pi}^{c1}(\omega)} \right)} d\omega + \\ & + \frac{-I_{3y}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2 R_{c13y}(\omega) \text{cas}(-\omega x)}{R_{\Pi}^{c1}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_{\Pi}^{c1}(\omega)} \right)} d\omega + \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{-1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^4 R_{c2p}(\omega) R_{c1c2}(\omega) j_p(\omega) \text{cas}(-\omega x)}{R_{\Pi}^{c1}(\omega) R_{\Pi}^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_{\Pi}^{c1}(\omega)} \right) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_{\Pi}^{c2}(\omega)} \right)} d\omega; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 j_{c2}(x) = & -\frac{dI_{c2}(x)}{dx} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2 R_{c2p}(\omega) j_p(\omega) \operatorname{cas}(-\omega x)}{R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} d\omega + \\
 & + \frac{-I_{3y}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2 R_{c23y}(\omega) \operatorname{cas}(-\omega x)}{R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} d\omega + \\
 & + \frac{-1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^4 R_{c1p}(\omega) R_{c1c2}(\omega) j_p(\omega) \operatorname{cas}(-\omega x)}{R_n^{c1}(\omega) R_n^{c2}(\omega) \left(\omega^2 + \frac{R_{c1}}{R_n^{c1}(\omega)} \right) \left(\omega^2 + \frac{R_{c2}}{R_n^{c2}(\omega)} \right)} d\omega.
 \end{aligned} \quad (28)$$

В выражениях (25) – (28) первое слагаемое также обусловлено токами утечки с тяговой рельсовой сети, второе слагаемое – токами утечки с ЗУ, а третье слагаемое – токами утечки с соседнего изолированного подземного проводника.

Распределение плотности токов утечки с тяговой рельсовой сети, входящей в выражения (23) – (28), можно определить по известным формулам [4] для различного количества нагрузок. Так, распределение плотности токов утечки с тяговой рельсовой сети на участке от 0 до l при одной нагрузке с координатой x_0 и током нагрузки I_n определяется так [4]:

$$j_p^1(x, x_0, I_n) = \begin{cases} \frac{I_n \alpha_p \cosh(\alpha_p(l - x_0)) \cosh(\alpha_p x)}{\sinh(\alpha_p l)} & \text{при } 0 < x < x_0; \\ \frac{I_n \alpha_p \cosh(\alpha_p x_0) \cosh(\alpha_p(l - x))}{\sinh(\alpha_p l)} & \text{при } x_0 < x < l, \end{cases} \quad (29)$$

где α_p – коэффициент утечки токов с тяговой рельсовой сети, 1/км,

$$\alpha_p = \sqrt{\frac{R_p}{R_n^p}}, \quad (30)$$

где R_p – продольное сопротивление тяговой рельсовой сети, Ом/км;

R_n^p – переходное сопротивление тяговой рельсовой сети, Ом·км [4],

$$R_n^p = R_n^p + \frac{\rho}{\pi} \lg \left(\frac{1}{\alpha_p a_p} \right). \quad (31)$$

Распределение потенциалов в тяговой рельсовой сети на том же участке определяется так [4]:

$$\varphi_p^1(x, x_0, I_n) = \begin{cases} \frac{I_n R_p \cosh(\alpha_p(l - x_0)) \cosh(\alpha_p x)}{\alpha_p \sinh(\alpha_p l)} & \text{при } 0 < x < x_0; \\ \frac{I_n R_p \cosh(\alpha_p x_0) \cosh(\alpha_p(l - x))}{\alpha_p \sinh(\alpha_p l)} & \text{при } x_0 < x < l. \end{cases} \quad (32)$$

$$I_p^1(x, x_0, I_H) = \begin{cases} \frac{I_H \cosh(\alpha_p(l-x_0)) \sinh(\alpha_p x)}{\sinh(\alpha_p l)} & \text{при } 0 < x < x_0; \\ \frac{-I_H \cosh(\alpha_p x_0) \sinh(\alpha_p(l-x))}{\sinh(\alpha_p l)} & \text{при } x_0 < x < l. \end{cases} \quad (33)$$

Подключение ЗУ к тяговой рельсовой сети влияет на распределение электрических параметров в ней. С одной стороны, влияет ток, вытекающий из заземлителя как дополнительный внешний источник, с другой стороны, влияет ток, втекающий в тяговую рельсовую сеть.

Рассмотрим распределение плотности токов утечки с тяговой рельсовой сети под влиянием тока, вытекающего из ЗУ, по уже полученным формулам (25) – (28):

$$j_p^{3y}(x) = \frac{-I_{3y}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2 R_{p3y}(\omega) \cos(-\omega x)}{R_p \left(\omega^2 + \frac{R_p}{R_n} \right)} d\omega, \quad (34)$$

где $R_{p3y}(\omega)$ – взаимное сопротивление между тяговой рельсовой сетью и ЗУ, Ом·км,

$$R_{p3y}(\omega) = \frac{P}{\pi} K_0(|\omega| y_{3y}). \quad (35)$$

Распределение плотности токов утечки с тяговой рельсовой сети под влиянием тока, втекающего в тяговую рельсовую сеть по дренажному проводу, можно определить как тяговую нагрузку по формулам (29), (32), (33) с током нагрузки, равным току ЗУ: $I_H = I_{3y}$.

Таким образом, распределение плотности токов утечки с тяговой рельсовой сети, входящее в формулы (25) – (28), рассчитывается как сумма плотностей токов утечек от n тяговых нагрузок и m ЗУ:

$$j_p(x) = \sum_{i=1}^{i=n} j_p^1(x, x_i, I_{Hi}) + \sum_{k=1}^{k=m} (j_p^{3y}(x) + j_p^1(x, x_{3yk}, I_{3yk})). \quad (36)$$

Распределение потенциалов в тяговой рельсовой сети определяется как сумма потенциалов, обусловленных n тяговыми нагрузками и m ЗУ:

$$\varphi_p(x) = \sum_{i=1}^{i=n} \varphi_p^1(x, x_i, I_{Hi}) + \sum_{k=1}^{k=m} (\varphi_p^{3y}(x) + \varphi_p^1(x, x_{3yk}, I_{3yk})). \quad (37)$$

Ток I_{3y} , протекающий в дренажном проводе между ЗУ и тяговой рельсовой сетью, может быть определен в следующем виде, А [4]:

$$I_{3y} = \frac{\varphi_{3y} - \varphi_p(x_{3y})}{R_k + R_{bx}}, \quad (38)$$

где R_k – сопротивление дренажного кабеля, Ом [8],

$$R_k = \frac{\rho_k l_k}{S_k}, \quad (39)$$

где ρ_k – удельное сопротивление дренажного кабеля, Ом·м;

l_k – длина дренажного кабеля, м;

S_k – площадь поперечного сечения дренажного кабеля, м²;

R_{bx} – входное сопротивление системы «тяговая рельсовая сеть – ЗУ», Ом,

$$R_{bx} = R_{3y} + \frac{1}{2} \sqrt{R_p R_n}, \quad (40)$$

где R_{3y} – сопротивление полусферического ЗУ, Ом [2],

$$R_{3y} = \frac{\rho}{2\pi r_{3y}}. \quad (41)$$

Таким образом, ток ЗУ I_{3y} в системе «тяговая рельсовая сеть – заземляющее устройство – два изолированных подземных проводника» можно найти методом последовательных приближений из следующего трансцендентного уравнения:

$$(R_k + R_{вх}) I_{3y} + \Phi_p(x_{3y}) = f_p(x_{3y}, y_{3y}) + f_c(x_{3y}, j_{c1}(\xi), r_{3yc1}, r_{3yc1}) + f_c(x_{3y}, j_{c2}(\xi), r_{3yc2}, r_{3yc2}). \quad (42)$$

Причем в формулы для расчета распределения плотности токов утечки с изолированных подземных проводников $j_{c1}(\xi)$ и $j_{c2}(\xi)$ подставляется образ плотности токов утечки с тяговой рельсовой сети, рассчитанной по формуле (36). Потенциал тяговой рельсовой сети в точке подключения ЗУ $\Phi_p(x_{3y})$ определяется по формуле (37).

Рассмотрим распределение электрических величин в системе «тяговая рельсовая сеть – заземляющее устройство – два изолированных подземных проводника», когда к двухпутному участку железной дороги длиной $l = 20$ км с коэффициентом утечки токов $\alpha_p = 0,059$ 1/км подключены две сосредоточенные нагрузки с током нагрузки $I_n = 1000$ А, как показано на рисунке 2. Параллельно участку тяговой рельсовой сети в однородной земле с удельным сопротивлением $\rho = 50$ Ом·м в качестве изолированных подземных проводников расположены два трубопровода на расстоянии $r_{pc1} = 50$ м и $r_{pc2} = 70$ м. Сопротивление изоляции первого трубопровода составляет $R_n^{c1} = 711$ Ом·м, сопротивление изоляции второго трубопровода – $R_n^{c2} = 319$ Ом·м. Значение сопротивления изоляции трубопроводов принято для полимерного покрытия на основе термореактивных смол после 50 и 60 лет эксплуатации соответственно [9]. Продольное сопротивление трубопроводов составляет $R_{c1} = R_{c2} = 0,012$ Ом/км, что соответствует трубопроводу с наружным диаметром 0,82 м и толщиной стенки 8 мм [10]. На расстоянии $y_{3y} = 10$ м от тяговой рельсовой сети в точке $x_{3y} = 0$ км расположен центр полусферического ЗУ с радиусом $r_{3y} = 10$ м, подключенного к тяговой подстанции дренажным кабелем с сопротивлением $R_k = 0,001$ Ом. По расчету методом последовательных приближений величина тока I_{3y} составляет 68,91 А.

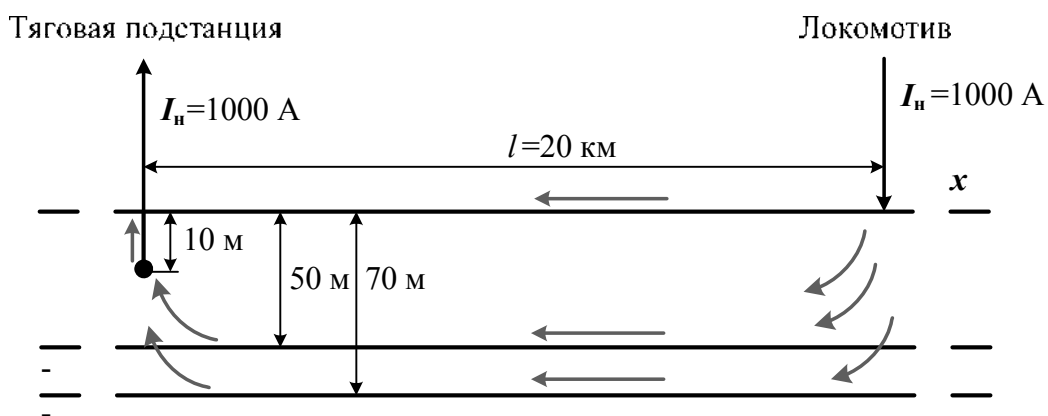


Рисунок 2 – Участок тяговой рельсовой сети с двумя сосредоточенными нагрузками

На рисунке 3 представлены графики распределения токов в первом трубопроводе для данного случая. Как видно из графиков, наличие соседних подземных сооружений оказывает значительное влияние на величину тока в трубопроводе, при этом ЗУ влияет на форму распределения токов в трубопроводе. Распределение токов во втором трубопроводе аналогично.

При наличии ЗУ место стекания тока с трубопровода сдвигается в сторону ЗУ. Для данного случая величина тока в трубопроводах с учетом ЗУ и соседнего трубопровода изменяется в среднем на 19,1 %.

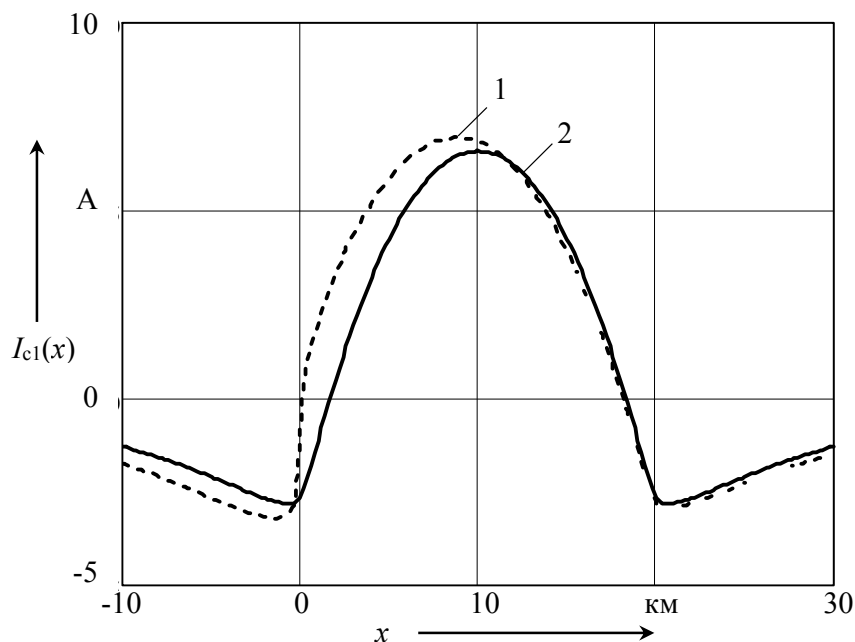


Рисунок 3 – Графики распределения токов в первом трубопроводе: 1 – ток в трубопроводе с учетом влияния соседних подземных сооружений; 2 – ток в трубопроводе без учета влияния соседних подземных сооружений

На рисунке 4 приведены графики распределения потенциалов первого трубопровода для рассматриваемого случая. Распределение потенциалов второго трубопровода аналогично. Как видно из графиков, в месте подключения ЗУ к тяговой подстанции потенциал трубопровода смещается в положительную сторону. Для данного случая абсолютное значение потенциалов трубопроводов изменяется на 24,2 %.

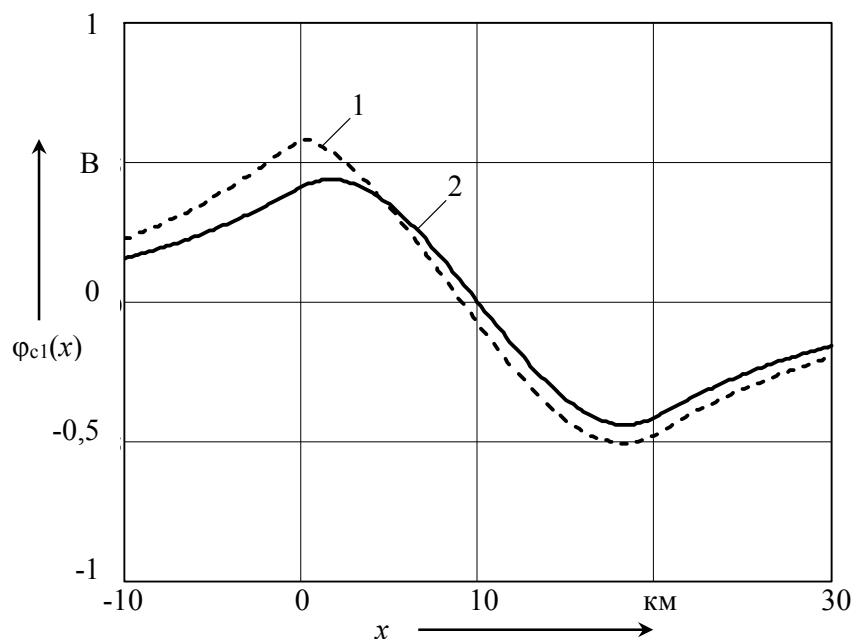


Рисунок 4 – Графики распределения потенциалов первого трубопровода: 1 – распределение потенциалов трубопровода с учетом влияния соседних подземных сооружений; 2 – распределение потенциалов трубопровода без учета влияния соседних подземных сооружений

На рисунке 5 приведены графики распределения плотности токов утечки с первого трубопровода для рассматриваемого случая.

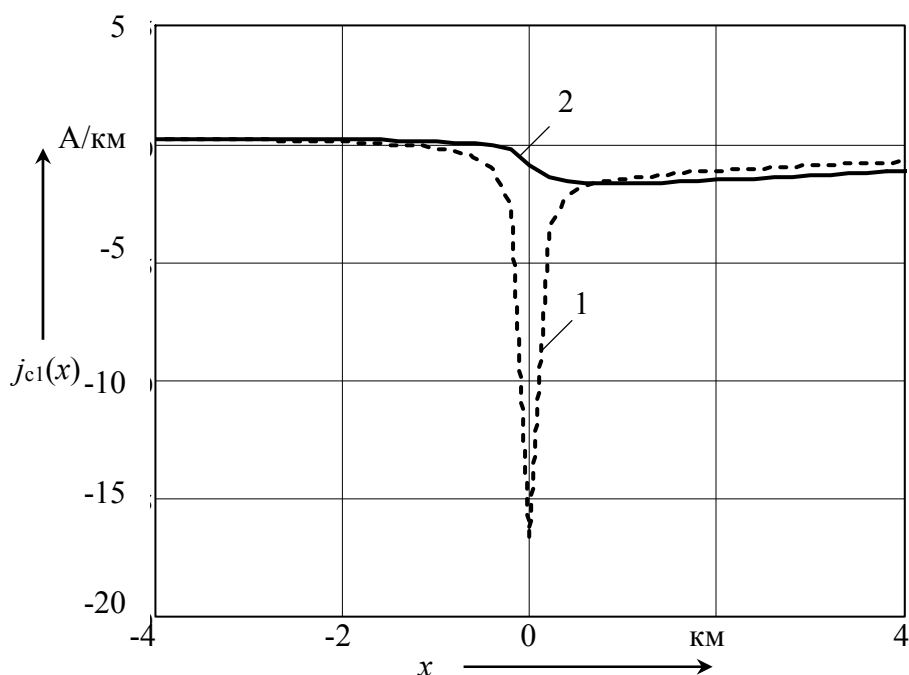


Рисунок 5 – Графики распределения плотности токов утечки с первого трубопровода:
1 – распределение плотности токов утечки с трубопровода с учетом влияния соседних подземных сооружений; 2 – распределение плотности токов утечки с трубопровода без учета влияния соседних подземных сооружений

Распределение плотности токов утечки со второго трубопровода аналогично. Как видно из графиков, наличие ЗУ значительно влияет на величину и форму плотности токов утечки с трубопровода. В месте подключения ЗУ к тяговой подстанции плотность токов утечки с трубопровода резко возрастает, что приводит к его коррозионным разрушениям в данной зоне. Для данного случая абсолютное значение плотности токов утечки с трубопроводов изменяется приблизительно на 35,2 %.

На основании изложенного можно сделать вывод: получены аналитические выражения для расчета распределения тока, потенциалов и плотности токов утечки в системе «тяговая рельсовая сеть – заземляющее устройство – два изолированных подземных проводника» с использованием преобразования Хартли. Преобразование Хартли в отличие от преобразования Фурье позволяет осуществлять интегральные преобразования только в вещественной области и обладает симметрией, что значительно ускоряет расчет при программной реализации. Расчеты показали, что наибольший вклад в распределение электрических величин в изолированном подземном проводнике вносит слагаемое, обусловленное токами утечки с тяговой рельсовой сети. Влияние ЗУ и соседнего изолированного подземного проводника составляет 10 – 30 % от общей его величины.

В месте расположения тяговой подстанции и ЗУ на изолированном подземном проводнике возникает опасная зона стекания тока, наличие которой приводит к повреждению изоляции и коррозионным разрушениям. Следовательно, в данной зоне необходимо предусмотреть средства защиты.

Список литературы

1. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст]: Монография / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2013. – 552 с.

2. Марголин, Н. Ф. Токи в земле [Текст] / Н. Ф. Марголин. – М: Государственное энергетическое издательство, 1947. – 195 с.
3. Оллендорф, Ф. Токи в земле. Теория заземлений [Текст] / Ф. Оллендорф; Пер. с нем. М. М. Савостюк, под ред. Е. В. Нитусова / ГНТИ. – Л., 1932. – 214 с.
4. Стрижевский, И. В. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами [Текст] / И. В. Стрижевский. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. – 240 с.
5. Авдеева, К. В. Оценка обратного влияния двух подземных сооружений на ток утечки с рельсов электрифицированного железнодорожного транспорта постоянного тока [Текст] / К. В. Авдеева, А. В. Уткина // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 6 – 13.
6. Брейсуэлл, Р. Преобразование Хартли [Текст] / Р. Брейсуэлл. – М.: Мир, 1990. – 175 с.
7. Bouzeffour F. The generalized Hartley transform. *Integral Transforms and Special Functions*. 2014. no. 25. pp. 230 – 239.
8. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1964. – 650 с.
9. СТО Газпром 9.2-003-2009. Защита от коррозии. Проектирование электрохимической защиты подземных сооружений // Актуализированная редакция СТО Газпром 2-3.5-047-2006. Дата ввода 04.05.2009.
10. Волков, Б. Г. Справочник по защите подземных металлических сооружений от коррозии [Текст] / Б. Г. Волков, Н. И. Тесов, В. В. Шуванов. – Л: Недра, 1975. – 224 с.

References

1. Kotelnikov A. V., Kandaev V. A. *Bluzhdayushchiye toki i ekspluatatsionnyy kontrol' korrozionnogo sostoyaniya podzemnykh sooruzheniy sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* (Stray currents and corrosion monitoring of underground facilities of railway supply systems). Moscow: UMTS ZHDT RUSSIA, 2013, 552 p.
2. Margolin N. F. *Toki v zemle* (Currents in the ground). Moscow: State Energy Publishing House, 1947, 195 p.
3. Ollendorf F. *Toki v zemle. Teoriya zazemleniy* (Currents in the ground. Theory of grounding) Leningrad: GNTI, 1932, 214 p.
4. Strizhevskiy I. V. *Teoriya i raschet drenazhnoy i katodnoy zashchity magistral'nykh truboprovodov ot korrozii bluzhdayushchimi tokami* (Theory and design of drainage and cathode protection of pipelines from stray currents corrosion). Moscow: State scientific-technical publishing house of oil and mountain-fuel literature, 1963, 240 p.
5. Avdeeva K. V., Utkina A. V. Evaluation of the inverse effect of two underground constructions on leakage current from the rails of the DC electrified railway transport [Otsenka obratnogo vliyaniya dvukh podzemnykh sooruzheniy na tok utechki s rel'sov elektrifitsirovannogo zheleznodorozhnogo transporta postoyannogo toka]. *Materialy vtoroy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Povysheniye energeticheskoy effektivnosti nazemnykh transportnykh system»* (Abstracts of second international scientific practical conference «Increasing the energy efficiency of transport systems»). Omsk, 2016, pp. 6 – 13.
6. Bracewell R. *Preobrazovaniye Kharlti* (Hartley Transform) Moscow: Mir, 1990, 175 p.
7. Bouzeffour F. The generalized Hartley transform, *Integral Transforms and Special Functions*, 2014, no. 25, pp. 230 – 239.
8. Bessonov L. A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering). Moscow: Vysshaya shkola, 1964, 650 p.

9. *Zashchita ot korrozii. Proyektirovaniye elektrokhimicheskoy zashchity podzemnykh sooruzheniy, STO Gazprom 9.2-003-2009* (Corrosion protection. Design of electrochemical protection of underground constructions). Moscow, 2009.

10. Volkov B. G., Tesov N. I., Shuvanov V. V. *Spravochnik po zashchite podzemnykh metallicheskikh sooruzheniy ot korrozii* (Handbook on the underground metal structures corrosion protection). Leningrad: Nedra, 1975, 224 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кандаев Василий Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812)31-06-94.

Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812)31-06-94.

Уткина Анастасия Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел: 8-908-800-32-75.

E-mail: a.utkina.e@gmail.com.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кандаев, В. А. Определение электрических величин в системе проводников в условиях электрифицированного железнодорожного транспорта постоянного тока с применением преобразования Хартли [Текст] / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Уткина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 111 – 125.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kandaev Vasilii Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Telecommunication and radio systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812)31-06-94.

Avdeeva Ksenia Vasilyevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Telecommunication and radio systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812)31-06-94.

Utkina Anastasia Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Telecommunication and radio systems and networks», OSTU.

Phone: 8-908-800-32-75.

E-mail: a.utkina.e@gmail.com.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kandaev V. A., Avdeeva K. V., Utkina A. V. Determination of electrical quantities in the system of conductors under the influence of the dc electrified railway transport using Hartley transform. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 3, no 35, pp. 111 – 125 (In Russian).

Д. Б. Рожицкий¹, М. С. Филаткин¹, А. А. Рыбак²

¹Проектно-конструкторско-техническое бюро по нормированию (ПКТБ Н) – филиал ОАО «РЖД», г. Москва, Российская Федерация;

²Топливо-энергетический центр Восточно-Сибирской железной дороги (НТЭЦ) – филиал ОАО «РЖД», г. Иркутск, Российская Федерация

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРООТОПИТЕЛЬНЫМИ АГРЕГАТАМИ, НЕ ОБОРУДОВАННЫМИ ПРИБОРАМИ УЧЕТА

Аннотация. В статье рассматривается структура потребления топливно-энергетических ресурсов СП ОАО «РЖД», в том числе показана значительная доля этих ресурсов, затрачиваемых на организацию электроотопления (773,7 млн кВт·ч). Отмечено, что до недавнего времени в отчетности ОАО «РЖД» существовало два различных подхода при определении величины фактического объема электрической энергии, израсходованной электроотопительным оборудованием, не оснащенным индивидуальными приборами учета, базирующимися на расчетно-аналитическом и расчетно-статистическом методах. При этом было установлено, что результаты вычислений по обоим методам имеют значительную разницу между собой (до 100 %).

Цель исследования – определение единого подхода, позволяющего максимально точно фиксировать расход электрической энергии в данных условиях. Проанализированы характерные особенности каждого из применяемых методов, проведены сравнительные исследования на ряде объектов четырех железных дорог (Октябрьская, Свердловская, Южно-Уральская, Восточно-Сибирская), характеризующихся различными климатическими характеристиками. Одновременно с этим проводились исследования применимости на практике для нормирования топливно-энергетических ресурсов автоматизированной системы «Стационарная энергетика». По результатам исследований показана величина отклонения фактических расходов электрической энергии от расчетных для обоих применявшихся методов, предложен и подтвержден испытаниями способ определения фактического потребления электрической энергии для нужд отопления на основе предварительного расчета права на расход тепловой энергии с последующим пересчетом в электрическую. Полученные результаты приняты как базовые при актуализации «Методики анализа и планирования расхода электрической энергии на тяговые нужды в ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 22.08.2018 № 1866р, в части определения потребности ресурса на отопление и внесены соответствующие изменения в порядок заполнения данных в корпоративную управленческую отчетность ЭО-10У.

Ключевые слова: топливно-энергетические ресурсы, электрическая энергия, электроотопление, результаты испытаний.

Dmitriy B. Rozhitsky¹, Michael S. Filatkin¹, Alexey A. Rybak²

¹Design and Technical Bureau for rationing (PKTB N) – branch of JSC RZD, Moscow, the Russian Federation

²Fuel and energy centre of East Siberian Railway (NTEC) – regional branch of JSC RZD, Irkutsk, the Russian Federation

ON THE QUESTION OF DETERMINING THE ENERGY CONSUMPTION OF ELECTRIC HEATING UNITS, NOT EQUIPPED WITH METERING DEVICES

Annotation. The article deals with the consumption of fuel and energy resources, including a significant proportion of these resources spent on the organization of electric heating (773.7 million kWh). It was noted that until recently in the reporting of JSC «Russian Railways» there were two different approaches in determining the actual volume of electric energy consumed by electric heating equipment, not equipped with individual metering devices based on the calculation-analytical and calculation-statistical methods. It was found that the results of calculations by both methods have a significant deviation between them (up to 100 %).

The purpose of the study is to determine a unified approach that allows to accurately record the consumption of electric energy in these conditions. The characteristic features of each of the applied methods were analyzed, comparative studies on a number of objects of four Railways (October, Sverdlovsk, South Ural, East Siberian), characterized by different climatic characteristics were carried out. At the same time, studies were carried out on the applicability in practice for the regulation of fuel and energy resources of the automated system «Stationary energy».

According to the research results, the value of the deviation of the actual consumption of electric energy from the calculated for both applied methods is shown. A method for determining the actual consumption of electric energy for heating on the basis of a preliminary calculation of the allowable volume consumption of thermal energy with subsequent conversion into electrical energy is proposed and confirmed by tests. The results obtained were adopted when updating the «Methods of analysis and planning of electricity consumption for non-traction needs in JSC «Russian Railways», approved by the order of JSC «Russian Railways» from 22.08.2018 № 1866p in terms of determining the resource requirements for heating. Based on the results, changes were made to the procedure for filling in the data in the corporate management reporting of EO-10U.

Keywords: fuel and energy resources, electric energy, electric heating, test results.

Железнодорожный транспорт для реализации поставленных перед ним задач потребляет различные виды топливно-энергетических ресурсов (далее – ТЭР): электрическую энергию (далее – ЭЭ), дизельное топливо, топочный мазут, уголь, природный газ, тепловую энергию со стороны и ряд других. Структура потребления ТЭР в компании определяется структурой энергетики железнодорожного транспорта, которая объединяет под общим названием совокупность топливно-энергопотребляющих и энергогенерирующих установок железнодорожного транспорта, а также систем, обеспечивающих их работу.

Эта структура в значительной мере дифференцирована.

В широком смысле энергетику железнодорожного транспорта принято разделять на тяговую и нетяговую [1, 2].

Границы областей, охватываемые этими понятиями, в значительной мере условны.

Тем не менее к тяговой энергетике относят:

энергетические установки электровозов, тепловозов, паровозов, электро- и дизель-поездов, автомотрис, мотовозов, а также систем, непосредственно обеспечивающих их эксплуатацию;

устройства электроснабжения, вспомогательные электрические машины, тяговые трансформаторы, вспомогательные системы дизелей тепловозов (топливная, масляная, водяная, воздухообеспечения), системы охлаждения тяговых генераторов и двигателей, теплообменники этих систем и т. п.

К нетяговой энергетике относятся:

машины и механизмы путевого хозяйства: грузоподъемные машины; механизированный путевой инструмент; машины для ремонта земляного полотна, балластировки и подъёмки пути; машины для сборки, разборки и укладки рельсошпальной решетки и сварки пути; машины для земляных работ; машины для очистки от снега и т. п.;

стационарные и передвижные дизельные и тепловые электростанции;

стационарная теплоэнергетика, которая включает в себя комплексы топливо- и теплообеспечения;

производственно-бытовое электроснабжение (наружное освещение территорий, внутреннее освещение; вентиляция и кондиционирование; электроотопление и калориферы; вычислительная и оргтехника; бытовые электроприборы; электропривод и станки, прессы и молоты, насосы, электротермическое оборудование, подъемно-транспортные механизмы, сварочное и наплавочное оборудование, моечные машины, компрессоры, выпрямители, стенды и лабораторные установки, прочее оборудование) [3, 4].

К нетяговой энергетике относят также ту часть энергетики подвижного состава железных дорог, которая непосредственно не используется для тяги поездов. Это энергосиловые установки рефрижераторных вагонов, системы электро- и теплоснабжения, кондиционирования воздуха в пассажирских вагонах, кабинах машинистов и т. д.

В балансе эксплуатационных расходов ОАО «РЖД» затраты на ТЭР занимают весомую долю (17,7 %). При этом значительная часть из них (81,5 %) расходуется собственно на обеспечение тяги поездов (электротяга и теплотяга), а оставшаяся доля (18,5 %) – нетяговая энергетика (таблица 1).

Таблица 1 – Баланс фактических расходов ТЭР на железнодорожном транспорте в 2017 г.

№ п/п	Виды ТЭР	Единица измерения	В натуральном исчислении	тыс. т у.т.	% в общем потреблении ТЭР
1	Электрическая энергия, всего	млн кВт·ч	48429,9	16224,0	74,2
1.1	на тягу поездов	млн кВт·ч	42672,0	14295,1	65,4
1.2	на нетяговые нужды	млн кВт·ч	5757,9	1928,9	8,8
2	Дизельное топливо, всего	тыс. т	2570,8	3727,7	17,1
2.1	на тягу поездов	тыс. т	2426,8	3518,9	16,1
2.2	нетяговые нужды	тыс. т	144,0	208,8	1,0
3	Сжиженный газ на тягу поездов	тыс. т	1,7	2,8	0,0
4	Котельно-печное топливо, всего	тыс. т у.т.		1459,6	6,7
4.1	уголь	тыс. т	703,5	499,5	2,3
4.2	мазут	тыс. т	288,8	395,7	1,8
4.3	газ природный	млн м куб.	488,8	562,2	2,6
4.4	газ сжиженный (пропан + бутан)	тыс. т	0,7	1,1	0,0
4.5	дрова топливные	тыс. м куб. пл.	4,1	1,1	0,0
5	Бензин автомобильный	тыс. т	34,2	50,9	0,2
6	Тепловая энергия со стороны	млн Гкал	2,3	406,3	1,9
7	Прочие виды топлива	тыс. т у.т.		1,5	0,0
Всего ТЭР на тягу поездов		тыс. т у.т.		17816,8	81,5
Всего ТЭР на нетяговые нужды		тыс. т у.т.		4055,9	18,5
Итого ТЭР по всем видам деятельности		тыс. т у.т.		21872,7	

В 2017 г. прямые затраты на приобретение ТЭР в ОАО «РЖД» составили 260,7 млрд р., в том числе 222,2 млрд р. на тягу поездов и 38,5 млрд р. на нетяговые нужды. Примерно 48 % от объема ТЭР в нетяговой энергетике приходится на потребление ЭЭ.

Значительная величина расходов на приобретение ТЭР делает актуальными задачи планирования потребления (формирование бюджетов производства в целом), а также контроля эффективности их потребления, в том числе по направлениям использования.

Важным инструментом в этих процессах несомненно являются нормы расхода ресурсов.

(«...нормы расхода ТЭР являются расчетной базой инструмента планирования расхода ресурса и инструментом его распределения на всех уровнях управления, при этом под планирование необходимо подвести научную расчетную основу, без которой нельзя эффективно управлять производством») [5].

Данная задача на практике решается путем выполнения расчетов по нормированию как планирования, так и потребления ТЭР. Параллельно идет процесс установки приборов учета ресурсов. Наибольшего эффекта можно достичь, сочетая одновременно оба подхода.

Значительная доля ЭЭ расходуется на организацию электроотопления. По отчету за 2017 г. в ОАО «РЖД» было израсходовано на эти цели 773,7 млн кВт·ч. Применение ЭЭ для отопления имеет ряд неоспоримых преимуществ. Электродогреватели просты в эксплуатации, как правило, автоматизированы или могут быть автоматизированы, т. е. минимизированы требования к численности обслуживающего персонала, надежны, удобны и обычно не требуют отдельного помещения. К недостаткам, конечно, в первую очередь можно отнести высокую стоимость ЭЭ по сравнению с другими традиционными энергоносителями, особенно по сравнению с углем или природным газом, к тому же не всегда на конкретном объекте есть «свободный» лимит ЭЭ.

По состоянию на 01.01.2018 в структурных подразделениях регионального уровня на всей сети железных дорог эксплуатируется более 3500 отопительных агрегатов, обеспечивающих как электроотопление, так и нужды горячего водоснабжения.

Практически на всех объектах отсутствует индивидуальный приборный учет расхода ЭЭ на электроотопительные агрегаты. Как правило, измерительный прибор устанавливается на «входе» в помещение и учитывает также расход ресурса на освещение, привод различных установок, работу офисной техники и на коммунальные нужды (кондиционирование, бытовые приборы и т. п.). Однако это не освобождает от организации работы по планированию потребности ЭЭ в том числе на отопление и отчета о ее потреблении.

До недавнего времени отчет о фактическом расходе электрической энергии на нужды отопления в ОАО «РЖД» регламентировался двумя документами – [6] и [7]. Оба документа предполагают в первую очередь использование показаний индивидуального прибора учета ЭЭ, а при его отсутствии – расчетного способа. При таком подходе предполагается рассчитать право расхода ЭЭ, которое при соблюдении правил эксплуатации оборудования должно быть максимально приближено к величине фактического потребления ($\pm 5\%$) и с учетом значительного количества объектов в целом должно формировать суммарно по всей совокупности достаточно объективную картину.

Для осуществления субъективного сравнения применяют различные методы, к наиболее употребительным из которых относятся ранжирование, парное сравнение, множественные сравнения, непосредственная оценка, последовательное сравнение (метод Черчмена – Акофа), метод фон Неймана – Моргенштерна [8].

При заданных объемах исследований было принято решение проводить сравнение методом непосредственной оценки.

Согласно отчетности ЭО-10У [6] в методологию определения величины расхода ЭЭ положен расчетно-статистический метод. На основе эмпирической формулы с одной переменной (температура атмосферного воздуха) и рядом коэффициентов, отражающих энерговооруженность объекта и степень загрузки оборудования, сформирована таблица соответствия, по которой и рассчитывается расход ЭЭ. Полученный результат приравнивают к фактическому расходу на отопление.

По отчетности ТВО-1 [7] необходимо, опять же при отсутствии индивидуального прибора учета, сначала расчетно-аналитическим способом определить величину права потребления тепловой энергии при фактических условиях эксплуатации на основе утвержденной методики [9] с последующим переводом из единиц теплоты в единицы электрической энергии.

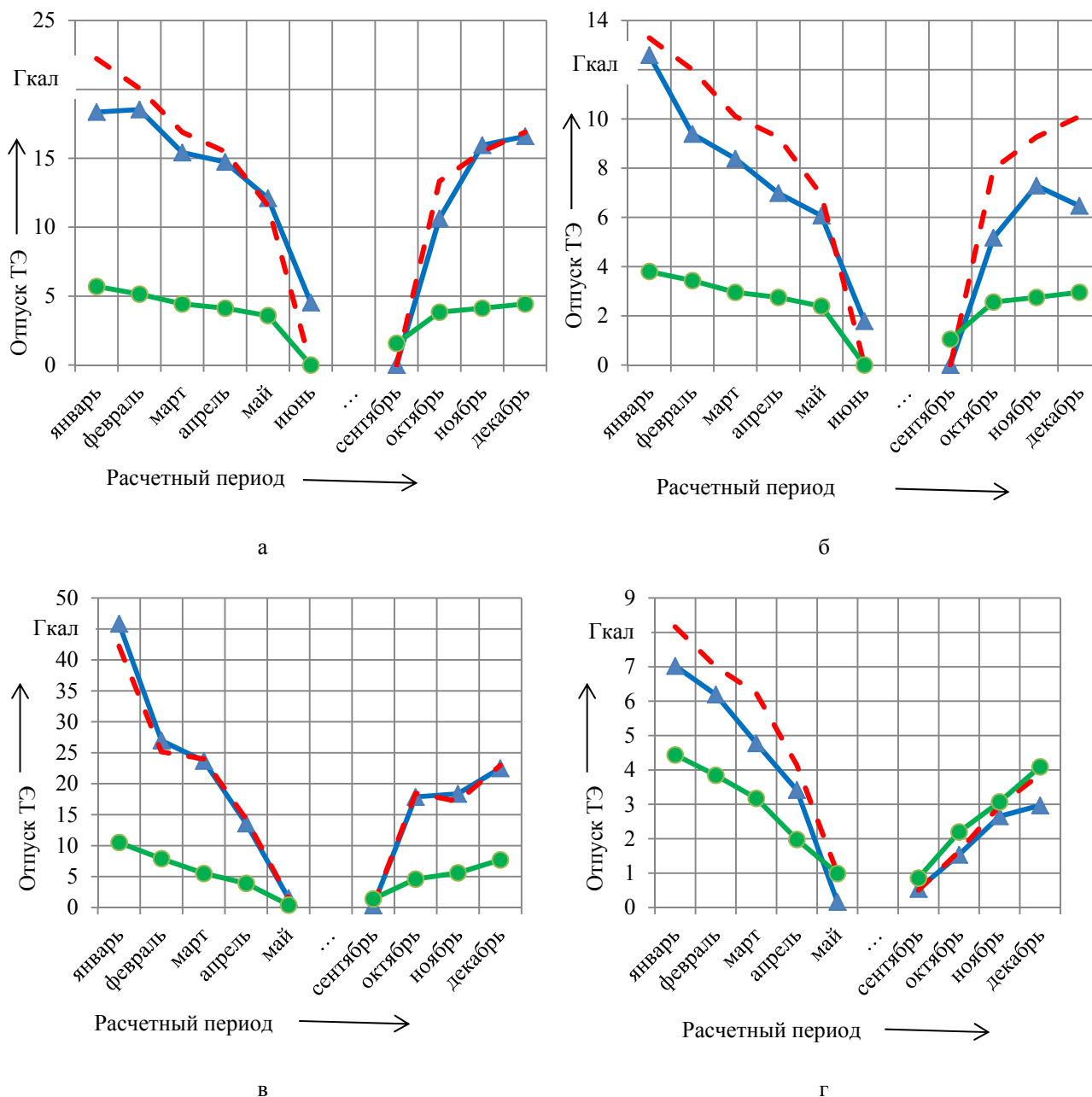
Случайно выполненная проверка сопоставимости получаемых результатов на ряде объектов выявила значительные расхождения в итоговых значениях (до 100 %).

С целью формирования единого подхода при определении расхода электрической энергии на отопление расчетным путем было принято решение о проведении исследований на объектах, оборудованных индивидуальными приборами учета ЭЭ.

С этой целью был выбран ряд полигонов железных дорог (Октябрьская, Свердловская, Южно-Уральская, Восточно-Сибирская) и совместно с причастными работниками дорожных топливно-энергетических центров были отобраны на каждой дороге для анализа три – пять электродогревательных, оборудованных индивидуальными приборами учета. Для каждого объекта были установлены значения температуры атмосферного воздуха за период работы отопления (помесячно). Перед выполнением расчетов величины права потребления тепловой энергии при фактических условиях эксплуатации предварительно были уточнены технические характеристики отапливаемых объектов (геометрические размеры, материал и толщина стен, направление использования помещения и ряд других).

С учетом того, что выполнение такого объема вычислений «вручную» требует значительного ресурса времени и определенной квалификации исполнителей, было принято решение о выполнении расчетов по праву расхода тепловой энергии с использованием автоматизированной системы «Стационарная энергетика» (далее – АС СЭ). В основу данного про-

граммного обеспечения положена методология по нормированию котельно-печного топлива и тепловой энергии, принятой для подразделений железнодорожного транспорта [9]. Более подробная информация о подходах, принятых при разработке, функциональных возможностях и практическом применении данного программного обеспечения при реализации прикладных задач, приведена в статьях [10, 11]. В качестве дополнительной задачи, решаемой в ходе исследований, проверялась достоверность результатов, получаемых в АС СЭ, путем сравнения с показаниями приборов учета.



— прибор учета; --- — АС «Стационарная энергетика»; —●— — ЭО-10У

Динамика фактического и расчетного потребления электрической энергии в электрокотельных: а — трехэтажное здание поста ЭЦ ст. Идель Октябрьской железной дороги; б — вокзала ст. Кяппесельга Октябрьской железной дороги; в — поста ЭЦ ст. Сетово Свердловской железной дороги; г — дома связи ст. Новоорск Южно-Уральской железной дороги

Исходя из названных выше целей и оговоренных условий в мае 2018 г. были проведены комплекс работ по выполнению сравнений результатов расчетов по двум указанным выше подходам и сравнение полученных значений с данными о фактическом расходе.

Полученные результаты подтвердили значительное несоответствие конечных расчетных значений как между собой, так и в ряде случаев с фактическим расходом, определенным по приборам учета.

В качестве иллюстрации на рисунке показана помесечная динамика изменения всех измеряемых и расчетных значений, зафиксированных для ряда электрокотельных.

В таблице 2 показаны итоговые результаты сравнения факта и расчетных значений потребления энергоресурса на нужды отопления.

Таблица 2 – Результаты сравнения фактического полезного отпуска тепловой энергии на электроотопление с расчетными и оценка погрешности определения расхода ресурса

Наименование объекта, полигон	Годовое потребление, Гкал			Погрешности расчетных методов	
	факт	АС СЭ	ЭО-10у	АС СЭ	ЭО-10у
Вокзал ст. Куйтун (В-Сиб)	22,31	23,55	17,78	+5,6 %	+20,3 %
Вокзал ст. Нюра (В-Сиб)	37,64	40,10	50,74	+6,5 %	-34,8 %
Вокзал ст. Гришево(В-Сиб)	51,03	52,70	29,59	+3,3 %	+42,0 %
Пост ЭЦ, ст. Идель(Окт).	126,86	131,97	36,94	+4,0 %	+70,9 %
Пост ЭЦ, ст. Ухтица(Окт)	41,66	50,45	13,45	+21,1 %	+67,7 %
Вокзал, ст. Кяппесельга(Окт)	64,11	78,89	24,63	+23,0 %	+61,6 %
Пост ЭЦ, ст. Предмедгорский (Окт)	67,80	87,14	25,64	+28,5 %	+62,2 %
ЭЧ-12 ст. Храмцовская (Сверд)	493,96	533,42	439,50	+8,0 %	+11,0 %
Дом связи ст. Гороблагодатская (Сверд)	279,11	275,84	171,20	-1,2 %	+38,7 %
Пост ЭЦ ст. Омутинская (Сверд)	236,19	226,73	179,70	-4,0 %	+23,9 %
Пост ЭЦ ст. Сетово (Сверд)	170,64	166,20	47,50	-2,6 %	+72,2 %
Дом связи ст. Новоорск (Ю-Ур)	29,29	35,52	24,66	+21,3 %	+15,8 %
Дом связи ст. Халилово (Ю-Ур)	36,28	42,90	24,66	+18,3 %	+32,0 %
Дом связи ст. Миасс (Ю-Ур)	29,14	33,81	24,66	+16,0 %	+15,4 %
Дом связи ст. Айдырля (Ю-Ур)	21,67	23,50	48,30	+8,4 %	-122,9 %
Дом связи ст. Теренсай (Ю-Ур)	20,41	23,00	21,60	+12,7 %	-5,87 %
Дом связи ст. Шильда (Ю-Ур)	18,65	20,35	21,60	+9,1 %	-15,8 %
Итого	1746,75	1846,07	1202,15	+5,7 %	+31,2 %

Анализ полученных результатов показал, что средняя погрешность по всей выборке объектов по АС СЭ составила + 5,69 %, а по ЭО-10у + 31,18 %. На основании этого можно сделать вывод о том, что применение способа определения фактического расхода ЭЭ на электроотопление при отсутствии индивидуального прибора ее учета более корректно проводить на основе вычислений права расхода тепловой энергии с последующим пересчетом в ЭЭ.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Выполнены исследования методом непосредственной оценки по сравнению двух подходов при расчете фактического расхода ЭЭ на электроотопление, результаты которых показали, что во всех случаях кривые (- -), построенные на основании расчетов по АС СЭ [9 – 11], эквидистантны кривым, построенным по показаниям приборов учета

(—▲—), что подтверждает применимость подхода, представленного в отчете [7] для расчетов по расходу, определяемому при отсутствии приборов учета. Отклонения, полученные в ряде случаев, объясняются, как правило, двумя причинами: несовпадением расчетных геометрических характеристик объектов с фактическими (в пределах 10 – 15 %) и (или) отклонением значений температуры внутри отапливаемых помещений от нормативных (не более 1 – 2 °С).

2. Практически во всех случаях кривая, полученная согласно отчету [6] – (—●—), отличается от фактических данных и не отражает колебания нагрузки, обусловленные изменением температуры атмосферного воздуха.

3. С учетом изложенного предлагается при оценке величины фактического расхода ЭЭ на электроотопление при отсутствии индивидуальных приборов учета брать за основу расчеты по праву расхода, выполняемые по методике [9] или по ее электронной версии АС СЭ.

4. По результатам исследований при актуализации «Методики анализа и планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды в ОАО «РЖД» (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.08.2018 № 1866р) в части определения потребности ЭЭ на отопление установлен способ предварительного определения потребности тепловой энергии с последующим пересчетом в электрическую энергию через соответствующие коэффициенты.

5. Внесены изменения в порядок заполнения данных в отчетность ЭО-10У с учетом полученных результатов исследований.

Список литературы

1. Теплоэнергетика железнодорожного транспорта: Справочно-методическое пособие / Г. П. Мокриденко, Л. Я. Левенталь и др. / МИИТ. – М., 2006. – 345 с.
2. Рожицкий, Д. Б. Энергетика железнодорожного транспорта. Нормирование потребления топливно-энергетических ресурсов: Учебное пособие [Текст] / Д. Б. Рожицкий / МИИТ. – М., 2018. – 135 с.
3. Никифоров, М. М. Методика планирования электропотребления на нетяговые нужды структурных подразделений филиалов ОАО «Российские железные дороги» [Текст] / М. М. Никифоров, А. А. Комяков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск: Перспективы и направления развития транспортной системы / Самарский научный центр Российской академии наук. – Самара, 2007. – С. 49 – 53
4. Совершенствование системы контроля и анализа расхода электрической энергии нетяговыми железнодорожными потребителями: Научная монография [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – 94 с.
5. Сальников, А. Х. Нормирование потребления и экономия топливно-энергетических ресурсов [Текст] / А. Х. Сальников, Л. А. Шевченко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.
6. Отчет о потреблении электроэнергии на собственные нетяговые нужды»: Отчет ЭО-10У [Электронный вариант]. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.03.2017 № 578р. – 14 с.
7. Отчет по теплоснабжению и водоотведению ТВО-1» (для подразделений ЦДТВ) [Электронный вариант]. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 02.11.2015 № 2600р. – 8 с.
8. Степин, Ю. П. Компьютерная поддержка формирования многокритериального ранжирования и оптимизации управленческих решений в нефтегазовой отрасли: Учебное пособие [Текст] / Ю. П. Степин. – М.: Недра, 2016. – 421 с.

9. Методика планирования расхода топлива на нетяговые нужды и тепловой энергии в ОАО «РЖД» [Электронный вариант]. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 03.08.2007. № 1507р. – 152 с.

10. Этап разработки автоматизированной системы для планирования объемов потребления котельно-печного топлива и приобретаемой тепловой энергии (на примере ОАО «РЖД») [Текст] / Д. Б. Рожицкий, Д. А. Чижов и др. // Энергосбережение и водоподготовка. – М.: Энив. – 2016. – № 4 (102) – С. 66 – 72.

11. К вопросу об оперативной оценке влияния расхода котельно-печного топлива для котельных железнодорожного транспорта с учетом изменения температуры атмосферного воздуха [Текст] / Д. Б. Рожицкий, М. С. Филаткин и др. // Энергосбережение и водоподготовка. – М.: Энив. – 2017. – № 6 (110) – С. 45 – 52.

References

1. Minaev B. N., Mokridenko G. P., Lewental L. Ya. *Teploenergetika zheleznodorozhnogo transporta: Spravochno-metodicheskoye posobiye* (The thermal power system of railway transport: a reference Handbook). Moscow: MIIT, 2006, 345 p.

2. Rozhitsky D. B. *Energetika zheleznodorozhnogo transporta. Normirovaniye potrebleniya toplivno-energeticheskikh resursov* (Energy of railway transport. Rationing of fuel and energy resources consumption) Moscow: MIIT, 2018, 135 p.

3. Nikiforov M. M., Komyakov A. A. Method of planning of power consumption for non-traction needs of the branches of JSC «Russian Railways» [Metodika planirovaniya elektropotrebleniya na netyagovyye nuzhdy strukturnykh podrazdeleniy filialov ОАО «Rossiyskiye zheleznyye dorogi»]. *Izvestiya of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences*, Samara, 2007, pp. 49 – 53.

4. Cheremisin V. T., Nikiforov M. M., Komyakov A. A., Pashkov D. V. *Sovershenstvovaniye sistemy kontrolya i analiza raskhoda elektricheskoy energii netyagovymi zheleznodorozhnymi potrebitel'nyami* (Improvement of the system of control and analysis of electric power consumption non-tractive railway consumers: scientific monograph). Omsk: Omsk state University of Railways. 2010, 94 p.

5. Salnikov A. H., Shevchenko L. A. *Normirovaniye potrebleniya i ekonomiya toplivno-energeticheskikh resursov* (Regulation of consumption and savings of fuel and energy resources). Moscow: Energoatomizdat, 1986, 240p.

6. *Otchet o potreblenii elektroenergii na sobstvennyye netyagovyye nuzhdy» otchet EO-10U* (Report on the consumption of electric power for own needs of non-tractive" report EO-10U), approved by the order of JSC «RZD» from 29.03.2017 no.578r.

7. *Otchet po teplosnabzheniyu i vodootvedeniyu TVO-1» (dlya podrazdeleniy TSDTV)* (Report on heat supply and water disposal TVO-1 (for departments CDTV), approved by the order of JSC «RZD» from 02.11.2015 no. 2600 r.

8. Stepin Yu. P. *Komp'yuternaya podderzhka formirovaniya mnogokriterial'nogo ranzhirovaniya: i optimizatsii upravlencheskikh resheniy v neftegazovoy otrasli*. (Computer support of formation of mnogokriterial ranking and optimization of management decisions in the oil and gas industry), Moscow: Nedra, 2016, 421 p.

9. *Metodika planirovaniya raskhoda topliva na netyagovyye nuzhdy i teplovoy energii v ОАО «RZHD»* (Method of planning of fuel consumption for non-traction needs and thermal energy in JSC «Russian Railways»), approved by the order of JSC «RZD» from 03.08.2007 № 1507r.

10. Rozhitsky D. B., Chizhov D. A., Fratkin M. S., Rysina A. D. The development Phase of automated system for planning of volumes of consumption of boiler and furnace fuel and purchased heat energy (on the example of JSC «Russian Railways») [Etap razrabotki avtomatizirovannoy sis-

temy dlya planirovaniya ob'yemov potrebleniya kotel'no-pechnogo topliva i priobretayemoy teplovoy energii (na primere OAO «RZHD»)]. *Energy Saving and water treatment*, 2016, no. 4 (102), pp.66 – 72.

11. Rozhitsky D. B., Filatkin M. S., Drabkina, V. E., Rybak A. A. To the question about the operational assessment of the impact of consumption of boiler fuel for the boiler of a railway transportation taking into account changes in ambient air temperature [K voprosu ob operativnoy ozenke vliyaniya raskhoda kotel'no-pechnogo topliva dlya kotelnikh zhelesnodofozhnogo transporta s uchetom izmeneniya temperatury atmosfernogo vosdukha]. *Energy Saving and water treatment*, 2017, no. 6 (110), pp. 45 – 52.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рожицкий Дмитрий Борисович

Проектно-конструкторско-технологическое бюро по нормированию – филиал ОАО «РЖД».

Бригадирский переулок, д. 6, г. Москва, 105005, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник отдела.

Тел.: +7 (499) 262-81-16.

E-mail: rodim@yandex.ru

Филаткин Михаил Сергеевич

Проектно-конструкторско-технологическое бюро по нормированию – филиал ОАО «РЖД».

Бригадирский переулок, д. 6, г. Москва, 105005, Российская Федерация.

Ведущий технолог.

Тел.: +7 (499) 260-78-46.

E-mail: mfil2006@yandex.ru

Рыбак Алексей Андреевич

Топливо-энергетический центр. Восточно-Сибирская ж.д. – филиал ОАО «РЖД».

Карла Маркса ул., д. 7, г. Иркутск, 664003, Российская Федерация.

Тел.: +7 (3952) 4-32-79.

E-mail: zeze2222@rambler.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Рожицкий, Д. Б. К вопросу определения расхода энергии электроотопительными агрегатами, не оборудованными приборами учета [Текст] / Д. Б. Рожицкий, М. С. Филаткин, А. А. Рыбак // Известие Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 126 – 134.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rozhitsky Dmitry Borisovich

Design technological buerau —branch of JSC RZD.

Brigadirskypereulok, 6, Moscow, 105005, the Russian Federation.

Ph. D. head of a Department of PKTB N

Phone: +7 (499) 262-81-16.

E-mail: rodim@yandex.ru

Filatkin Mikhail Sergeyevich

Design technological buerau —branch of JSC RZD
Brigadirskypereulok, 6, Moscow, 105005, the Russian Federation.

Leading technologist.

Phone: +7 (499) 260-78-46.

E-mail: mfil2006@yandex.ru

Rybak Alexey Andreevich

Fuel and energy centre of East Siberian Railway – regional branch of JSC RZD.

Karla Marksa st., 7, Irkutsk, 664003, the Russian Federation.

Leading engineer.

Phone: +7 (3952) 4-32-79.

E-mail: zeze2222@rambler.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Rozhitsky D. B., Filatkin M. S., Rybak A. A. On the question of determining the energy consumption of electric heating units. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2018, vol. 3, no 35, pp. 126 – 134 (In Russian).

С. В. Квашук¹, Б. Н. Смышляев¹, В. Г. Трунев²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, Российская Федерация;

²НИЦ «Бамтоннель», г. Новосибирск, Российская Федерация

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ КУЗНЕЦОВСКОГО ТОННЕЛЯ НА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Аннотация. Объектом исследований является горный массив, вмещающий в себя Кузнецовский тоннель, имеющий протяженность 3890 м, наибольшую глубину заложения 355 м, пересекающий перевальную часть хребта Сихотэ-Алинь на линии Комсомольск – Советская Гавань Дальневосточной железной дороги. Целью исследований были детальный анализ инженерно-геологических условий объекта и их влияния на строительство и эксплуатацию тоннеля. Приведенные данные получены как результат полевых исследований, лабораторных опробований физико-механических свойств горных пород, оценки водопотоков в дренажные сооружения и аналитических расчетов. Массив сложен терригенными породами – ритмичным переслаиванием разнородных песчаников, алевролитов, гравелитов, конгломератов, которые классифицируются как прочные. Слоистость имеет крутое падение и субширотное простирание, отклоняющееся от оси тоннеля на 20 – 60°. Ось тоннеля пересекает система разломов различной мощности, их суммарная мощность составляет 334 м, что равно 8,5 % от длины тоннеля. Разломные зоны объединяет повышенная трещиноватость, пониженная устойчивость, местами обильные водопотоки, имеющие максимумы в летний период, угроза вывалов, интенсивное окварцевание и сульфидная минерализация. Полученные материалы мониторинга методами регистрации естественных импульсов электромагнитного поля земли (ЕИЭМПЗ) и дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) позволили сделать вывод о реальной картине по развитию и прогнозу горного давления, а также динамике поступления подземных вод в выработку для безопасного строительства и эксплуатации. Состояние геодинамических условий горного массива характеризуется как стабильное. Имеющиеся данные могут быть использованы как исходные для оценки и прогноза аспектов строительства и эксплуатации второй очереди тоннеля.

Ключевые слова: Сихотэ-Алинь, Кузнецовский тоннель, геологическое строение, физико-механические свойства, слоистость, трещиноватость, водопотоки, устойчивость, мониторинг.

Sergey V. Kvashuk¹, Boris N. Smyshlaev¹, Vasilii G. Trunev²

¹Far East State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

²Scientific and research center «Bamtonnel», (NIC «Bamtonnel», Ltd), Novosibirsk, the Russian Federation

Abstract. The object of the research is the solid rocks massif containing the Kuznetsovskiy tunnel with a length of 3890 m, the greatest depth of the deposit is 355 m, which crosses the mountain pass section of Sikhote-Alin on the Komsomolsk-Sovetskaya Gavan line of the Far Eastern Railway. The aim of the studies was a detailed analysis of the engineering and geological conditions of the facility and their impact on construction and operation. These data are obtained as a result of field research, laboratory testing of physical and mechanical properties of rocks, evaluation of water flow to drainage structures and analytical calculations. The massif is composed by terrigenous rocks - a rhythmic interlayering of heterogeneous grained sandstones, siltstones, gravelites, conglomerates, that are classified as strong. Layering has a steep drop and a sublatitudinal strike, deviating from the axis of the tunnel by 20 – 60°. The tunnel axis is crossed by a system of faults of various capacities, their total capacity is 334 m, which is 8.5% of the length of the tunnel. The fault zones are associated with increased fracturing, reduced stability, in places abundant water inflows that have peaks in the summer, the threat of landslides, intense silicification and sulfide mineralization. The obtained monitoring materials by methods of recording natural pulses of the electromagnetic field of the earth (NPEFE) (EEMEMP) and dipole electromagnetic profiling (DEMP) allowed to draw a conclusion about the real picture of the development and forecast of the rock pressure, as well as the dynamics of the groundwater entering the mine for safe construction and operation. The state of the geodynamic conditions of the mountain massif is characterized as stable. Available data can be used as a starting point for assessing and forecasting aspects of the construction and operation of the second stage of the tunnel.

Keywords: Sikhote-Alin, Kuznetsovskiy tunnel, geological structure, physical and mechanical properties, stratification, fracturing, water inflows, stability, monitoring.

Строительство железнодорожной линии Комсомольск-на-Амуре – Советская Гавань осуществлялось в годы Великой Отечественной войны по «облегченным» техническим нормативам. Наиболее сложный участок трассы, где были реализованы уклоны продольного профиля до 28 – 29%, – это перевальная часть хребта Сихотэ-Алинь. На вершине перевала был построен тоннель длиной 413,30 м, который в настоящее время находится в неудовлетворительном техническом состоянии.

В последующие годы в связи с увеличением грузопотоков к порту Ванино и с увеличением массы поездов (до 5 – 6 тыс. т) этот участок железной дороги стал «барьерным местом» по пропускной способности всей линии. Поэтому в 2000-х гг. было принято решение о реконструкции перегона Оуэн – Высокогорная со строительством нового Кузнецовского тоннеля.

Проект нового Кузнецовского тоннеля был разработан проектно-изыскательским институтом ООО «Бамтоннельпроект», подрядчик по строительству – тоннельный отряд № 12 ПАО «Строй-Трест». Тоннель запроектирован двускатным, общая протяженность сооружения – 3890 м, наибольшая глубина заложения – 355 м. Проходка тоннеля осуществлялась щитовым проходческим комплексом RME 375 SE фирмы Lovat.

Тоннельная обделка имеет круговое очертание наружным диаметром 9195 мм и состоит из семи железобетонных блоков. Длина кольца – 1500 мм. Конструкция кольца обделки приведена на рисунке 1.

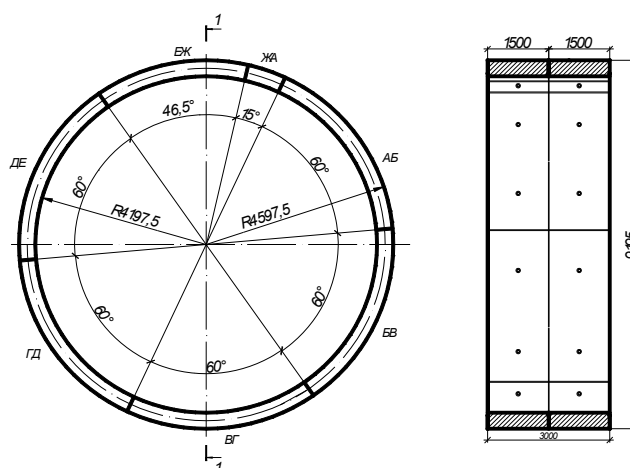


Рисунок 1 – Конструкция кольца тоннельной обделки Кузнецовского тоннеля

Для обеспечения безопасных условий сооружения тоннеля и для его дальнейшей нормальной эксплуатации в течение длительного времени было необходимо выполнить тщательное изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий горного массива. Кроме того, в период производства проходческих работ целесообразно выполнять работы по мониторингу устойчивости выработки, прогнозу развития горного давления и притоку подземных вод в тоннель.

Указанные выше работы выполнялись специалистами ДВГУПС и ООО НИЦ «Бамтоннель» в течение всего периода строительства Кузнецовского тоннеля.

Сихотэ-Алиньская складчатая система расположена в составе инженерно-геологического региона юга Дальнего Востока и замыкается на восточном побережье Восточно-Сихотэ-Алиньской вулканогенной зоной [1].

Район Кузнецовского перевала сложен меловыми осадочными и вулканогенными породами. В основании разреза лежат дислоцированные алевролиты верхней толщи ларгасинской свиты ранне-позднемелового возраста ($K_{1-2} l r_m$), выход которых на дневную поверхность откартирован над западным порталом Кузнецовского тоннеля – терригенное основание. На алевролитах несогласно залегают андезит-базальты и их лавобрекнии

верхнемелового возраста (λK_2), покровы которых слагают толщу мощностью до 300 м и занимают около половины площади района. Андезито-базальты за пределами района перекрываются толщей игнимбритов липаритов верхнемелового возраста (λK_2), в состав которой входят также туфоигнимбриты, туфы и ксенотуфы липаритового состава. На левобережье р. Верхняя Удоми закартированы относимые к описанной выше толще покровы, сложенные псефопсаммитовыми туфами и заключенные в удлиненном тектоническом блоке, ориентированном в субширотном направлении. В составе покрова содержатся редкие линзообразные тела алевропелитов мощностью до 1 м [2].

Алевролиты ларгасинской свиты и андезито-базальты прорваны субвулканическими интрузиями игнимбритов липаритов верхнемелового возраста, выходы которых занимают также около половины площади района. Андезито-базальты секутся дайками диоритовых порфиритов и липаритов верхнемелового возраста. Все вулканические образования – покровные и интрузивные – пересекаются дайками раннепалеогеновых диоритовых порфиритов.

Территория района пересекается протяженными, длиной до 10 км и более, уходящими за пределы района тектоническими нарушениями субширотного простирания. Кроме них в районе проявлены менее протяженные разрывы субмеридионального, северо-восточного и северо-западного простирания. Субширотные, северо-западные и субмеридиональные разрывы отчетливо проявлены на АФС и выражены в рельефе, что свидетельствует об их современной активности. Тоннель расположен между двумя субпараллельными протяженными широтными разрывами, удаленными друг от друга примерно на 1 км, ближе к каждому из них (в 250 – 350 м от него). Разрывы эти являются частью системы разрывов такого же простирания, расположенных и к северу, и к югу от тоннеля, и будучи активными, представляют опасность не только для тоннеля, но и для всего участка дороги между широтами ст. Сихотэ и ст. Соллу.

Терригенное основание представлено чередованием ритмично переслаивающихся пачек параллельно слоистых (иногда косослоистых) песчаников с мощностью прослоев от 5 – 30 до 200 – 400 мм и слоистых алевролитов. Периодически в их толще отмечаются пропластки мелкозернистых песчаников мощностью до 40 м и черных массивных алевролитов мощностью до 30 м и, разделенных разрывными нарушениями [2].

Ось тоннеля имеет простирание 320° . Простирание слоистости составляет $240 - 300^\circ$, а ее падение весьма крутое и составляет $60 - 90^\circ$. Можно сказать, что эти условия не осложняют горнопроходческие работы.

По классификации ГОСТ 25100-2012 породы вмещающие тоннель, классифицируются как прочные и очень прочные, очень плотные. Наибольшие значения предела прочности на сжатие наблюдаются у алевролитов, а наибольшие значения предела прочности на растяжение у песчаников. Большая часть трассы тоннеля находится в трещиноватых и сильнотрещиноватых горных породах.

Именно высокая степень трещиноватости песчаников объясняет их пониженную прочность. Интервал значений плотности пород имеет значения от $2,63$ до $2,72 \text{ г/см}^3$. Оценка крепости породы тоннеля по шкале М.М. Протоdjаконова относит их к 1-й – 3-й категориям от высшей степени крепости до крепких.

Участки резкого понижения показателей прочности – это относительно небольшие зоны тектонической трещиноватости протяженностью до 40 м [3, 4].

Разломные лениаменты имеют северо-западное простирание, а в юго-восточной части района – северо-восточное. Их мощность существенно различается и, в общем, составляет 334 м, т. е. 8,5 % от длины тоннеля. В условном интервале 2246 – 2286 м расположена самая крупная зона, она имеет мощность около 40 м. Схематическое построение расположения разломных зон приведено на рисунке 2.

Физико-механические свойства горных пород закономерно меняются при переходе от монолитного состояния к тектонически – трещиноватому. К примеру, у песчаника, не ослабленного трещинами, предел прочности на сжатие, составляет 160 МПа, у трещиноватого – 45 МПа.

В тех зонах, где породы ослаблены трещинами до раздробленного состояния, изменение физико-механических свойств могут составлять разы. При этом изменяется и устойчивость пород от устойчивой и средней устойчивости до слабо устойчивой и неустойчивой [5].

Для таких зон характерны слабая устойчивость породы, повышенная трещиноватость, вывалы, обильные водопритокки, сульфидная минерализация, интенсивное окварцевание.

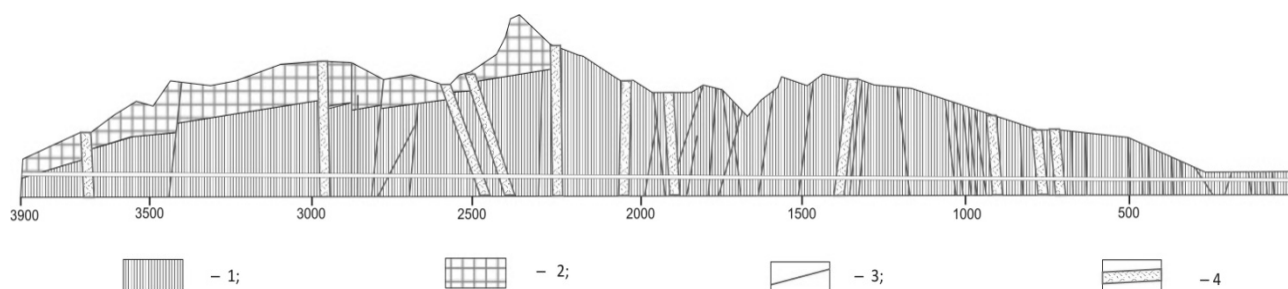


Рисунок 2 – Схематический инженерно-геологический разрез по оси Кузнецовского тоннеля (по данным материалов проходки транспортно-дренажной штольни). Построение Г. А. Злобина [3, 4]:

- 1 – терригенные осадочные породы (песчаники, алевролиты и их переслаивания);
- 2 – вулканогенные образования (туфы андезитов, риолитов); 3 – тектонические разломы;
- 4 – зоны тектонической трещиноватости

Наиболее нарушенными являются участки 0 – 1440 м и 3500 – 3900 м условного пикета. Это связано с широким распространением разрывных нарушений и активным воздействием агентов выветривания вследствие меньшей глубины выработки в сравнении с другими участками [6].

Средние значения физико-механических свойств приведены в таблице.

Физико-механические свойства горных пород, вмещающих в себя Кузнецовский тоннель

Физико-механические свойства/горные породы	Плотность, т/м ³	Пределы прочности пород, МПа, на			Модуль упругости МПа·10 ⁴	Модуль деформации, МПа·10 ⁴	Коэффициент крепости
		сжатие в сухом состоянии	сжатие в водонасыщенном состоянии	растяжение			
Песчаники	2,662	185,78	121,53	12,37	1,242	1,44	8,578
Песчаники с прослоями алевролитов	2,649	77,13	75,01	5,83	1,044	1,19	7,71
Переслаивание алевролитов и песчаников	2,633	105,82	152,39	6,87	1,213	1,336	10,58
Алевролиты	2,652	112,87	52,797	9,47	1,237	1,536	11,29
Седиментационные брекчии	2,642	104,029	70,85	8,87	1,038	1,408	10,4
Туф андезита	2,715	89,13	75,5	8,47	1,403	1,417	8,91
Туф риолита	2,676	80,23	47,08	4,65	1,153	1,157	8,02

Изменение свойств пород от трещиноватых к монолитным весьма существенно, геологические условия неоднородны, что создает сложности в достоверной оценке инженерно-геологических условий при проектировании конструкций тоннеля и при его эксплуатации.

Водопритоки в тоннель, обводненность горных пород, его вмещающих, определяется наличием зон повышенной тектонической трещиноватости, развитием экзогенной трещиноватости и климатическими условиями. Их дебит имеет выраженный максимум в середине летнего периода.

После монтажа обделки наблюдаются течи из технологических отверстий и межблочных швов. Их можно охарактеризовать как небольшие, лишь местами обильные, доходящие в интервале 2485 – 2489 м условного пикета до $55 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Мониторинг напряженно-деформированное состояния горного массива, вмещающего в себя тоннель, а также прогноз притока подземных вод к нему выполнялись практически в течение всего периода строительства – с 2010 по 2012 г. ежеквартально, осуществлялось это методами регистрации естественных импульсов электромагнитного поля земли (ЕИЭМПЗ) [7 – 9] и дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) [10, 11].

Естественное электромагнитное излучение в горном массиве возникает при его деформировании и разрушении. Образование микротрещин в массиве сопровождается образованием электрических зарядов и их релаксацией в виде импульсного электромагнитного излучения. Повышение напряжений в системе «горный массив – крепь» ведет к увеличению интенсивности электромагнитного излучения. Таким образом, интенсивность электромагнитного излучения является показателем уровня напряжений в крепи тоннеля и вмещающем его горном массиве. На рисунке 3 приведены результаты измерения интенсивности электромагнитного излучения, полученные при геотехническом мониторинге во время строительства Кузнецовского тоннеля. Анализ полученных при исследованиях материалов позволяет с достаточной для практических целей достоверностью высказать следующее: средний уровень интенсивности излучения ЕИЭМПЗ остается практически постоянным, а места локальных повышений интенсивности связаны с ведением строительных работ. В целом геодинамическое состояние горного массива в зоне тоннеля за весь период строительства можно характеризовать как стабильное.



Рисунок 3 – Параметр активности электромагнитной эмиссии в строящемся Кузнецовском тоннеле (n/c – количество импульсов в секунду)

Дипольное электромагнитное профилирование (ДЭМП) является одним из методов электроразведки с помощью искусственно наведенного электромагнитного поля. В данном методе используется зависимость структуры наведенного в горном массиве электромагнитного поля от электрического сопротивления грунта. При изменении влажности грунта изменяется его электрическое сопротивление. Таким образом, метод ДЭМП позволяет оценить изменение обводненности грунтового массива, вмещающего подземные выработки во времени. Данные профилирования методом ДЭМП приведены на рисунке 4 и позволяют судить о динамике поступления подземных вод к тоннелю как по его участкам, так и по соответствующим периодам времени года.

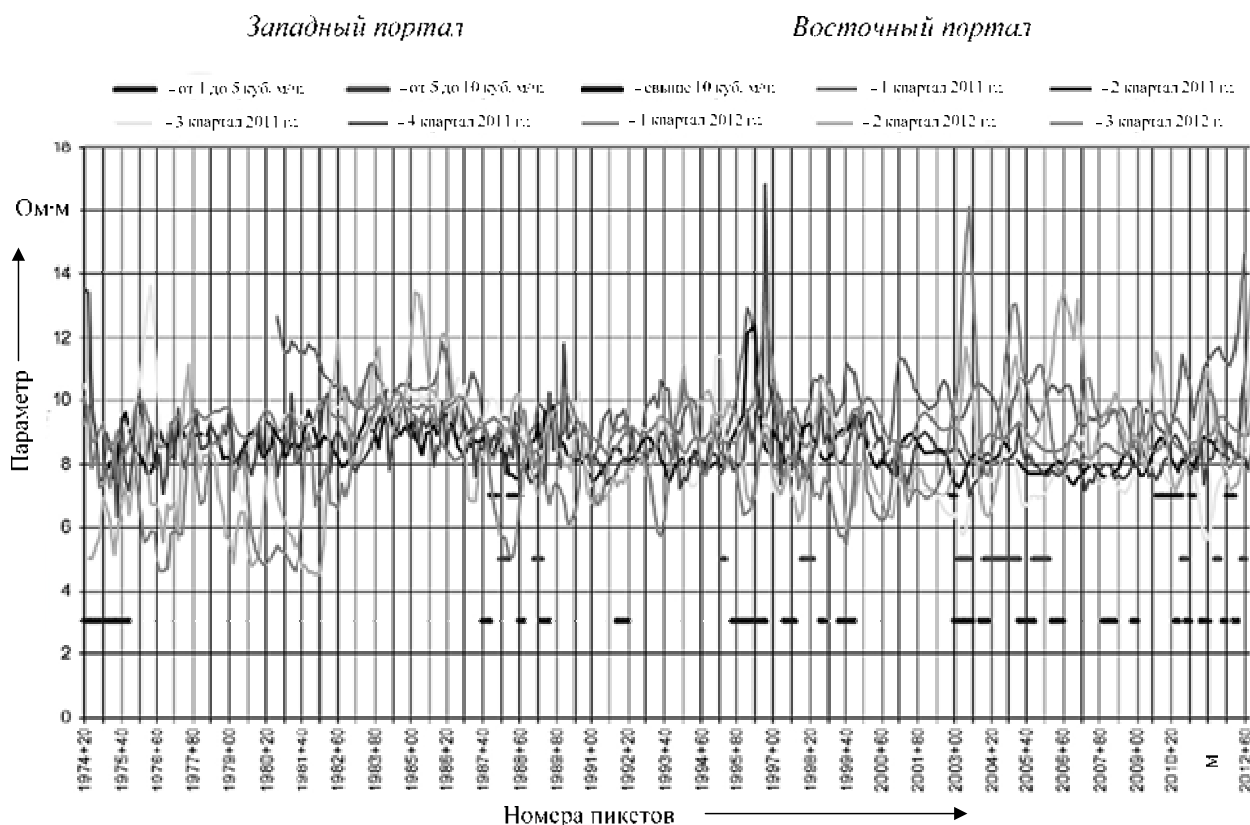


Рисунок 4 – Параметры изменения относительного удельного сопротивления горных пород и обводненности по участкам Кузнецовского тоннеля

Можно сделать следующие выводы.

1. Выполненные исследования по изучению геологического строения горного массива, вмещающего в себя тоннель, позволили достаточно точно установить зоны расположения тектонических нарушений, ослабленных слоистых и сильнотрещиноватых пород и по трассе нового Кузнецовского тоннеля.
2. Мониторинг состояния горного массива по трассе тоннеля, выполняемый методами ЕИЭ МПЗ и ДЭМП в период строительства, обеспечил получение реальной картины по развитию и прогнозу горного давления, а также по динамике поступления подземных вод в выработку.
3. Полученные данные обеспечили, нормальное и безопасное ведение проходческого комплекса по трассе тоннеля и позволили избежать непредвиденных ситуаций при его строительстве подрядной организацией, сооружающей тоннель.

4. Полученные сведения об инженерно-геологических условиях перевальной части хребта Сихотэ-Алинь и работы по горному мониторингу актуальны во время эксплуатации построенного тоннеля, а также и на других подземных транспортных объектах района, в том числе при планируемом строительстве второй очереди тоннельного перехода в период строительства вторых путей на железнодорожной линии Комсомольск-на-Амуре – Советская Гавань.

Список литературы

1. Инженерная геология СССР. Т.4: Дальний Восток [Текст] / Под ред. Е. Г. Чаповского / МГУ. – М., 1977. – 501 с.
2. Квашук, С. В. Инженерно-геологические и гидрогеологические условия проектируемого Кузнецовского тоннельного перехода (северный Сихотэ-Алинь) [Текст] / С. В. Квашук, В. В. Кулаков // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии в современных экономических условиях России». 5 – 6 декабря 2006 г. XII научные чтения имени профессора Н. И. Толстихина / Санкт-Петербургский горный университет. – СПб, 2006. – С. 78 – 82.
3. Злобин, Г. А. Гидрогеологическая обстановка Кузнецовского тоннеля (северный Сихотэ-Алинь) [Текст] / Г. А. Злобин, В. В. Кулаков // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – М.: Наука. – 2014. – № 4. – С. 304 – 316.
4. Квашук, С. В. Анализ инженерно-геологических условий Кузнецовского тоннеля и их прогноз для строительства второй очереди [Текст] / С. В. Квашук, Г. А. Злобин // Материалы IV всерос. науч. конф. с участием иностранных ученых «Проблемы комплексного освоения георесурсов» / ИГД ДВО РАН. – Хабаровск, 2011. – Т. 1. – С. 45 – 51.
5. Квашук, С. В. Геодинамические проблемы при транспортном освоении Дальнего Востока России [Текст] / С. В. Квашук, П. А. Колтун, Г. А. Злобин // Превентивные геотехнические меры по уменьшению природных и техногенных бедствий: Сборник трудов IV междунар. геотехнического симпозиума / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2011. – С. 320 – 324.
6. Zlobin H. A, Kvashuk S. V. Kuznetsovsky tunnel: studies of geological, geomechanical and hydrogeological features for safe and durable operation. Proceedings of the 5th International geotechnical symposium – Incheon (Korea). 2013, – pp. 103 – 106.
7. О природе электромагнитных волн, излучаемых горными породами при их нагружении [Текст] / А. А. Воробьев, В. Ф. Ширяев и др. // Проблемы нефти и газа / Институт проблем нефти и газа. – Тюмень. – 1974. – Вып. 4. – С. 77 – 80.
8. Контроль напряженно-деформированного состояния массива горных пород при строительстве тоннелей методом ЭМИ [Текст] / К. П. Безродный, А. Д. Басов и др. // Известия ТулГУ. Наука о земле / Тульский гос. ун-т. – Тула. – Вып.1. – 2011. – С. 227 – 234.
9. Трунев, В. Г. Мониторинг напряженно-деформированного состояния породного массива экспресс-методом ЕИЭМПЗ (краткий обзор) [Текст] / В. Г. Трунев, М. Н. Кормин // Труды всерос. конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2011. – Т. 1. – С. 239 – 242.
10. Кормин, М. Н. Опыт применения геофизических методов в геотехническом мониторинге транспортных тоннелей [Текст] / М. Н. Кормин, В. Г. Трунев, // Труды всерос. конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2013. – С. 410 – 415.

11. Регистрация и обработка сигнала электромагнитного излучения горных пород [Текст] / М. В. Курленя, А. Г. Вострецов и др. / Сибирское отделение РАН. – Новосибирск, 2000. – С. 232.

References

1. Chapovskiy E. G. *Inzhenernaya geologiya SSSR. T.4: Dal'niy Vostok* (Engineering geology of USSR. Vol. 4 : Far East). Moscow: MGU Publ., 1977, 501 p.
2. Kvashuk S. V. Geoinengineering and hydrogeological conditions of projected Kuznetsovki tunnel (Northern Sikhote-Alin) [Inzhenerno-geologicheskkiye i gidrogeologicheskkiye usloviya proyektiruyemogo Kuznetsovskogo tonnel'nogo perekhoda (severnnyy Sikhote-Alin')]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Tendentsii i perspektivy razvitiya gidrogeologii i inzhenernoy geologii v sovremennykh ekonomicheskikh usloviyakh Rossii»*. (Int. conference 'Trends and future of hydrogeology and geological engineering development under current economic circumstances' of Russia). Sankt-Petersburg, 2006, pp. 78 – 82.
3. Zlobin G. A., Kulakov V. V. Hydrogeological conditions of Kuznetsovski tunnel (Northern Sikhote-Alin) [Gidrogeologicheskaya obstanovka Kuznetsovskogo tonnelya (severnnyy Sikhote-Alin')]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, – *The journal Geoeology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2014, no, pp. 304 – 316.
4. Kvashuk S. V. Analysis of Kuznetsovski tunnel geoengineering conditions and forecasting for the second building term [Analiz inzhenerno-geologicheskikh usloviy Kuznetsovskogo tonnelya i ikh prognoz dlya stroitel'stva vtoroy ocheredi.]. *Problemy kompleksnogo osvoyeniya georesursov: materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiyem inostrannykh uchenykh*. Khabarovsk: IGD DVO RAN, 2011. no. 1. – pp. 45 – 51.
5. Kvashuk S. V., Koltun P. A., Zlobin G. A. Geodynamics problems while the transport development of Russian Far East [Geodinamicheskiye problemy pri transportnom osvoyenii Dal'nego Vostoka Rossii]. *Preventivnyye geotekhnicheskiye mery po umen'sheniyu prirodnykh i tekhnogennykh bedstviy: sbornik trudov IV Mezhdunarodnogo geotekhnicheskogo simpoziuma*. Khabarovsk, 2011, pp. 320 – 324.
6. Zlobin H., Kvashuk S. Kuznetsovsky tunnel: studies of geological, geomechanical and hydrogeological features for safe and durable operation. Proceedings of The 5th International geotechnical symposium – Incheon (Korea) 2013. – pp. 103 – 106.
7. Vorob'yev A. A., Shiryayev V. F., Zashchinskiy A. A., Yevseyev V. D. About the features of electromagnetic waves emitted by solid rocks under pressure [O prirode elektromagnitnykh voln, izluchayemykh gornymi porodami pri ikh nagruzhении]. *Problemy nefi i gaza*. – *The journal Oil and Gas Problems*. Tyumen, 1974, no. 4, pp. 77 – 80.
8. Bezrodnyy K. P., Basov A. D., Romanevich K. V. Control of the stress-strain solid rocks state during tunnel construction by EMI method. [Kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyx porod pri stroitel'stve tonneley metodom EMI]. *Izvestiya TulGu. Nauka o zemle*. – *The Journal TulGu News. Earth Science*. 2011, no. 1, pp. 227 – 234.
9. Trunev V. G., Kormin M. N. Monitoring of stress-strain solid rocks condition by EIEMPZ express method (short review) [Monitoring napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya porodnogo massiva ekspress metodom EIEMPZ (kratkiy obzor)]. *Trudy Vserossiyskoy konferentsii. Geodinamika i napryazhennoye sostoyaniye nedr Zemli*. (Abstracts of Russian conference «Geodynamics and stress conditions of Earth bowls»). Novosibirsk, 2011, no. 1, pp. 239 – 242.

10. Trunev V. G., Kormin M. N // Experience of geophysical methods usage for geotechnical monitoring of transport tunnels.[Opyt primeneniya geofizicheskikh metodov v geotekhnicheskom monitoringe transportnykh tonneley]. *Trudy XX Vserossiyskoy konferentsii.. Geodinamika i napryazhennoye sostoyaniye nedr Zemli.* (Abstracts of the 20th Russian conference «Geodynamics and stress conditions of Earth bowls»). Novosibirsk, 2013, pp. 410 – 415.

11. Kurlenya M. V., Vostretsov A. G., Kulakov G. I., Yakovitskaya G. E. Registration and analysis of solid rocks electromagnetic emission. [Registratsiya i obrabotka signala elektromagnitnogo izlucheniya gornyx porod]. Novosibirsk, Publ. Sibirskoe otdeleniye RAN, 2000, pp. 19 – 23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Квашук Сергей Владимирович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры «Мосты, тоннели и подземные сооружения», ДВГУПС.

Тел.: +7 914 544 34 21.

E-mail: s_kvashuk@mail.ru

Смышляев Борис Николаевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Мосты, тоннели и подземные сооружения», ДВГУПС.

Трунев Василий Григорьевич

Научно-исследовательский центр «Бамтоннель».

Комсомольский пр., д. 1, корп. 3, г. Новосибирск, 630004, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, директор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Квашук, С. В. Инженерно-геологические и геотехнические аспекты строительства и эксплуатации Кузнецовского тоннеля на Дальневосточной железной дороге [Текст] / С. В. Квашук, Б. Н. Смышляев, В. Г. Трунев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 135 – 143.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kvashuk Sergey Vladimirovich

Far East State Transport University (FESTU).

47, Seryshev st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

PhD of Geology & Mineralogy, Professor of the department «Bridges, tunnels and underground constructions», FESTU.

Phone: +7 914 544 34 21.

E-mail: s_kvashuk@mail.ru

Smyishlaev Boris Nikolaevich

Far East State Transport University (FESTU).

47, Seryshev st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

PhD in Engineering, Associate Chief of the department «Bridges, tunnels and underground constructions», FESTU.

Trunev Vasily Grigorievich

Scientific and research center «Bamtonnel» (NIC «Bamtonnel», Ltd).

1, building 3, Komsomolskiy Avenue, Novosibirsk, 630004, the Russian Federation.

PhD in Engineering. Director.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kvashuk S. V., Smyishlaev B. N., Trunev V. G. Engineering-geological and geotechnical aspects of construction and operation of the Kuznetsovskiy tunnel on the far east railroad. Journal of Transsib Railway Studies, 2018. vol. 3, no 35, pp. 135 – 143 (In Russian).

Р. Г. Король, Е. И. Гарлицкий

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск,
Российская Федерация

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВАНИНСКОГО ТРАНСПОРТНОГО УЗЛА С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Сегодня большая часть мировых товарных и денежных потоков сосредоточена в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР). Стратегия развития Дальнего Востока основывается на увеличении экспорта в страны АТР, а также росте объема иностранных инвестиций. В сентябре 2018 г. во Владивостоке на IV Восточном экономическом форуме компания АО «ВаниноТрансУголь», резидент Свободного порта в Ванино, представила проект строительства нового угольного терминала для перевалки 12 млн т. Морской порт Ванино продолжает увеличивать свои перерабатывающие мощности, но недостаточная пропускная способность инфраструктуры железнодорожного транспорта является ограничивающим элементом развития транспортного узла. Строительство нового терминала для перевалки угля потребует соответствующее развитие железнодорожной инфраструктуры Ванинского транспортного узла. В условиях увеличения объемов перевалки грузов необходимо решить вопрос о предельном количестве вагонов, которое может быть переработано в системе «железнодорожная станция – морской порт». Авторами данной статьи разработана программа имитационного моделирования, которая позволяет определить пропускную способность железнодорожной составляющей транспортного узла при существующем техническом оснащении и в условиях увеличения загрузки системы «станция – порт». В данной статье представлены результаты имитационного моделирования работы Ванинского транспортного узла при увеличении выгрузки угля на 40 % до 280 вагонов в сутки. Рабочий парк станции Ванино составил 305 вагонов и продолжал увеличиваться, пути станции были заполнены вагонами в ожидании операций. Представлены две группы возможных путей увеличения пропускной способности транспортного узла – инфраструктурно-технические и технологические решения. В условиях ограниченности территориального развития строительство дополнительной железнодорожной инфраструктуры становится невозможным, поэтому можно увеличить пропускную способность транспортного узла за счет изменения специализации причалов порта. Это позволит уменьшить количество вагонов, находящихся на путях станции в ожидании выгрузки, и ускорить процесс обработки подвижного состава. После переоборудования причалов порта рабочий парк станции Ванино составил 230 вагонов и появился резерв пропускной способности для приема дополнительного вагонопотока. С помощью данной программы имитационного моделирования необходимо проанализировать работу ключевых транспортных узлов Дальнего Востока для определения максимального вагонопотока, при котором транспортные узлы будут функционировать устойчиво, в оптимальном режиме.

Ключевые слова: транспортный узел, транспортная логистика, имитационная модель, взаимодействие видов транспорта

Roman G. Korol, Evgeniy I. Garlitskiy

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

ASSESSMENT OF CAPACITY OF THE VANINO TRANSPORT HUB BY MEANS OF IMITATING MODELLING

Abstract. Today the most part of world commodity and cash flows is concentrated in the Pacific Rim. The strategy of development for the Far East is based on increase in export to Asia-Pacific countries and also growth of volume of foreign investments. In September, 2018 in Vladivostok at the IV East economic forum the VaninoTransUgol company will submit the construction project in seaport Vanino of transport transshipment facility with transshipment capacities to 40 million tons. In 2017 the volume of transfer of freights in Vanino port was 7,2 million tons, the seaport continues to increase the refinery capacities, but the insufficient capacity of infrastructure of railway transport is the limiting element of development of the transport hub. Construction of the new terminal for transfer of coal will demand corresponding development of railway infrastructure of the Vanino transport hub. In the conditions of increase in volumes of transfer of freights, it is necessary to resolve an issue of the extreme number of cars which can be processed in "the railway station-seaport" system. The author has developed the program of imitating modeling which allows to determine the capacity of a railway component of the transport hub at the existing hardware and in the conditions of increase in loading of "the station-the port" system. In this work results of imitating modeling of work of the Vanino transport hub at increase in unloading of coal by 40% up to 280 cars a day are presented. The working park of the Vanino station has made 305 cars and continued to increase, ways of the station have been filled with cars waiting for

operations. Two groups of possible ways of increase in capacity of the transport hub – infrastructure and technology solutions are presented. In the conditions of limitation of territorial development, construction of additional railway infrastructure becomes impossible therefore it is possible to increase the capacity of the transport hub due to change of specialization of moorings of port. It will allow to reduce the number of the cars which are on the ways of the station waiting for unloading and to accelerate processing of the rolling stock. After re-equipment of moorings of port, the working park of the Vanino station has made 230 cars and the capacity reserve for reception of an additional traffic volume has appeared. By means of this program of imitating modeling it is necessary to analyse work of key transport hubs of the Far East for definition of the maximum traffic volume at which transport hubs will steadily function, in the optimum mode.

Keywords: transport hub, transport logistics, imitating model, the interaction of types of transport

Политические и экономические санкции, введенные в отношении Российской Федерации со стороны стран Евросоюза, и ответные действия со стороны России укрепили экономическое сотрудничество со странами Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Развитие территорий Дальневосточного региона является приоритетной задачей стратегического значения в существующей геополитической ситуации, что подтверждается ежегодными посланиями Президента РФ. Перспективы развития Дальнего Востока связаны с добычей большого количества природных ресурсов: нефти, угля, древесины, железа, цветного металла и др. Большая часть экспортного грузопотока следует по Транссибирской и Байкало-Амурской магистралям в адрес морских портов Ванино и Советская Гавань.

Ванинский транспортный узел включает в себя угольный терминал АО «Дальтрансуголь», терминал для перевалки темных и светлых нефтепродуктов ООО «Трансбункер-Ванино» и АО «Порт Ванино». В бухте Мучке компания АО «ВаниноТрансУголь» ведет строительство транспортно-перегрузочного комплекса для перегрузки угля и железорудного концентрата в объеме 12 млн т. До 2023 г. компания «Дальтрансуголь», являющаяся дочерним предприятием АО «СУЭК», планирует построить третью очередь терминала, новый причал, увеличив перевалочные мощности до 40 млн т. в год.

АО «Порт Ванино» – крупнейшая стивидорная компания Ванинского транспортного узла. АО «Ванинский морской торговый порт» осуществляет перевалку грузов самой широкой номенклатуры, в 2017 г. объем перевалки грузов составил 7,2 млн т., что на 5,3 % меньше, чем в 2016 г. (рисунок 1). Диаграмма, приведенная на рисунке 1, показывает устойчивое увеличение грузооборота порта Ванино с 5,5 млн т. в 2003 г. до 8,1 млн т. в 2016 г. [1].

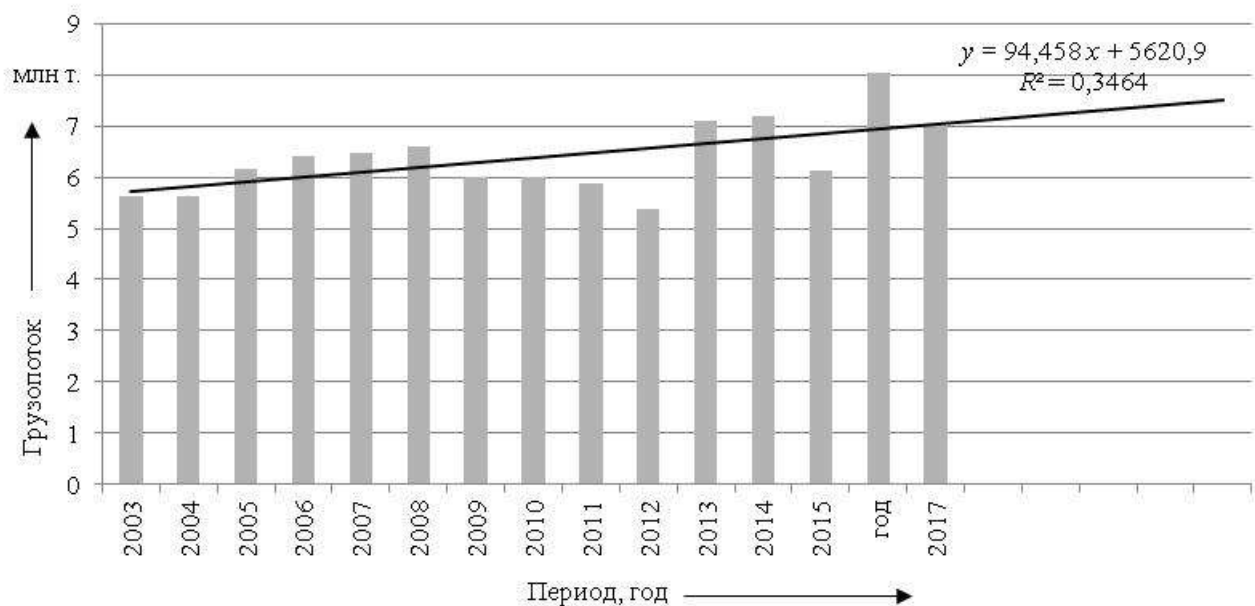


Рисунок 1 – Объемы перевалки грузов в порту Ванино за 2003 – 2017 гг.

К 2020 г. терминалы порта Ванино планируют нарастить производственные мощности на перевалку до 16,4 млн т. в год. Порт Ванино обслуживает внеклассная грузовая припортовая железнодорожная станция Ванино, которая включает следующие парки: парк Ванино, парк Токи и парк Новый Район, который является пунктом передачи вагонов на морские паромы, соединяющие остров Сахалин с материком.

Парк Ванино обслуживает железнодорожные пути необщего пользования: ООО «Трансбункер – Ванино», ООО «Асфальтный завод», ОАО «Порт Ванино», склад-холодильник, ООО «Уралванкон». Порт Ванино включает в себя 16 причалов (рисунок 2), в том числе [1]:

- причалы 5, 6, 9, 10, 11, 12 входят в объединенный производственно-перегрузочный комплекс 1 (ОППК-1);
- причалы 14 и 14а предназначены для обслуживания паромного комплекса;
- причал 18 используется природоохранным флотом.

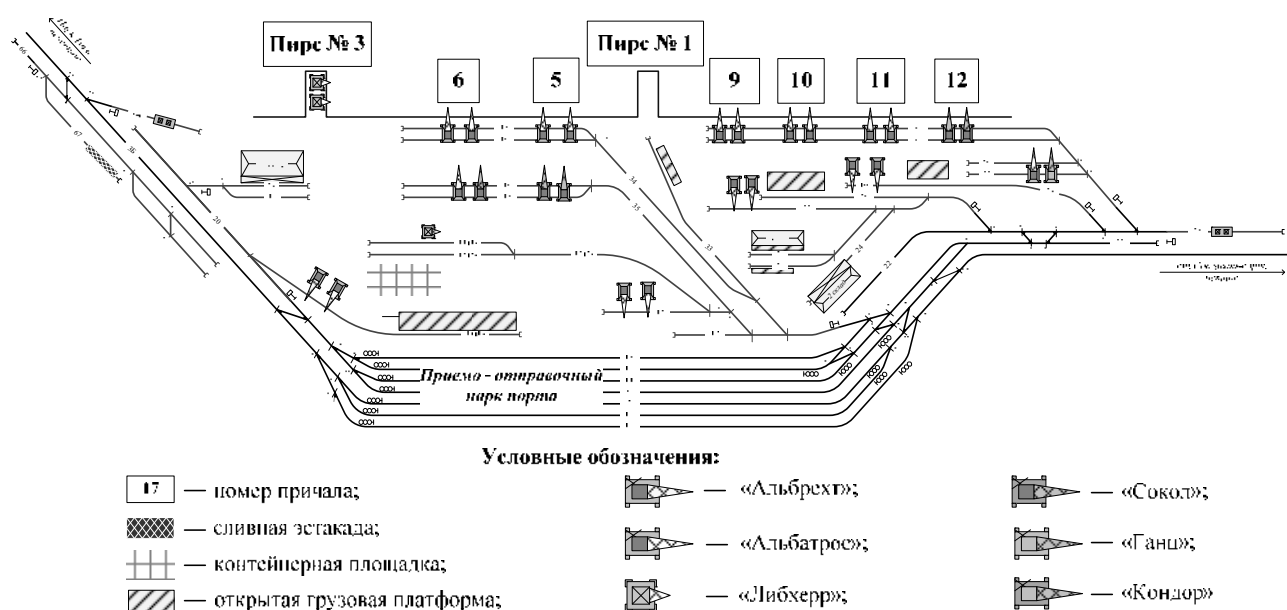


Рисунок 2 – Схема расположения причалов морского порта Ванино

Среднесуточный вагонооборот в порту Ванино составляет 200 вагонов (рисунок 3). Выгрузка существенно преобладает над погрузкой вагонов, это обусловлено географическим расположением порта и его направленностью на экспорт груза в страны АТР. Основной грузопоток, прибывающий под перегрузку на морские суда в порт Ванино, – это каменный уголь с месторождений Южно-Якутского угольного бассейна. При транспортировке угля от горно-обоганительного комплекса до причалов порта Ванино расстояние перевозки составляет 2200 км. Если осуществлять доставку в порты Приморского края, то расстояние составит 2500 км. Сокращение времени доставки и транспортных издержек делает порт Ванино перспективным транспортным узлом для увеличения объемов отгрузки каменного угля на экспорт.

С каждым годом выгрузка угля в порту Ванино (см. рисунок 3) и перерабатывающая способность причалов морского порта увеличиваются, но недостаточная пропускная способность инфраструктуры железнодорожного транспорта, нехватка тягового подвижного состава и порожнего вагонного парка является ограничивающим элементом развития транспортного узла, привлечения инвестиций [2, 3].

В зимний период простой вагонов на причалах порта Ванино увеличивается (рисунок 4), при этом уменьшаются объемы выгрузки вагонов (см. рисунок 3). Такая динамика характерна для всех дальневосточных транспортных узлов. Основная причина этого – экстремальные морозы, приводящие к замерзанию угля и длительному процессу выгрузки, повреждению

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

подвижного состава, появлению «брошенных» составов на подходах к порту. Несоблюдение норм времени на выполнение грузовых и вспомогательных операций по обработке подвижного состава на причалах порта приводит к накоплению вагонов на путях станции в ожидании подачи, и, как следствие, происходит увеличение вагонного парка станции, что может привести к напряженному режиму работы припортовой станции и параличу железнодорожной подсистемы транспортного узла [4].

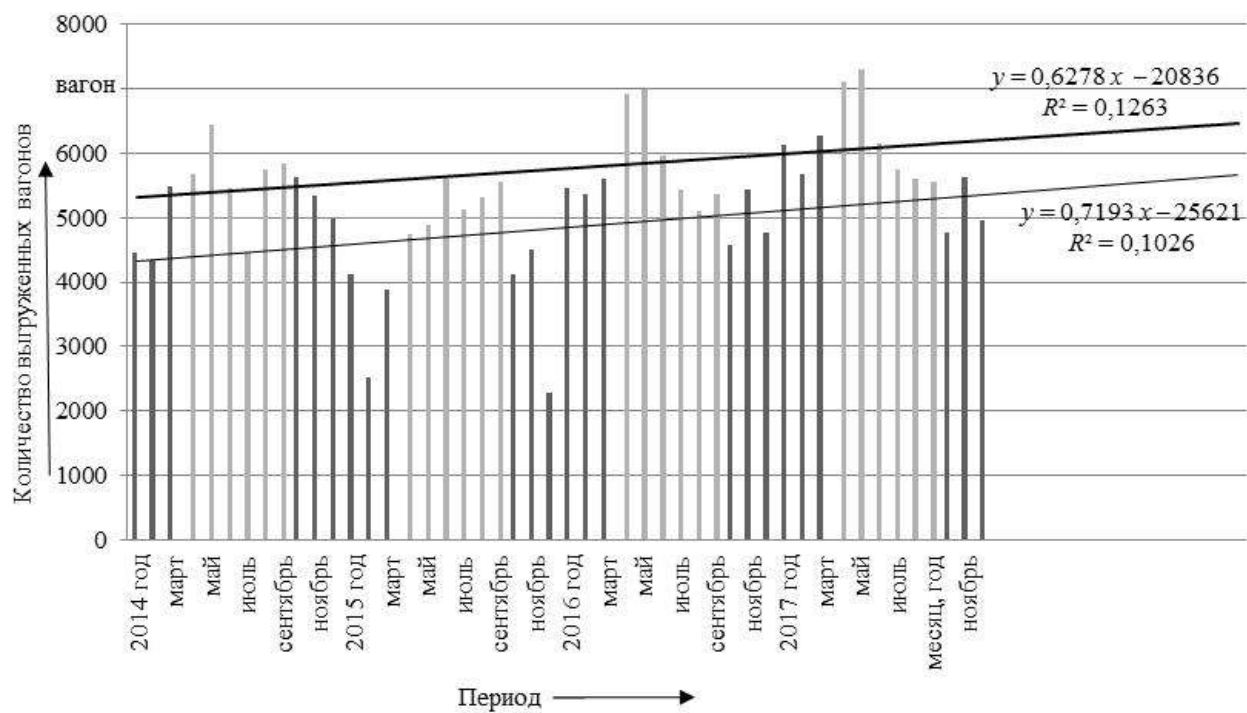


Рисунок 3 – Объемы выгрузки угля на причалах порта Ванино в зимний и летний периоды за 2014 – 2017 гг.: ■ – зимний период; ■ – летний период

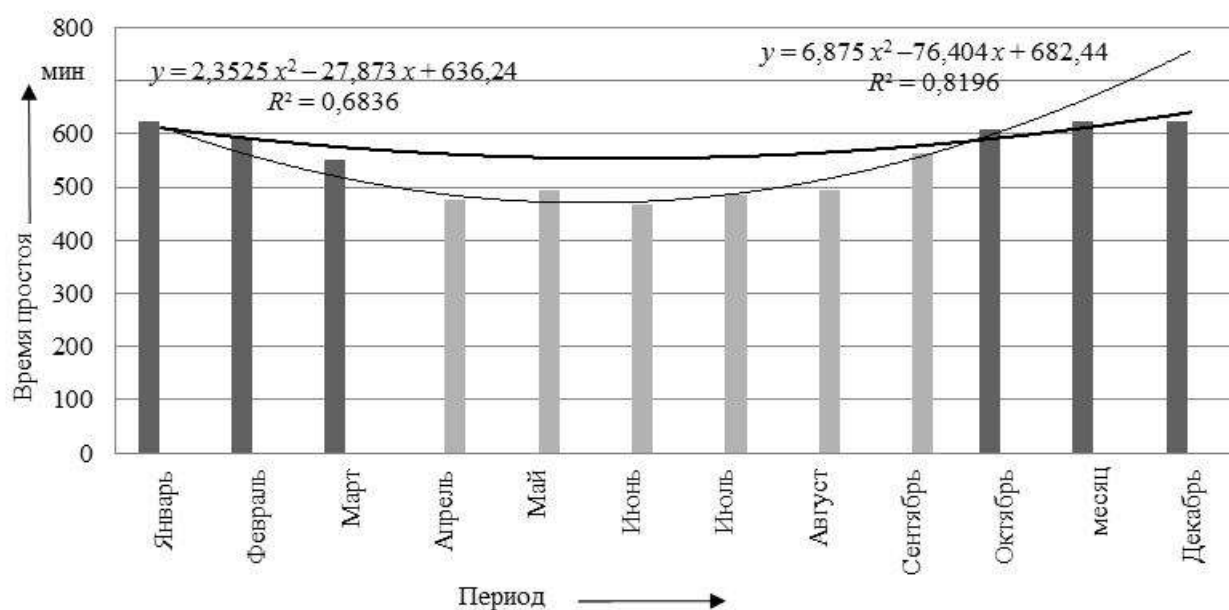


Рисунок 4 – Простой вагонов с углем на причалах порта Ванино за 2017 г.: ■ – зимний период; ■ – летний период

В условиях увеличения объемов перегрузки каменного угля на причалах порта необходимо решить вопрос о предельном количестве вагонов, которое может быть переработано в системе «железнодорожная станция – морской порт». Авторами данной статьи разработана программа имитационного моделирования работы припортовой станции, позволяющая установить соответствие параметров работы железнодорожной станции и порта при увеличении поступающего вагонопотока [5, 6].

Имитационная модель осуществляет перемещение вагонов между подсистемами (парк приема – сортировочный парк – пути порта – сортировочный парк – парк отправления), выполняя с вагонами последовательные операции (осмотр по прибытии, накопление, перемещения между парками станции, подача на пути порта, грузовые операции на причалах, уборка и накопление вагонов, отправление поезда) [7 – 11]. В программу вводятся следующие данные: количество и время прибытия поездов; количество вагонов в составе поезда с указанием грузоподъемности и рода груза; количество и вместимость железнодорожных путей; время осмотра состава в приемоотправочном парке, время выполнения грузовых и маневровых операций. Программа на данном этапе не учитывает загрузку локомотивов, терминальные емкости порта и подход судов.

Целью данного имитационного моделирования является определение максимально возможного объема вагонопотока при существующем техническом и инфраструктурном развитии подсистем транспортного узла на примере припортовой станции Ванино и АО «Порт Ванино». Результатом моделирования является установление предельного количества вагонов, при котором станция не сможет функционировать и перерабатывать поступающий вагонопоток.

Результаты имитационного моделирования работы припортовой станции Ванино в летний период в условиях увеличения выгрузки угля на причалах порта на 40 % (с 200 до 280 вагонов) показали, что при существующем времени нахождения вагонов под операциями на причалах порта максимальная пропускная способность железнодорожной инфраструктуры транспортного узла при ежесуточном поступлении 280 вагонов достигает 305 вагонов на третьи сутки (рисунок 5), происходит увеличение рабочего парка станции, что осложняет маневровую работу, станция не справляется с поступающим вагонопоток.

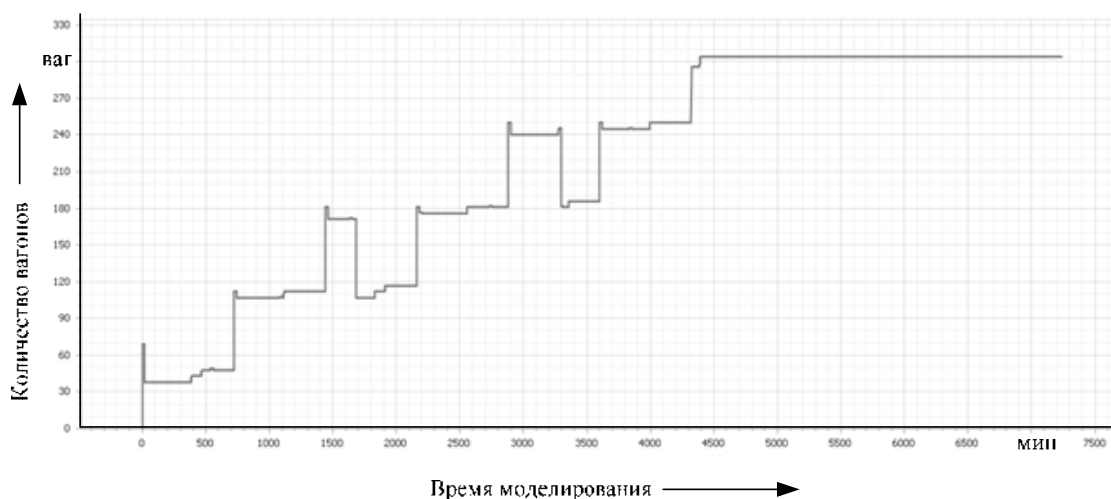


Рисунок 5 – Графическое изображение загрузки сортировочных путей станции Ванино

В условиях постоянно возрастающего поступления вагонов с углем для перевалки на причалах порта Ванино и рассмотренных выше проблем на рисунке 6 представлены возможные пути увеличения пропускной способности транспортного узла [12, 13].

Для большинства дальневосточных транспортных узлов в условиях ограниченности территориального развития строительство дополнительной железнодорожной инфраструктуры

и создание новых причальных комплексов для увеличения перевалочных мощностей порта становится невозможным из-за городской застройки и особенностей рельефа местности, поэтому можно увеличить пропускную способность транспортного узла за счет изменения специализации причалов порта (рисунок 6).



Рисунок 6 – Возможные пути увеличения пропускной способности транспортного узла

Причалы морских портов могут быть специализированы по родам перерабатываемых грузов, по видам плавания и направлениям грузопотоков. Специализация причалов морского порта Ванино представлена в таблице.

В морском порту Ванино перерабатывается широкая номенклатура грузов, основным грузопотоком является уголь, в меньшем объеме идут металл и лес, при этом угольные причалы максимально загружены, портовые мощности не справляются с «пиковыми» объемами выгрузки, необходимо расширять производственную базу под выгрузку угля путем объединения определенных групп грузов для переработки на специально выделенном причальном комплексе, высвобожденные причалы можно специализировать под выгрузку угля. Распределение вагонов с грузом на большее число причалов порта позволит уменьшить количество вагонов, находящихся на путях станции в ожидании выгрузки, что позволит ускорить процесс обработки подвижного состава и соответственно уменьшить рабочий парк станции и оборот вагона.

Экологическая ситуация, связанная с загрязнением атмосферного воздуха угольной пылью в поселке Ванино, в настоящее время также является сдерживающим фактором для развития морского порта. Эксплуатация открытых угольных площадок на причалах ОАО «Ванинский морской торговый порт», расположенных в черте поселка Ванино, приводит к ухудшению экологической обстановки в акватории бухты. Из-за возрастающего грузооборота порта и увеличения спроса на уголь в странах АТР экологическая ситуация в Ванино будет усугубляться, а значит, будет нагнетаться и социальная напряженность. Неоднократно перевалка угля в порту полностью останавливалась по решению надзорных органов.

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Специализация причалов ОАО «Ванинский морской торговый порт»

Номер причала	Специализация причала	Длина, м	Глубина, м	Механизация
Пирс № 3	Генеральные, пиломатериалы, рефрижераторные	Сев. 149,70, Южн. 147,00	8,70 – 11,50	2 мк «Либхер», г/п 64 т., 40 т.
5	Уголь	106,5	9,55	2 пк «Сокол» г/п 32 т.
6		106,5	9,75	пк «Сокол» г/п 32 т.
7	Контейнеры, генеральные, черные металлы	211,50	11,30	2 кп «КОНЕ» г/п 30,5 т., 1 мк «Либхер» г/п 64 т., 1 пк «Сокол» г/п 32 т.
9	Лесные, алюминий	150,00	9,20	1 пк «Сокол» г/п 32 т., 2 пк «Альбатрос» г/п 20 т.
10	Алюминий	200,00	9,55	2 пк «Альбатрос» г/п 20 т., 1 пк «Ганц» г/п 6 т.
11	Алюминий, металллом	150,00	9,55	2 пк «Альбрехт» г/п 20 т., 1 пк «Ганц» г/п 6 т.
12	Алюминий, удобрения	200,00	9,55	2 пк «Сокол» г/п 32 т., 1 пк «Ганц» г/п 6 т.
15	Лесные	150,00	9,75	2 пк «Кондор» г/п 40 т., 1 пк «Сокол» г/п 32 т.
16	Лесные	150,00	9,75	3 пк «Сокол» г/п 32 т.
17	Лесные	152,70	9,75	1 пк «Кондор» г/п 40 т., 2 пк «Сокол» г/п 32 т.
19	Лесные, навалочные	131,00	11,50	3 пк «Сокол» г/п 32 т.
20	Глинозем, лесные	219,35	11,50	1 мк «Либхер» г/п 104 т., 1 пк «Кондор» г/п 40 т., 2 пк «Сокол» г/п 32 т.
Причал № 14 Причал № 14а	Паромный комплекс	122,16	8,00 – 8,50	Паромный комплекс
		122,16		

Руководство порта Ванино принимает различные меры по уменьшению загрязнения окружающей среды. В 2017 г. были закуплены пять установок для пылеподавления в зимний период, пушка вырабатывает специфический снег, притягивающий угольную пыль. Угольная пыль возникает при использовании дробильно-сортировочных машин, с их помощью производится очистка угля, идущего на экспорт, поэтому порт не может от них отказаться. Перевалка металла и леса на 9-м и 10-м причалах порта Ванино осуществляется в небольших объемах относительно угля, поэтому можно осуществлять выгрузку только на одном причале в центральной части порта, которая находится в непосредственной близости от поселка, перенаправив перевалку угля на отдаленные причалы.

Результаты имитационного моделирования работы припортовой станции Ванино показали, что после переоборудования 9-го и 10-го причалов порта Ванино путем замены грузозахватных устройств для перевалки угля рабочий парк станции Ванино при ежесуточном поступлении 280 вагонов составляет 230 вагонов на третьи сутки (рисунок 7). Пропускная способность причалов порта увеличилась до 136 вагонов в сутки (рисунок 8). Станция Ванино имеет резерв пропускной способности для приема дополнительного объема грузопотока под перевалку.

Имитационное моделирование работы станции Ванино по обслуживанию морского порта позволило установить максимальное значение вагонопотока, который может быть обработан станцией и портом при существующем техническом оснащении грузовых фронтов и времени выполнения технологических операций с подвижным составом, в том числе в условиях увеличения прибывающего вагонопотока и техническом переоборудовании причалов порта. Несоответствие производственных мощностей системы «станция – порт» объемам работы приводит к перегрузке и последующей остановке системы или к экономическим убыткам от простоя оборудования. Установление соответствия между наличной пропускной спо-

способностью элементов системы «станция – порт» и существующими и перспективными объемами вагонопотоков является условием эффективного функционирования транспортного узла [14 – 17].

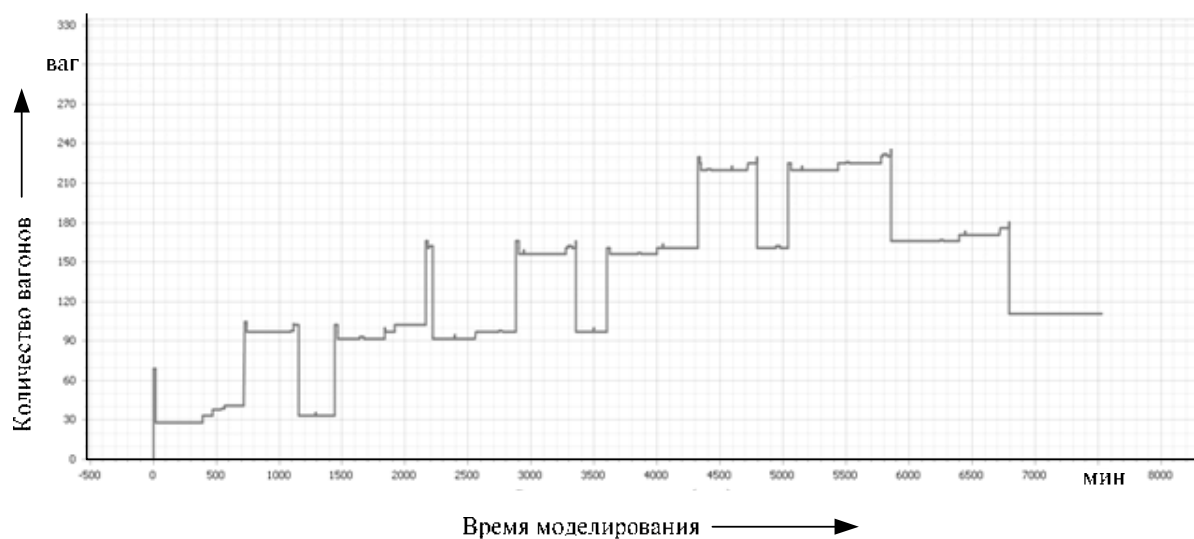


Рисунок 7 – Графическое изображение загрузки сортировочных путей станции Ванино после переоборудования причалов порта

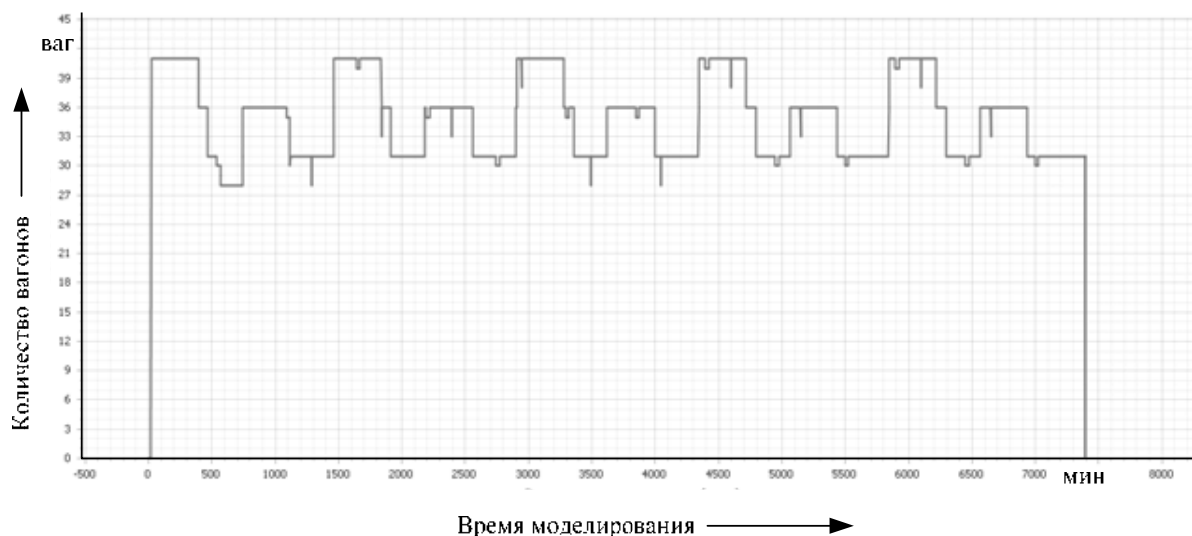


Рисунок 8 – Графическое изображение загрузки причальных путей порта Ванино после переоборудования

Современные транспортные узлы являются сложными технико-технологическими системами, которые нельзя рассматривать отдельно по элементам системы, значительно их взаимное влияние. В системе «станция – порт» существуют стохастические процессы, такие как приоритеты обслуживания грузовых фронтов, повреждение подвижного состава, отказ технических средств, природно-климатическое влияние на работу и т. д. Поэтому в данном исследовании было использовано динамическое имитационное моделирование, основанное на временных параметрах нахождения объекта в системе с учетом имеющихся инфраструктурных ограничений. Результаты имитационного моделирования являются приближительными и отражают лишь основные характеристики системы.

В соответствии с инвестиционным проектом «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием

пропускных и провозных способностей» объемы грузов, следующих в порты Ванино и Советская Гавань, были определены к 2020 г. в размере 66 млн т. С помощью данной программы имитационного моделирования необходимо проанализировать работу ключевых транспортных узлов Дальнего Востока для определения максимального вагонопотока, при котором транспортные узлы будут функционировать устойчиво, в оптимальном режиме.

Список литературы

1. Король, Р. Г. Совершенствование технологии функционирования Ванинско-Советско-Гаванского транспортного узла при наличии «сухого порта» [Текст] / Р. Г. Король // Молодые ученые – Хабаровскому краю: Материалы XVII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов / Тихоокеанский гос. ун-т. – Хабаровск, 2015. – С. 219 – 224.
2. Белов, А. А. Оценка эксплуатационных характеристик транспортного узла [Текст] / А. А. Белов, А. Н. Ларин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – №1(21). – С. 102 – 112.
3. Балалаев, А. С. Организационно-технологические проблемы взаимодействия железнодорожного и морского транспорта и направления их решения [Текст] / А. С. Балалаев // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2009. – № 3 (22). – С. 11 – 15.
4. Король, Р. Г. Технология функционирования Владивостокского транспортного узла при наличии мультимодального терминала «сухой порт» [Текст] / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова / Гос. ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – СПб. – 2014. – № 5 (27). – С. 92 – 101.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014613827. Рос. Федерация. Программа имитационного моделирования работы припортовой железнодорожной станции с вероятностно-статистическим подходом к изменению параметров поступающего вагонопотока / Р. Г. Король, П. В. Даниленко; правообладатель Дальневост. гос. ун-т путей сообщения. – № 2014613827; заявл. 05.03.2014; зарегистр. 08.04.2014, – 1 с.
6. Король, Р. Г. Взаимодействие различных видов транспорта в транспортном узле при наличии терминала «сухой порт» (на примере Владивостокского транспортного узла) [Текст]: Автореферат дис... канд. тех. наук: 05.22.01 / Король Роман Григорьевич. – М., 2015. – 22 с.
7. Король, Р. Г. Имитационное моделирование системы «железнодорожная станция – морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла [Текст] / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова / Гос. ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – СПб. – 2015. – № 3 (31). – С. 209 – 216.
8. Козлов, П. А. Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов [Текст] / П. А. Козлов, В. Ю. Пермикин, В. С. Колокольников // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2013. – № 2 (37). – С. 3 – 6.
9. Маликова, Т. Е. Модель массового обслуживания импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования [Текст] / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко, И. Н. Вольнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова / Гос. ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – СПб. – 2017. – Т.9. – № 2. – С. 280 – 287.
10. Имитационная модель в порту Тамань [Текст] / А. Л. Кузнецов, И. М. Русу и др. // Морские порты / М.: Морские вести России. – 2013. – № 7 (118). – С. 34 – 38.
11. Хабаров, В. И. Создание имитационной модели движения поездов с использованием мультиагентного и дискретно-событийного подходов на примере Западно-Сибирской железной дороги [Текст] / В. И. Хабаров, К. В. Красникова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 143 – 154.

12. Покровская, О. Д. Исследование эволюции транспортных узлов как логистических объектов [Текст] / О. Д. Покровская // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 146 – 158.

13. Кузнецов, А. Л. Транспортный узел: к вопросу об организации деятельности [Текст] / А. Л. Кузнецов, Я. Я. Эглит, А. В. Кириченко // Транспорт Российской Федерации. – СПб: Т-Пресса – 2013. – № 1 (44). – С. 30 – 33.

14. Покровская, О. Д. Моделирование системы организации перевозочного процесса через терминальную сеть [Текст] / О. Д. Покровская // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 118 – 130.

15. Нагорный, Е. В. Имитационная модель процесса функционирования мультимодального транспортного узла [Текст] / Е. В. Нагорный, В. С. Наумов, Я. В. Литвинова // Железнодорожный транспорт Украины / Гос. науч.-исследоват. центр ж.-д. транспорта Украины. – Киев. – 2016. – № 1-2 (116-117). – С. 4 – 13.

16. Сорокин, А. А. Имитационная модель транспортного узла с режимом оптимизации параметров [Текст] / А. А. Сорокин, С. В. Яковлев, А. Ю. Орлова // Вестник СевКавГТИ / Ставропольский ун-т. – Ставрополь. – 2017. – № 4 (31). – С. 246 – 250.

17. Ташлыкова, А. И. Имитационное моделирование для оценки влияния факторов на продолжительность простоя груза в транспортном узле [Текст] / А. И. Ташлыкова // Междунар. науч.-исследоват. журнал. – Екатеринбург. – 2017. – № 12-5 (66). – С. 156 – 160.

References

1. Korol' R. G. Improving the technology of functioning of the Vanino-Soviet-Havana transport hub in the presence of a «dry port» [Sovershenstvovanie tekhnologii funktsionirovaniia vaninsko-sovetskogavanskogo transportnogo uzla pri nalichii «sukhogo-porta»]. *Molodye uchenye – khabarovskomu kraiu: materialy khvii kraevogo konkursa molodykh uchenykh i aspirantov* (Young scientists of the Khabarovsk territory : proceedings of the XVII regional contest of young scientists and graduate students). – Khabarovsk, 2015, pp. 219 – 224.

2. Belov A. A., Larin A. N. Assessment of the operational characteristics of the transport hub [Otsenka ekspluatatsionnykh kharakteristik transportnogo uzla]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 102 – 112.

3. Balalaev A. S. Organizational and technological problems of interaction of the railway and marine transport and direction of their decision [Organizatsionnotekhnologicheskie problem vzaimodeistviia zheleznodorozhnogo i morskogo transporta i napravleniia ikh resheniia]. *Transport Urala – Journal Transport of The Urals*, 2009, no. 3 (22), pp. 11 – 15.

4. Korol' R. G., Balalaev A. S. The technology functions of the Vladivostok transport hub in the presence of multimodal terminal «dry port» [Tekhnologii funktsionirovaniia vladivostokskogo transportnogo uzla pri nalichii multimodalnogo terminal «sukhoi-port»]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im admiral S. O. Makarova – Bulletin of Admiral Makarov state University of Maritime and river fleet*, 2014, no. 5 (27), pp. 92 – 101.

5. Korol' R. G., Danilenko P. V. *The certificate on the state registration of the computer program*. RU № 2014613827, 08.04.2014.

6. Korol' R. G. *Vzaimodeistvie razlichnykh vidov transporta v transportnom uzle pri nalichii terminala «sukhoi port» (na primere Vladivostokskogo transportnogo uzla)* (The interaction of different modes of transport in transport in the presence of the terminal «dry port» (on the example of Vladivostok transport hub). Doctor's thesis, Moscow, MIIT, 2015, pp. 22.

7. Korol' R. G., Balalaev A. S. Simulation of the system «railway station, the seaport» on the example of Vladivostok transport hub [Imitatsionnoe modelirovanie sistemy «zheleznodorozhnaiastantsiia – morskoi port» na primere vladivostokskogo transportnogo uzla]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im admiral S. O. Makarova – Bulletin of Admiral Makarov state University of Maritime and river fleet*, 2015, no. 3 (31), pp. 209 – 216.

8. Kozlov P. A., Permikin V. YU., Kolokol'nikov V. S. The automated creation of imitating models of large transport objects [Avtomatizirovannoe postroenie imitatsionnykh modelei krupnykh transportnykh obektov]. *Transport Urala – Journal Transport of The Urals*, 2013, no. 2 (37), pp. 3 – 6.

9. Malikova T. E., YAnchenko A. A., Vol'nov I. N. Model of mass service of import freight traffic with use of technology of preliminary informing [Model massovogo obsluzhivaniia importnogo gruzopotoka s primeneniem tekhnologii predvaritelnogo informirovaniia]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im admiral S. O. Makarova – Bulletin of Admiral Makarov state University of Maritime and river fleet*, 2017, no. 2, pp. 280 – 287.

10. Kuznetsov A. L., Rusu I. M., Goryntsev M. N., Prokopovich S. N., Korshunova A. M. A simulation model of the port of Taman [Imitatsionnaia model v portu Taman]. *Morskie porty – Journal «Seaport»*, 2013, no. 1 (44), pp. 30 – 33.

11. Khabarov V. I., Krasnikova K. V. Creation of imitating model of train service with use of multiagentny and discrete and event approaches on the example of West Siberian Railway [Sozdanie imitatsionnoi modeli dvizheniia poezdov s ispolzovaniem multiagentnogo i diskretnosobytninogo podkhodov na primere zapadnosibirskoi zheleznoi dorogi]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 3 (31), pp. 143 – 154.

12. Pokrovskaya O. D. Research of evolution of transport hubs as logistic objects [Issledovanie evoliutsii transportnykh uzlov kak logisticheskikh obektov]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 2 (30), pp. 146 – 158.

13. Kuznetsov A. L., Eglit YA. YA., Kirichenko A. V. Transport hub: to a question of the organization of activity [Transportnyi uzel k voprosu ob organizatsii deiatelnosti]. *Transport Rossiyskoy Federatsii - Journal «Transport of the Russian Federation»*, 2013, no. 1 (44), pp. 30 – 33.

14. Pokrovskaya O. D. Modeling of system of the organization of transportation process through terminal network [Modelirovanie sistemy organizatsii perevozochnogo protsessa cherez terminalnuu set]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, no. 1 (29), pp. 118 – 130.

15. Nagorniy, E. V., Naumov V. S., Litvinova YA. V. Imitating model of process of functioning of the multimodal transport hub [Imitatsionnaia model protsessa funktsionirovaniia multimodalnogo transportnogo uzla]. *Zheleznodorozhnyy transport Ukrainy - Journal «Railway transport of Ukraine»*, 2016, no. 1 - 2 (116 – 117), pp. 4 – 13.

16. Sorokin A. A., YAKovlev S. V., Orlova A. YU. Imitating model of the transport hub with the mode of optimization of parameters [Imitatsionnaia model transportnogo uzla s rezhimom optimizatsii parametrov]. *Vestnik SevKavGTI – Bulletin SevKavGTU*, 2017, no. 4 (31), pp. 246 – 250.

17. Tashlykova A. I. Imitating modeling for assessment of influence of factors on duration of idle time of freight in the transport hub [Imitatsionnoe modelirovanie dlia otsenki vliianiia faktorov na prodolzhitel'nost' prostoia gruzov v transportnom uzle]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal – The international research journal*, 2017, no. 12 – 5 (66), pp. 156 – 160.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Король Роман Григорьевич

Дальневосточный государственный университет
путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Рос-
сийская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технология транспортных процессов и логистика»,
ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Гарлицкий Евгений Игоревич

Дальневосточный государственный университет

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Korol Roman Grigorievich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian
Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the de-
partment «Technology of Transport Processes and Logis-
tics», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-76-28.

E-mail: kingkhv27@mail.ru

Garlitskiy Evgeniy Igorevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортных процессов и логистика», ДВГУПС.

47, Serysheva st., Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Technology of Transport Processes and Logistics», FESTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Король, Р. Г. Оценка пропускной способности Ванинского транспортного узла с помощью имитационного моделирования [Текст] / Р. Г. Король, Е. И. Гарлицкий // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 3 (35). – С. 144 – 155.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Korol R. G., Garlitskiy E. I. Assessment of capacity of the Vanino transport hub by means of imitating modeling. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 3, no 35, pp. 144 – 155 (In Russian).

Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: izvestia_transsiba@mail.ru.

Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания

статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм); размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются. Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 3 (35) 2018

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-71514 от 1 ноября 2017 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Михалева С. С.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 05.11.2018.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 05.11.2018.

