



**Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Самарское региональное отделение Российской академии транспорта
Куйбышевская железная дорога – филиал
ОАО «Российские железные дороги»
Муниципальное предприятие городского округа Самара
«Самарский метрополитен им. А.А. Росовского»
ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения»
(ПривГУПС)**

ИННОВАЦИИ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

**МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, ПОСВЯЩЁННОЙ
50-ЛЕТИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА
И 50-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ «АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»**

ТОМ 1

Самара, 24–25 сентября 2026 г.

**Самара
2026**

УДК 656.2:[62-52+621.3]
ББК 39.217-06
И 66

И 66 **Инновации в системах обеспечения движения поездов** : сборник научных статей Международной научно-практической конференции, посвящённой 50-летию электротехнического факультета и 50-летию кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Том 1. Самара, 24–25 сентября 2026 г. – Самара : ПривГУПС, 2026. – 185 с.

ISBN 978-5-98941-407-9

Межвузовский сборник трудов содержит материалы результатов научных исследований и современные достижения учёных, отражающие приоритеты инновационных технологий транспортной отрасли страны. Сборник трудов предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами исследования, разработкой, внедрением и эксплуатацией устройств и технологий для железнодорожного транспорта.

УДК 656.2:[62-52+621.3]
ББК 39.217-06

ISBN 978-5-98941-407-9

© ПривГУПС, 2026
© Коллектив авторов, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

- С. А. Блинкова. К юбилею электротехнического факультета: наследие прошлого – фундамент будущих вызовов 6
- Е. М. Тарасов. Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»: от классических систем к киберфизической реальности железных дорог 10

СЕКЦИЯ 1. Интеллектуальные системы управления и обеспечение безопасности движения поездов. Телекоммуникационные и информационные системы и технологии на транспорте

- Н. Р. Аблизина. Синтез интеллектуальных систем управления и телекоммуникационных технологий как основа повышения уровня безопасности железнодорожного движения 17
- Д. М. Ахмеров. Роботизированный комплекс для автономной установки тормозных башмаков 21
- М. В. Башаркин. Разработка интерактивных лабораторно-исследовательских стендов для изучения двухпроводной схемы управления стрелочным электроприводом 24
- Н. И. Григоренко. Интегрирование систем связи и транспортных систем при навигации транспортного средства 29
- Н. И. Григоренко. Телекоммуникационные технологии при управлении автономным транспортом 37
- Е. И. Елина. Влияние выбора корректируемых выходов на характеристики схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов для устройств железнодорожной автоматики 42
- Д. В. Ефанов. Система непрерывного мониторинга мостового сооружения на участке Выходной – Кола Октябрьской железной дороги 46
- Т. Б. Ефимова, А. В. Овод. Разработка структуры хранения данных для приложения «цифровой ПЭК» для автоматизации производственного экологического контроля 49
- А. Г. Исайчева, А. В. Заводовский, А. А. Астапенкова. Результаты тестового обучения искусственного интеллекта при апробации программы «ИИ-эксперт СЦБ» для автоматизированного анализа диагностических данных 51
- Г. Г. Киселев, С. В. Коркина. Интегрированный подход к повышению безопасности движения на железнодорожных переездах с применением информационных технологий 53
- Л. В. Козиенко, П. Н. Коношанов. Спектральный анализ акустических сигналов системы воздушного охлаждения сетевого коммутатора 56
- В. С. Кузьмин, А. Н. Токарев. О подходах к оценке влияния надёжности каналов связи на работу гибридных систем регулирования движения поездов 63
- А. А. Лиенко, Т. С. Зайцева. Тише едешь, дальше будешь: полный гид по выбору сетевых протоколов для транспортных IoT-устройств 68

В. А. Надежкин, С. А. Надежкина. Влияние топологии сети на скорость передачи данных о состоянии напольного оборудования ЖАТ	72
В. А. Надежкин, П. А. Данилина. Бесконтактное устройство контроля схода подвижного состава	75
А. П. Припутников, Т. Б. Шокиров. Повышение отказоустойчивости систем связи поездов за счет динамического переключения между радиointерфейсами (LTE, 5G, WI-FI, DMR)	77
Е. М. Тарасов. Использование интеллектуальных алгоритмов в киберфизических системах ЖАТ	83
Е. М. Тарасов, К. А. Бочков, Н. С. Степнова. Принцип построения рельсовой цепи с параметрической адаптацией к изменению проводимости изоляции	87
А. Е. Тарасова, Н. С. Степнова. Обеспечение инвариантности к сопротивлению изоляции рельсовых цепей двухчастотным питанием рельсовых линий	89
С. А. Федосов. IoT-платформа для мониторинга объектов ЖД-инфраструктуры: архитектура и управление данными	93
Р. Р. Юсупов, А. Азизов, А. С. Хохрин. Анализ допустимых уровней гармонических помех в канале АЛС-ЕН при их воздействии на приёмник со схемой ШОУ	95
СЕКЦИЯ 2. Повышение эффективности электротехнических систем и комплексов	
А. Р. Алан, А. И. Зотова, А. В. Кацай, Э. А. Чамагуа, В. М. Шевлюгин. Использование солнечной генерации на гибридной тяговой подстанции постоянного тока	100
М. В. Башаркин, А. И. Гурьянов, Н. А. Исайчева. Разработка методики исследования нагрева дроссельных перемычек с использованием беспилотного летательного аппарата	105
С. В. Белецкий, В. А. Гречишников, С. В. Оганов, М. В. Шевлюгин, Р. В. Щеглов. Распределенная система питания собственных нужд от тяговой сети постоянного тока	107
С. В. Белецкий, В. А. Гречишников, С. В. Оганов, М. В. Шевлюгин, Р. В. Щеглов. Тепловой накопитель энергии в системе тягового электроснабжения железных дорог для утилизации избыточной энергии рекуперации	111
С. А. Блинкова, А. В. Скольский. Переход к предиктивной диагностике изоляторов контактной сети с применением БПЛА	115
А. С. Борисенко, В. Л. Незевак. Разработка элементов модели вольтодобавочного устройства тяговой подстанции постоянного тока в SimInTech	118
М. А. Гаранин, А. Н. Митрофанов, А. Н. Потейко. Идентификация пропускной способности тяжеловесных поездов по условиям электроснабжения	123
А. Д. Зарубин, Д. В. Игнатко, К. Р. Зеленский, Р. О. Черемных, Л. Л. Буитрон Карпио. Программное обеспечение для контроля состояния элегаза, находящегося в элегазовом оборудовании	128

Н. С. Козлова, К. А. Филиппов, Н. А. Понырко. Перспективы внедрения современных гибридных солнечных панелей на железных дорогах РФ	131
О. Н. Козменков, Ю. Н. Фёдорова. Автоматизация контроля жизненного цикла, специальной одежды и средств индивидуальной защиты в хозяйстве электрификации и электроснабжения на базе RFID-технологий	134
А. П. Куцый, И. Н. Леонов, В. А. Рудоминский, И. В. Щелоков, В. А. Яковлев. Разработка программного модуля для тепловизионного и инфракрасного контроля состояния высоковольтного оборудования	143
А. П. Припутников, Н. С. Рагулин. Автоматизация проектирования силовых преобразователей: подход на основе машинного обучения	146
Е. Ю. Пузина, Д. В. Игнатко, К. Р. Зеленский. Применение управляемых шунтирующих реакторов для регулирования напряжения в ЛЭП 220 кВ	149
В. С. Саблин, А. Г. Исайчева, Л. Б. Смирнова. Определение действующего значения тягового тока в рельсовых нитях	153
И. А. Сафронова, Е. В. Добрынин. Методика обоснования местоположения и параметров тяговых подстанций при электрификации участка постоянного тока	155
И. А. Сафронова. Комплекс предиктивной аналитики для системы электроснабжения железных дорог	158
А. С. Тамбатамба, М. В. Шевлюгин, Ф. Н. Нам, Т. А. Салахов. Оценка потенциала угольной энергетики Замбии: поддержка электрификации железных дорог, снижение дефицита электроэнергии и внедрение мер по ограничению выбросов	161
Н. Л. Топорова. Влияние теплового режима контактного провода на интенсивность его износа в системах тягового электроснабжения постоянного тока	168
Т. В. Харитонов, В. Ф. Путько. Анализ потенциала использования RFID-меток в диагностике секционных изоляторов	170
Т. В. Харитонов, С. И. Гусева, М. Ю. Варфоломеева. Влияние развития систем диагностики на отказы устройств контактной сети	173
М. В. Шевлюгин, Ф. Н. Нам, А. С. Тамбатамба, Т. А. Салахов. Электрификация и инфраструктурные решения для метрополитена Ханоя: технико-экономический анализ эстакадного и подземного исполнения	176
М. В. Шевлюгин, Д. В. Семенова, А. А. Куликов, А. М. Хлопков. Оценка влияния противо-ЭДС электроподвижного состава на параметры моделирования тяговой сети переменного тока	182

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 378.4

К ЮБИЛЕЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА: НАСЛЕДИЕ ПРОШЛОГО – ФУНДАМЕНТ БУДУЩИХ ВЫЗОВОВ

С. А. Блинкова

Приволжский государственный университет путей сообщения

История развития родного учебного заведения всегда интересна студентам, коллегам и абитуриентам. Им важно знать, как сохраняются традиции, с чего всё начиналось, как достигались результаты и как сложились судьбы выпускников.

Сегодня, в юбилейный для факультета год, мы вновь обращаемся к истории университета – от КИИТа через СамИИТ, СамГАПС и СамГУПС к ПривГУПС – и прослеживаем, как в меняющихся условиях формировалась его структура и совершенствовалась подготовка кадров для российских железных дорог и транспортной отрасли в целом. Более чем пятидесятилетний путь университета подтверждает необходимость и востребованность специалистов, подготовленных в университете [1, 2].

Запрос в Центральный государственный архив Самарской области позволил уточнить дату организации факультета. Электротехнический факультет был создан приказом Куйбышевского института железнодорожного транспорта от 22 июля 1976 г. № 104 «Об организации новых кафедр и электротехнического факультета» (рис. 1). В пункте 1 приказа указано: с 1 августа 1976 г. организовать электротехнический факультет; в пункте 8 установлено, что факультет осуществляет подготовку по специальности № 1603 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». В его состав вошли следующие кафедры:

- «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»;
- «Электрическая тяга поездов»;
- «Теоретические основы электротехники и электроники»;
- «Физика»;
- «Физическое воспитание и спорт и подготовительное отделение».

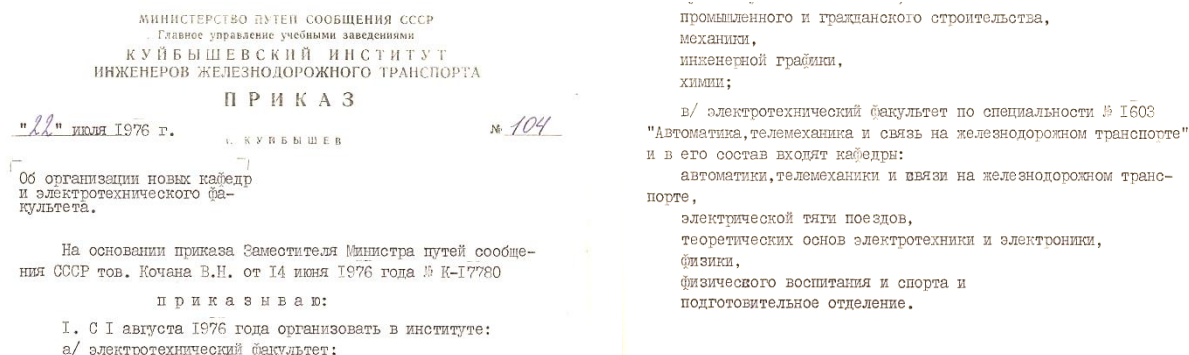


Рис. 1. Фрагменты приказа КИИТа об организации факультета

Первым деканом был назначен кандидат технических наук Анатолий Матвеевич Веселов. В том же году факультет одержал победу в социалистическом соревновании. На фотографии победителей запечатлены декан факультета и студенты кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» (рис. 2). Электротехнический факультет и кафедра АТС были организованы в один день одним приказом и уже 50 лет они развиваются вместе, поэтому все юбилейные мероприятия, в том числе конференция «Инновации в системах обеспечения движения поездов», проводятся в честь юбилея и факультета, и кафедры.



Рис. 2. Победители социалистического соревнования 1976 г.

На фото: декан ЭТФ Анатолий Матвеевич Веселов со студентами кафедры АТС.

Первый выпуск факультета по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» (АТС) состоялся в 1979 г. Одним из показателей качества подготовки традиционно являлось количество дипломов с отличием. Динамика числа выпускников факультета, окончивших обучение с отличием, представлена на рис. 3.

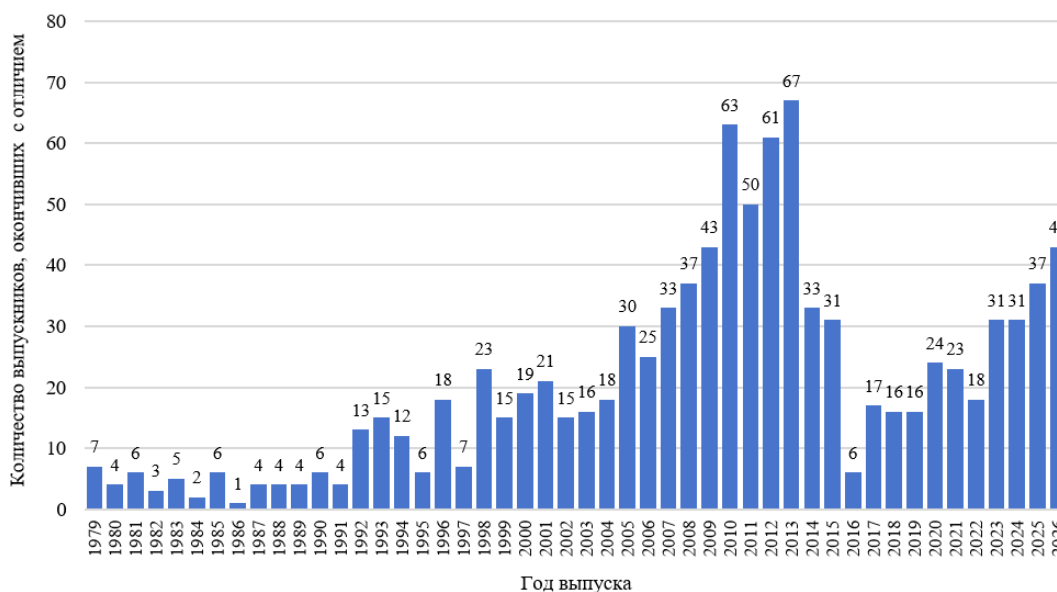


Рис. 3. Количество выпускников электротехнического факультета, получивших дипломы с отличием

Подготовка высококвалифицированных специалистов – это труд, требующий единения усилий и неподдельной самоотдачи как со стороны руководства, так и всего коллектива. Руководители вуза и факультета в хронологической последовательности представлены на рис. 4 [3].

Руководители ВУЗа		Руководители ЭТФ	
1973 - 1984	○ Павлович Е.С.	1976 - 1977	○ Веселов А.М.
1984 - 1990	○ Копейкин С.В.	1977 - 1984	○ Будников В.Ф.
1990 - 2000	○ Варгунин В.И.	1984 - 1989	○ Григорьев В.Л.
2000 - 2002	○ Левченко А.С.	1989 - 1990	○ Гуменников В.Б.
2000 - 2012	○ Ковтунов А.В.	1990 - 1991	○ Будников В.Ф.
2012 - 2013	○ Андрончев И.К.	1991 - 1999	○ Тарасов Е.М.
2013 - 2018	○ Железнов Д.В.	1999 - 2008	○ Смышляев В.А.
2018 - 2021	○ Андрончев И.К.	2008 - 2012	○ Путько В.Ф.
2021 - н.в.	● Гаранин М.А.	2012 - 2020	○ Тепляков В.Б.
		2020 - 2021	○ Комолов А.А.
		2021 - н.в.	● Блинкова С.А.

Рис. 4. Хронология руководителей вуза и электротехнического факультета

Развитие факультета во многом определялось открытием новых специальностей, кафедр, научных лабораторий и центров. В 1988 г. была открыта специальность «Электроснабжение железных дорог» (ЭСЖТ), в 2000 г. – «Информационные системы» (ИС), в 2007 г. – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Переименование факультета также было связано с изменением номенклатуры специальностей подготовки инженеров. В 2014 г. Учёный совет вуза утвердил новую структуру университета, в которой появился факультет «Системы обеспечения движения поездов» (СОДП).

В феврале 2022 г. факультету было возвращено историческое название – электротехнический факультет (ЭТФ). Ещё одним значимым событием, позволившим восстановить целостность и обеспечить гармоничное развитие коллектива, стало возвращение на факультет специальностей в сфере IT-технологий.

В настоящее время факультет объединяет следующие кафедры:

– «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»: специальность «Системы обеспечения движения поездов»; специализации «Автоматика, телемеханика на железнодорожном транспорте» и «Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта»; заведующий кафедрой – д. т. н., профессор Е. М. Тарасов;

– «Электроснабжение железнодорожного транспорта»: специальность «Системы обеспечения движения поездов»; специализация «Электроснабжение железнодорожного транспорта»; заведующий кафедрой – к. т. н., доцент Е. В. Добрынин;

– «Цифровые технологии»: программы бакалавриата «Информационные системы и технологии» и «Прикладная информатика»; программа магистратуры «Информационные системы и технологии»; заведующий кафедрой – к. э. н., доцент Т. Б. Ефимова;

– «Электротехника»: программа бакалавриата «Стандартизация и метрология»; заведующий кафедрой – к. т. н., доцент Т. В. Харитонов.

До сентября 2026 г. в составе факультета работала кафедра «Естественные науки», которой заведовал В. Т. Волон – д.т.н., д.социол.н., д.пед.н., д.э.н., д.физ-мат.н., профессор.

На кафедрах успешно функционируют научные школы профессора Е. М. Тарасова «Инвариантные и распознающие системы на железнодорожном транспорте», профессора А. Н. Митрофанова «Энергоэффективность транспортировки, распределения и использования энергетических ресурсов». Результативность их работы подтверждается защитами диссертаций, участием в международных научно-практических конференциях и научных проектах [4–6].

Внеучебная работа факультета представлена общественными объединениями: профсоюзной организацией сотрудников и студентов, строительными отрядами «1520», «Линия связи» и «Мегавольт», студенческим театром эстрадных миниатюр «Короткое замыкание», танцевальным коллективом «Парадокс» и студенческими научными кружками. В 2026 г. был организован новый студенческий отряд проводников «Импульс». В рамках проекта «Волжская рокада» его участниками стали более 80 человек.

На факультете создаются благоприятные условия для интересной и насыщенной событиями студенческой жизни. Формируется научное общество, объединяющее интересы студентов всех специальностей факультета и призванное популяризировать инженерное творчество. В эпоху быстро меняющихся технологий к выпускникам вуза предъявляются высокие требования, поэтому в стенах факультета студент может попробовать себя в разных ролях – от мастера по пайке микросхем до программиста микроконтроллеров – и решать при этом прикладные задачи диагностирования устройств автоматики или электроснабжения. В настоящее время апробируется интернет-платформа, предназначенная для объединения студентов по научным интересам и организации их участия в совместных проектах.

Для студентов, достигших высоких результатов в учебной, научной и общественной деятельности, организована доска почёта. В преддверии юбилея подготовлен журнал «Выдающиеся выпускники факультета». Профессорско-преподавательский состав кафедр помнит его героев как активных и успешных студентов. Первый выпуск журнала – лишь начало летописи о выпускниках факультета.

Факультет продолжает динамично развиваться: успешно работает аспирантура; в рамках научных школ готовятся докторские диссертации; ежегодно молодые учёные становятся победителями научных конкурсов и конкурсов стартап-проектов; студенты успешно участвуют в Олимпиаде дипломных проектов Росжелдора и Всероссийском инженерном конкурсе, получают грантовую поддержку ОАО «РЖД» и пр.

Автор выражает благодарность за помощь в подготовке материала выпускнику электротехнического факультета 2026 г. Максиму Кутенкову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский государственный университет путей сообщения. 50 лет в движении. – Самара: ООО «Слово», 2023. – 172 с.: ил.
2. 30 лет в пути: хроника, воспоминания, размышления / под ред. А. С. Левченко. – Самара: Самарская государственная академия путей сообщения, 2003.

3. Тепляков В. Б., Гуменников В. Б. Факультет и кафедра: сорок лет вместе // Инновации в системах обеспечения движения поездов: материалы Международной научно-практической конференции (Самара, 19–20 мая 2016 г.). – Самара, 2016. – С. 4–5.
4. Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». URL: <https://samats.ru/> (дата обращения: 20.06.2026).
5. Научная школа «Инвариантные и распознающие системы на железнодорожном транспорте». URL: <https://www.samgups.ru/science/nauchnye-shkoly/> (дата обращения: 20.06.2026).
6. Научная школа «Энергоэффективность транспортировки, распределения и использования энергетических ресурсов». URL: <https://www.samgups.ru/science/nauchnye-shkoly/> (дата обращения: 20.06.2026).

УДК 378.662.5:621.39(091)

КАФЕДРА «АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»: ОТ КЛАССИЧЕСКИХ СИСТЕМ К КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛЬНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Е. М. Тарасов

Приволжский государственный университет путей сообщения

История кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Приволжского государственного университета путей сообщения – это история инженерной мысли, тесно связанной с развитием железнодорожной отрасли, цифровых технологий, систем управления движением поездов и телекоммуникационной инфраструктуры. За долгое время своего становления кафедра АТС прошла путь от подготовки специалистов по классическим устройствам сигнализации, централизации, блокировки и связи до формирования современной научно-образовательной среды, в которой железнодорожная автоматика рассматривается как сложная киберфизическая система, а телекоммуникационные технологии – как основа квантово-защищённого цифрового информационного пространства транспорта будущего.

Начало истории кафедры связано с 1970-ми годами, когда железнодорожный транспорт остро нуждался в специалистах, способных работать с системами автоматики, телемеханики и связи. В 1973 году был осуществлён первый набор студентов по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Уже в 1976 году была организована одноимённая кафедра, которая стала одним из ключевых учебных и научных подразделений университета.

Значительный вклад в развитие кафедры внёс Гуменников Валерий Борисович, кандидат технических наук, доцент, Почетный работник высшего образования, возглавлявший кафедру АТС до 2020 года. С этим периодом также связаны имена Леушина Виталия Бениаминовича, кандидата технических наук, профессора, который непрерывно вовлекал студентов в научную работу, помогал оформлять заявки на регистрацию программ для ЭВМ и патенты, успешно руководил аспирантами; Харламовой Надежды Ивановны, доцента кафедры, содержательно раскрывавшей студентам основы работы телефонных станций; Федорова Николая Евгеньевича, кандидата технических наук, доцента, развивавшего направление рельсовых цепей и принимавшего участие в совершенствовании лабораторного

оборудования. Их труд стал важной частью истории кафедры и создал основу для последующего обновления образовательного и научного пространства.

С первых лет своего существования кафедра была ориентирована не только на передачу студентам фундаментальных знаний, но и на формирование практических инженерных компетенций. В учебных лабораториях создавались макеты, тренажёры и стенды устройств железнодорожной автоматики и связи, многие из которых разрабатывались и собирались силами сотрудников кафедры. Такой подход позволял будущим инженерам изучать оборудование не абстрактно, а через реальные технические процессы: движение поездов, работу станционных и перегонных систем, передачу информации, диагностику и обслуживание устройств.

Становление кафедры проходило в тесной связи с производством. Железная дорога всегда была и остаётся отраслью, где цена инженерной ошибки чрезвычайно высока. Поэтому подготовка специалистов по автоматике, телемеханике и связи изначально строилась вокруг главной профессиональной ценности – обеспечения безопасности и бесперебойности движения поездов.

В 1990-е годы кафедра активно развивалась вместе с отраслью и существенно расширила направления подготовки, открылись специализации «Системы передачи информации», «Микропроцессорные информационно-управляющие системы», «Волоконно-оптические системы передачи информации». Соответственно, расширялась лабораторная база, появлялись новые учебные пространства, внедрялись персональные ЭВМ.

Этот этап стал важным переходом от классической электромеханической и релейной автоматики к цифровым технологиям. Железнодорожная отрасль постепенно насыщалась микропроцессорными устройствами, цифровыми каналами связи, компьютерными системами управления и диагностики. Кафедра не просто адаптировалась к этим изменениям – она включала новые технологии в образовательный процесс, готовя инженеров, способных работать с оборудованием разных поколений: от релейных систем до микропроцессорных комплексов.

Особым рубежом в современной истории кафедры стал 2020 год. Сегодня кафедра готовит специалистов по направлению «Системы обеспечения движения поездов» по двум ключевым образовательным программам: «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» и «Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта».

Эти два направления образуют единое инженерное пространство. Автоматика и телемеханика отвечают за управление движением поездов, безопасность, централизацию, блокировку и диагностику инфраструктуры. Телекоммуникационные системы обеспечивают передачу данных, связь, сетевое взаимодействие, цифровые каналы и информационную устойчивость транспортной системы. Вместе они формируют основу современной железной дороги – интеллектуальной, связанной, управляемой и защищённой.

Именно с этого времени начался новый этап развития: переосмыслилась сама философия подготовки инженеров, изменились педагогические практики, трансформировался системный подход к научной организации труда профессорско-преподавательского состава, поэтому учредителем вуза была поставлена задача быстрой адаптации к новым условиям подготовки специалистов. В этот период основной акцент в развитии научно-исследовательской базы кафедры и подготовке кадров высшей квалификации сделан на послевузовском образовании – аспирантуре и эффективном взаимодействии с индустриальными партнёрами. Назначение заведующим кафедрой АТС – это не только доверие руководства вуза, но и ответственность за формирование нового состава научно-

педагогических работников, создание новой научно-учебной лабораторной базы в соответствии с нотацией Индустрии 5.0, синхронизацию развития учебного процесса с цифровыми технологиями транспортного комплекса, подготовку компетентных специалистов для быстро меняющегося технического прогресса на железнодорожном транспорте.

Именно с этим этапом связана работа молодой команды аспирантов из выпускников, пришедших на кафедру с 2020 года, которая усиленно развивает научно-учебную лабораторную базу, непрерывно совершенствует навыки преподавания, принимает участие в международных и всероссийских конференциях: ныне они кандидаты технических наук, доценты Тарасова Анна Евгеньевна, Башаркин Максим Викторович, Надежкин Вадим Александрович, Бредун Илья Сергеевич, Хохрин Алексей Сергеевич, Надежкина Снежана Андреевна, старший преподаватель Душкин Анатолий Алексеевич. Их вклад позволяет соединить традиционную инженерную школу с современными цифровыми, сетевыми и диагностическими технологиями. За прошедшие шесть лет учебно-лабораторная база кафедры прошла коренную модернизацию, усилилась научная составляющая, расширилось взаимодействие с производственными подразделениями ОАО «РЖД» и индустриальными партнёрами.

Важным ориентиром для всей команды является признанная научная школа, которая сформировалась под руководством автора – победителя Всероссийского конкурса «Золотые Имена Высшей Школы» в номинации «За вклад в науку и высшее образование» в 2023 году, эксперта ВАК по транспорту, заместителя главного редактора журналов, входящих в списки ВАК и международные базы цитирования Web of Science, участника программных комитетов научно-практических конференций и пр. Путь молодой научно-педагогической команды по становлению кандидатами наук на кафедре выстроен по схеме: формирование результативного портфолио по направлению научных исследований до поступления в аспирантуру – победитель областного конкурса «Молодой ученый Самарской области» – победитель научного конкурса «УМНИК» – апробация разделов диссертации на ведущих международных научных конференциях – защита диссертации. За последние 4 года на кафедре защитили диссертации и стали кандидатами наук 6 аспирантов.

Главная идея современного развития кафедры заключается в том, что устройства железнодорожной автоматики и телемеханики больше нельзя рассматривать только как набор отдельных технических средств. Рельсовые цепи, стрелочные переводы, перегонные системы, каналы связи, диагностические комплексы, программные алгоритмы и человек-оператор образуют единую связанную среду. Эта среда имеет физическую часть, цифровую часть и интеллектуальный уровень принятия решений.

Именно поэтому современная кафедра АТС рассматривает устройства ЖАТ с позиции киберфизических систем.

В железнодорожной автоматике киберфизический подход особенно важен, т. к. устройства ЖАТ работают в реальной изменяющейся физической среде, включены в цифровую среду передачи сигналов и формирования диагностических данных и, взаимодействуя с другими системами, участвуют в принятии решений о безопасности движения.

Поэтому современный инженер должен понимать не только электрические схемы и принципы работы устройств. Он должен видеть систему целиком: физический объект, измерительные параметры, каналы передачи информации, алгоритмы обработки цифровых данных, программное обеспечение, диагностическую модель, риск отказа элемента и действия эксплуатационного персонала.

Такой подход меняет содержание инженерного образования. Студент изучает не только «как устроено устройство», но и «как оно ведёт себя в системе», «как распознать его состояние», «как спрогнозировать предотказ», «как поддержать принятие решения», «как защитить информацию», «как обеспечить устойчивость всей транспортной инфраструктуры».

Одним из ключевых научных направлений кафедры является развитие интеллектуальных методов анализа технического состояния устройств ЖАТ. Современная железнодорожная инфраструктура генерирует огромные объёмы данных: электрические параметры, сигналы, временные ряды, диагностические признаки, результаты измерений, журналы событий, сведения о режимах работы оборудования.

Задача современной науки – превратить эти данные в инженерно значимую информацию. Именно здесь особое значение приобретают системы поддержки принятия решений и методы распознавания образов.

Для железнодорожной автоматики распознавание образов – это не абстрактный раздел искусственного интеллекта, а практический инструмент диагностики. С его помощью можно классифицировать состояния оборудования, выявлять норму, предотказ и отказ, определять скрытые признаки деградации, анализировать динамику изменения параметров и прогнозировать развитие неисправности.

Системы поддержки принятия решений позволяют инженеру не оставаться один на один с большим массивом данных. Они помогают выделить наиболее информативные признаки, оценить вероятность неблагоприятного состояния, предложить варианты действий и повысить достоверность эксплуатационных решений. Для железнодорожной отрасли это особенно важно, поскольку речь идёт о безопасности движения, надёжности инфраструктуры и снижении рисков отказов.

Научные исследования кафедры в этой области связаны с диагностикой рельсовых цепей, распознаванием состояний токопроводящих и изолирующих стыков, анализом асимметрии тягового тока, предиктивной аналитикой и интеллектуальным мониторингом критических элементов инфраструктуры. Эти направления имеют практическую значимость для ОАО «РЖД» и отражают современный переход от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

Не менее важным направлением развития кафедры являются телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта. Исторически подготовка связистов была связана с изучением классических систем передачи информации: многоканальной связи, цифровых потоков, волоконно-оптических линий, коммутационных систем, IP-телефонии, локальных и глобальных сетей, радиосвязи и сетевых технологий.

Сегодня это направление выходит на новый уровень. Железнодорожная связь становится не только средством передачи данных, но и основой цифровой устойчивости критической инфраструктуры. В условиях роста объёмов информации, развития распределённых систем управления, автоматизации перевозочного процесса и цифровизации железных дорог особое значение приобретает защита данных.

Поэтому история телекоммуникационных систем на кафедре АТС сегодня рассматривается не только через призму классической теории передачи информации, но и через перспективу квантовой защиты информации. Квантовые технологии и квантово-криптографические методы открывают новые возможности для построения защищённых каналов связи, устойчивых к перспективным угрозам цифровой эпохи.

Для железнодорожного транспорта это направление имеет стратегическое значение. Управление движением поездов, передача технологической информации, взаимодействие

между объектами инфраструктуры, диспетчерское управление и корпоративные сети требуют не просто высокой скорости и надёжности, но и принципиально нового уровня информационной безопасности.

Таким образом, телекоммуникационная подготовка на кафедре развивается от изучения аппаратуры связи к пониманию защищённой цифровой экосистемы железных дорог.

Современное развитие кафедры АТС органично связано с идеями V промышленной революции, или Индустрии 5.0. Если Индустрия 4.0 была сосредоточена на цифровизации, автоматизации, больших данных и интеллектуальных технологиях, то Индустрия 5.0 делает следующий шаг – возвращает в центр системы человека, его ответственность, компетенции и способность принимать осмысленные решения на основе данных.

Для железнодорожного транспорта это особенно актуально. Даже самые совершенные алгоритмы, датчики и цифровые платформы не отменяют роли инженера. Напротив, они требуют нового типа специалиста – инженера, который умеет работать на стыке автоматики, телемеханики, связи, программирования, анализа данных, кибербезопасности и эксплуатационной практики.

Кафедра АТС формирует именно такого специалиста. Выпускник кафедры должен понимать физику работы устройств, владеть цифровыми инструментами, уметь анализировать техническое состояние оборудования, работать с сетевыми технологиями, применять методы поддержки принятия решений и осознавать значение информационной безопасности.

Это уже не инженер узкого профиля, который знает только один тип устройства. Это системный специалист, способный видеть железную дорогу как сложный киберфизический организм.

За последние шесть лет кафедра существенно обновила материально-техническую базу. Современные лаборатории кафедры – это не просто учебные аудитории, а действующие инженерные полигоны, где студенты получают навыки, максимально приближенные к реальным задачам отрасли.

По направлению телекоммуникационных систем развиваются лаборатории пакетной коммутации, цифровых коммутационных центров, многоканальной связи, формирования потоков E1, сетевого моделирования и конфигурирования. Студенты работают с программными эмуляторами сетей, изучают маршрутизацию, коммутацию, построение подсетей IPv4, принципы IP-телефонии и цифровых телефонных станций.

Телекоммуникационный блок в образовательном процессе раскрывается через несколько взаимосвязанных дисциплин и практических направлений. Одним из ключевых направлений является технология пакетной коммутации, с которой работает кандидат технических наук, доцент Тарасова Анна Евгеньевна. Коммутационные центры и модульная архитектура оборудования изучаются под руководством кандидата технических наук, доцента Хохрина Алексея Сергеевича, теоретическую основу передачи сигналов обеспечивает кандидат технических наук, доцент Юсупов Руслан Рифович, а дисциплины многоканальной связи преподаёт старший преподаватель Душкин Анатолий Алексеевич. Отдельные вопросы организации связи также сопровождает в учебном процессе старший преподаватель Шалаева Татьяна Владимировна.

По направлению автоматики и телемеханики активно используется интегрированный учебно-лабораторный комплекс станционных и перегонных систем. В образовательном процессе задействованы элементы блочной маршрутно-релейной централизации, электрической централизации ЭЦ-12, микропроцессорной централизации МПЦ-МПК,

микропроцессорных систем автоблокировки, числовой кодовой автоблокировки, а также стенды и модели для изучения рельсовых цепей.

Направление автоматики и телемеханики выстраивается вокруг комплексного изучения устройств ЖАТ: кандидат технических наук, доцент Исайчева Алевтина Геннадьевна ведёт дисциплины по измерениям и электромагнитной совместимости в устройствах ЖАТ; кандидат технических наук, доцент Башаркин Максим Викторович – по станционным системам ЖАТ; кандидат технических наук, доцент Надежкин Вадим Александрович – по перегонным системам ЖАТ; кандидат технических наук, доцент Засов Валерий Анатольевич – по микропроцессорным информационно-управляющим системам. Практические работы по станционным системам автоматики и телемеханики ведёт преподаватель кафедры Веляева Карина Сергеевна.

Особенность современной лабораторной базы заключается в том, что она служит не только для обучения, но и для исследований. На её основе можно моделировать неисправности, формировать диагностические признаки, проводить эксперименты, проверять алгоритмы, отрабатывать методы поиска и устранения инцидентов, разрабатывать элементы предиктивной аналитики.

Особое место занимают дисциплины, объединяющие фундаментальную подготовку, цифровое моделирование и эксплуатационную практику, так, алгоритм преподавания дисциплины «Рельсовые цепи» организован через призму теории электрических цепей, распознавания и классификации образов и отражается в преподавании последующих дисциплин у преподавателей:

кандидат технических наук, доцент Бредун Илья Сергеевич – математическое моделирование и предиктивная аналитика;

кандидат технических наук Надежкина Снежана Андреевна – передача диагностической информации на железнодорожном транспорте по ВОЛС;

кандидат технических наук, доцент Павлович Виталий Евгеньевич – дисциплины менеджмент; метрология, фундаментальную основу которой сформировал кандидат технических наук, доцент Волик Вадим Георгиевич.

Вопросы технической эксплуатации устройств ЖАТ рассматриваются при участии старшего преподавателя Смирновой Ларисы Борисовны.

Таким образом, лаборатории кафедры становятся пространством, где учебный процесс, научная работа и производственные задачи соединяются в единую систему.

Одной из сильных сторон кафедры всегда была связь с железнодорожной отраслью. Кафедра взаимодействует с производственными подразделениями ОАО «РЖД», Самарской дирекцией связи, службами автоматики и телемеханики, промышленными партнёрами и выпускниками, которые сегодня занимают ответственные должности в транспортных и телекоммуникационных организациях.

Такое взаимодействие позволяет кафедре понимать реальные запросы отрасли. Модернизация лабораторий, тематика выпускных квалификационных работ, научные проекты, практические занятия и исследовательские разработки ориентированы не на отвлечённые задачи, а на реальные проблемы эксплуатации: повышение надёжности устройств ЖАТ, диагностика предотказных состояний, автоматизация контроля, развитие телекоммуникационной инфраструктуры, защита информации, подготовка специалистов для цифровой железной дороги.

Кафедра активно вовлекает студентов в научную и проектную деятельность. Участие в конкурсах, конференциях, олимпиадах, грантовых программах и инновационных проектах

помогает будущим инженерам не только освоить учебный материал, но и почувствовать себя частью профессионального сообщества.

Современная кафедра АТС – это сочетание традиций и обновления. С одной стороны, кафедра бережно сохраняет инженерную культуру старшего поколения преподавателей, опыт подготовки специалистов и фундаментальную базу железнодорожной автоматики и связи. С другой стороны, за последние годы заметно усилилась молодая научная команда, которая активно развивает новые направления исследований.

Кафедра объединяет докторов и кандидатов технических наук, доцентов, старших преподавателей, преподавателей, аспирантов и сотрудников лабораторий. Особое значение имеет развитие научной школы, функционирующей на кафедре, связанной с инвариантными и распознающими системами в ЖАТ, информационно-измерительными системами, интеллектуальной диагностикой и обработкой данных.

Молодые преподаватели кафедры ведут исследования, защищают кандидатские диссертации, представляют проекты для отрасли, работают со студентами и участвуют в модернизации образовательного процесса. Благодаря этому кафедра развивается не только административно, но и содержательно: обновляются подходы, темы исследований, лабораторные практикумы, дипломное проектирование и научные кружки.

Достижения молодых преподавателей органично дополняют признание кафедры в целом: в 2024 году кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» была отмечена как лучшая среди кафедр ПривГУПС, показав высокие результаты в учебной, научной и организационной работе.

Сегодня кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» ПривГУПС – это не просто выпускающая кафедра. Это центр инженерных компетенций, где соединяются история железнодорожной автоматики, современные телекоммуникации, интеллектуальная диагностика, киберфизические системы, поддержка принятия решений, распознавание образов и перспективные технологии защиты информации.

Её развитие отражает общий путь железнодорожной отрасли: от релейных схем к микропроцессорным системам, от отдельных устройств к цифровым платформам, от ручного контроля к интеллектуальному мониторингу, от классической связи к защищённым квантовым телекоммуникационным сетям, от традиционного инженерного образования к подготовке специалистов Индустрии 5.0.

Главная ценность кафедры – в способности соединять фундаментальность и современность. Здесь студенты изучают классические основы автоматики, телемеханики и связи, но одновременно осваивают новые цифровые технологии, методы анализа данных, сетевое моделирование, диагностику, прогнозирование и кибербезопасность.

Будущее железных дорог требует инженеров нового поколения – думающих, ответственных, системных, способных принимать решения в условиях неопределённости и работать с технологиями, которые ещё недавно казались перспективой далёкого будущего. Именно таких специалистов готовит кафедра АТС ПривГУПС.

Кафедра, которая начиналась с классических устройств железнодорожной автоматики и связи, сегодня уверенно движется к киберфизической реальности транспорта будущего. И в этой реальности главная роль принадлежит человеку – инженеру, исследователю, преподавателю, студенту, выпускнику, который соединяет традиции железной дороги с интеллектуальными технологиями новой эпохи.

Соавторы: Павлович В.Е., Исайчева А.Г., Юсупов Р.Р., Надежкина С.А., Тарасова А.Е., Башаркин М. В., Надежкин В. А., Бредун И. С., Смирнова Л. Б., Шалаева Т. В., Душкин А. А.

СЕКЦИЯ 1

Интеллектуальные системы управления и обеспечение безопасности движения поездов. Телекоммуникационные и информационные системы и технологии на транспорте

УДК 629.067

СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КАК ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Н. Р. Аблизина

АТЖТ – филиал ФГБОУ ВО ПривГУПС

Введение. Железнодорожный транспорт является одной из наиболее сложных и ответственных технических систем, от бесперебойной работы которой зависят жизнь и здоровье миллионов людей, а также экономическая безопасность государства. В условиях стремительного роста интенсивности перевозок, увеличения скоростей движения и усложнения инфраструктуры традиционные системы управления и обеспечения безопасности достигают своих предельных возможностей. Китай построил и эксплуатирует крупнейшую в мире сеть высокоскоростных железных дорог и городского рельсового транспорта [10]. Однако с постоянным расширением масштабов сети и ростом сложности эксплуатационной среды существующие автоматизированные системы управления движением поездов сталкиваются с проблемами повышения эффективности и адаптивности и всё меньше отвечают требованиям безопасной и эффективной работы в условиях высокоплотного движения [9].

Выход видится в принципиально новом подходе – синтезе интеллектуальных систем управления и передовых телекоммуникационных технологий [7]. Интеллектуальные системы управления, интегрированные с современными средствами связи, позволяют перейти от реактивного управления к прогнозному, от изолированных подсистем – к единому информационному пространству, от ручного контроля – к автоматизированному мониторингу в реальном времени [13].

1. Телекоммуникационные технологии как фундамент безопасности

Телекоммуникационная инфраструктура выступает не просто каналом передачи данных, а активным компонентом системы обеспечения безопасности. Современные требования к железнодорожной связи включают высокую пропускную способность, минимальную задержку, высокую надёжность и защищённость от внешних воздействий [6].

Переход на технологии пакетной передачи данных, в частности на базе стандартов Carrier Ethernet, позволяет унифицировать транспортную сеть и обеспечить масштабируемость. Особое значение приобретают технологии 5G. Как отмечается в исследованиях, с ускорением процесса интеллектуализации рельсового транспорта традиционные системы бортовой связи в среде высокоскоростного движения сталкиваются с частыми конфликтами доступа, нестабильностью переключения и слабой защищённостью [15]. Проектирование систем железнодорожной связи на базе 5G включает оптимизацию

параметров управления доступом, распределение ресурсов восходящего канала, сжатие окна переключения и привязку ключей безопасности.

Внедрение технологии «5G+UPF» позволяет эффективно решать проблемы безопасности и своевременности передачи служебных данных железнодорожного транспорта. Кроме того, активно развивается применение высокоточного спутникового позиционирования на базе системы «Бэйдоу», которое усиливает автоматизацию манёвровой работы и автопилотирование, позволяя эффективно обеспечивать защиту манёвров и исключать такие опасные ошибки, как неправильный маршрут, неверное восприятие сигналов и ошибочные действия [10].

Важным направлением является также исследование технологий безопасности бортовой связи на базе общедоступных сетей для тяжеловесных поездов. Предлагаются решения с использованием технологий виртуальных частных сетей в сочетании со средствами кибербезопасности, обеспечивающие низкую стоимость, высокую эффективность и полную защиту связи между поездом и землёй [14].

2. Интеллектуальные системы управления движением

Автономное управление движением поездов представляет собой комплексную технологию, объединяющую восприятие окружающей обстановки, низколатентную и высоконадёжную связь, автономное управление поездом и интеллектуальное диспетчерское управление [1]. Ожидается, что такие системы обеспечат безопасную и эффективную работу поездов в сложных условиях.

Ключевые технологические направления включают:

- комплексное восприятие – интеграция данных от множества сенсоров (радары, камеры, спутниковая навигация, датчики на инфраструктуре) [4];
- низколатентная и высоконадёжная связь – обеспечение передачи критически важных данных в реальном времени;
- автономное управление в сложных условиях – принятие решений без участия человека в штатных и нештатных ситуациях [3];
- интеллектуальное диспетчерское управление – оптимизация графика движения и распределение ресурсов [8].

Прорывным направлением является технология виртуальной сцепки (Virtual Coupling). Традиционные системы управления поездами достигли предела по интервалам движения и пропускной способности [11]. Групповые системы управления блок-участками, основанные на беспроводной связи и динамическом управлении, позволяют реализовать плотное следование поездов на перегонах и эффективный приём-отправление на станциях [2].

В январе 2026 года в Китае успешно прошли испытания первого в мире состава тяжеловесных групповых поездов массой 35 000 тонн. Семь составов по 5000 тонн двигались с использованием технологии «виртуальной мягкой сцепки», автоматически работая без физического соединения, сохраняя точное безопасное расстояние. Это стало возможным благодаря тому, что поезда общаются друг с другом через беспроводную связь, реализуя интеллектуальное следование. По расчётам, данная технология может повысить общую пропускную способность тяжеловесных железных дорог более чем на 50% [10].

3. Интеграция технологий: синергия связи и управления

Истинная ценность синтеза раскрывается при объединении телекоммуникационных и интеллектуальных компонентов в единую систему [7]. Практическими примерами такой интеграции служат:

Система интеллектуального наблюдения и предотвращения столкновений LFK. Данная система интегрирует оптические, микроволновые, телекоммуникационные сигналы, высокоточное позиционирование по системе «Бэйдоу» и технологии искусственного интеллекта для многомодального восприятия. Благодаря передовым алгоритмам ИИ и визуальному распознаванию система обеспечивает точное выявление различных препятствий перед поездом – пешеходов, автомобилей, животных, а также селей, затоплений пути и даже мелких предметов. Система способна своевременно оповещать и вмешиваться в управление поездом [3].

Интеллектуальная автоматизированная система пассажирских транспортных узлов. Эта система впервые реализовала интеграцию технологий 5G с диспетчерским управлением высокоскоростных железных дорог [15]. Высокоточная технология «Бэйдоу» усилила автоматизацию манёвров и автопилотирование, обеспечивая защиту манёвров и исключая неправильные маршруты [10]. Система также впервые применила технологию цифровых двойников в управлении узлами: для различных профессиональных объектов создаётся единая цифровая карта, в которую в реальном времени поступают данные о положении поездов, состоянии сигнальных устройств и высокоточная информация позиционирования, что предоставляет диспетчерам платформу визуализации и основу для принятия решений [7].

Интеллектуальная система диспетчерского управления на сети железных дорог. На примере Сианьского управления Китайских железных дорог построена система из 20 608 камер видеонаблюдения и 60 специализированных информационных систем, включая системы видеонаблюдения, записи диспетчерских переговоров, бортовые видео-аудиосистемы, системы микропроцессорного контроля и системы мониторинга посторонних предметов [2]. Это позволяет перейти от реагирования «после случившегося» к предотвращению «до возникновения» [12].

4. Обеспечение кибербезопасности

С развитием IP-ориентированных сетей вопросы кибербезопасности приобретают критическое значение. Диспетчерская связь является ключевой службой управления движением, и безопасность её данных напрямую влияет на безопасность перевозок [14]. Сети 5G-R являются IP-сетями, где служебные данные передаются в открытом виде, что создаёт риски подделки, перехвата и модификации.

В этой связи активно внедряются:

- криптографические алгоритмы национального стандарта для шифрования служебной информации;
- технологии виртуальных частных сетей для изоляции критического трафика;
- средства обязательного контроля доступа на уровне ядра операционной системы [14].

Важно отметить, что системы управления движением относятся к уровню целостности безопасности SIL4 (Safety Integrity Level 4) – высшему уровню требований к безопасности согласно международным стандартам CENELEC [5]. Протоколы безопасной передачи данных должны обеспечивать SIL4, что предъявляет особые требования к архитектуре и реализации систем связи [11].

5. Проблемы и направления развития

Несмотря на значительный прогресс, существуют следующие вызовы:

Интерференция внешних сетей. Внешнее воздействие на сети GSM-R может приводить к смене режима управления высокоскоростными поездами с CTCS-3 на CTCS-2, создавая риски для безопасности [6].

Сложность интеграции разнородных систем. Объединение унаследованных систем с новыми интеллектуальными решениями требует значительных инвестиций и тщательного проектирования архитектуры [7].

Кибербезопасность. Рост числа подключённых устройств увеличивает поверхность атак и требует постоянного совершенствования средств защиты [14].

Перспективные направления развития включают:

- Полностью автономное управление без участия человека в круглосуточном режиме [1];
- Динамические самоорганизующиеся сети связи между поездом и землёй [15];
- Интеллектуальное диспетчерское управление на основе ИИ [8];
- Цифровые двойники всей инфраструктуры [7].

Заключение. Синтез интеллектуальных систем управления и телекоммуникационных технологий является не просто технологическим трендом, а стратегическим направлением повышения безопасности на железнодорожном транспорте [12]. Объединение высоконадёжных сетей связи на базе 5G, высокоточного спутникового позиционирования «Бэйдоу», искусственного интеллекта и цифровых двойников позволяет создать систему, способную не только реагировать на сбои, но и предотвращать их на этапе прогнозирования [13].

Практическая реализация этого подхода уже демонстрирует впечатляющие результаты: от систем интеллектуального предотвращения столкновений и автоматизированных пассажирских узлов до прорывных технологий виртуальной сцепки тяжеловесных составов [3, 10]. Ключевыми направлениями дальнейшего развития остаются обеспечение кибербезопасности IP-сетей, стандартизация протоколов на уровне SIL4 и переход к полностью автономному управлению движением [5, 14]. Именно этот комплексный подход способен обеспечить тот уровень безопасности, который соответствует вызовам XXI века и растущим потребностям железнодорожного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксёнов, В. А. Интеллектуальные системы управления движением поездов: монография / В. А. Аксёнов, А. Н. Ефанов. – М.: ФГБОУ ВО «РУТ (МИИТ)», 2021. – 256 с.
2. Баранов, Л. А. Микропроцессорные системы автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте: учебник / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2020. – 320 с.
3. Васин, Н. Н. Обеспечение безопасности движения поездов на основе интеллектуальных технологий / Н. Н. Васин, В. И. Шишков // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 1. – С. 12–19.
4. Гапеев, С. Н. Методы и алгоритмы адаптивного управления движением поездов / С. Н. Гапеев, Д. А. Козлов. – СПб.: ПГУПС, 2022. – 184 с.
5. ГОСТ Р 58828–2020. Системы автоматизации управления движением поездов. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 28 с.
6. Дмитренко, И. А. Развитие систем интервального регулирования движения поездов на высокоскоростных магистралях / И. А. Дмитренко, П. В. Кузнецов // Железнодорожный транспорт. – 2024. – № 3. – С. 45–52.
7. Ефанов, А. В. Цифровая трансформация систем управления на железнодорожном транспорте: монография / А. В. Ефанов. – М.: РАН, 2023. – 340 с.
8. Жуков, А. В. Оценка эффективности применения нейросетевых моделей в системах управления движением / А. В. Жуков, И. Л. Королев // Автоматика и телемеханика. – 2025. – № 4. – С. 78–89.
9. Захаров, И. С. Адаптивные алгоритмы управления поездными потоками в условиях высокоплотного движения / И. С. Захаров, К. С. Марков // Интеллектуальные системы на транспорте. – 2022. – Т. 11, № 2. – С. 33–41.

10. Китай. Высокоскоростные железные дороги: опыт проектирования, строительства и эксплуатации / под ред. Ли Хуа. – Пекин: Изд-во ж.-д. транспорта КНР, 2023. – 512 с.
11. Коган, Д. А. Современные системы интервального регулирования движения поездов / Д. А. Коган, И. Б. Шубинский. – М.: Трансинфо, 2021. – 198 с.
12. Леонтьев, А. С. Повышение пропускной способности и безопасности на железных дорогах с помощью интеллектуальных систем управления / А. С. Леонтьев // Транспорт Российской Федерации. – 2023. – № 5. – С. 24–30.
13. Петров, В. А. Анализ и синтез систем управления движением поездов с применением методов искусственного интеллекта / В. А. Петров, С. И. Соколов. – Новосибирск: СГУПС, 2024. – 290 с.
14. Федоров, Е. В. Надежность и безопасность автоматизированных систем управления движением поездов / Е. В. Федоров, А. Г. Яшин // Проблемы безопасности на железнодорожном транспорте: сб. науч. тр. – СПб., 2025. – С. 15–26.
15. Яковлев, В. М. Перспективные технологии организации высокоскоростного движения / В. М. Яковлев, Е. А. Никонов // Железные дороги мира. – 2024. – № 2. – С. 10–18.

УДК 656.2+681.5+621.865.8

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОНОМНОЙ УСТАНОВКИ ТОРМОЗНЫХ БАШМАКОВ

Д. М. Ахмеров

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Введение. Железнодорожный транспорт является незаменимой частью транспортной инфраструктуры, однако технологические циклы его эксплуатации все еще связаны с выполнением операций повышенной опасности. К числу таких операций относится установка тормозных башмаков, которые применяются при торможении подвижного состава и его закреплении для предотвращения самопроизвольного ухода на участках с приведенным уклоном железнодорожного пути [1]. На данный момент установка тормозных башмаков может производиться двумя методами: с помощью полуавтоматических стационарных установок для укладки тормозных башмаков [2] или вручную с использованием специализированных вил [3]. Применение стационарных устройств позволяет минимизировать участие оператора в травмоопасных операциях, однако данные устройства снижают оперативность работы из-за необходимости демонтажа установки при изменении позиции торможения железнодорожного состава. Использование специализированных вил наоборот не исключает нахождение человека в потенциально опасной зоне при любых метеорологических условиях и не исключает человеческий фактор при выполнении укладки тормозных башмаков.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка роботизированного комплекса для автоматической укладки тормозных башмаков. Создание такого комплекса позволит полностью исключить присутствие человека в опасной зоне, уменьшить влияние человеческого фактора и обеспечить оперативное закрепление подвижного состава в сложных условиях железнодорожной инфраструктуры.

Архитектура роботизированного комплекса. На рисунке представлена схема роботизированного комплекса для укладки тормозных башмаков, включающая конструкцию и систему управления. Конструкция предложенного роботизированного комплекса состоит из модуля для хранения тормозных башмаков, манипулятора для укладки тормозных башмаков

и гусеничного шасси [4, 5]. Манипулятор имеет двухпальное захватывающее устройство с датчиками давления на концах пальцев для фиксации факта захвата объекта. Электроприводы для каждого пальца выполнены на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами, управляемых с помощью модели векторного управления. Данный тип двигателей позволяет развить высокий электромагнитный момент в широком диапазоне скоростей [6]. Для обеспечения энергоэффективности и развития достаточного тягового усилия при перемещении по поверхности с переменным рельефом вблизи железнодорожного полотна в качестве электродвигателя для гусеничного шасси также используется синхронный двигатель с постоянными магнитами с моделью векторного управления. Для автономной работы комплекс оснащен аккумуляторной батареей для электропитания всех функциональных и вычислительных подсистем.

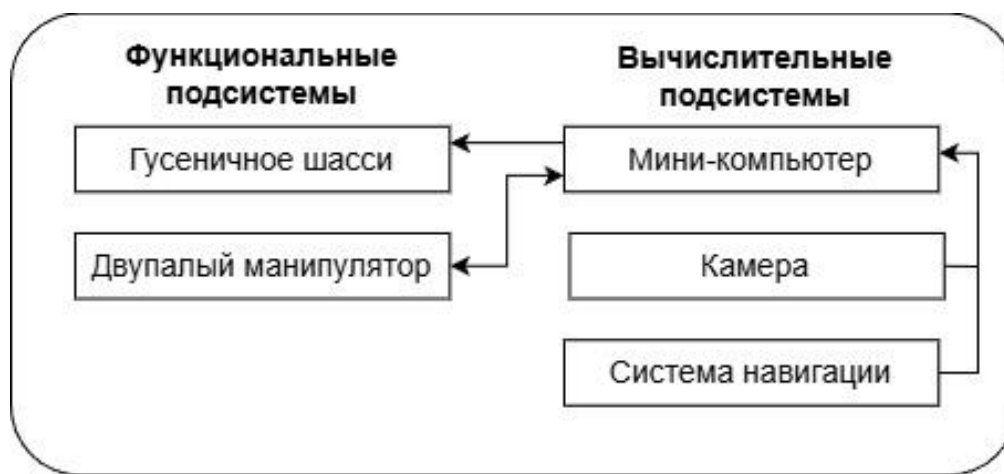


Рис. 1. Схема роботизированного комплекса для автономной установки тормозных башмаков

В целях интеграции в цифровую экосистему железнодорожной станции роботизированный комплекс оснащен мини-компьютером, который принимает и обрабатывает телеметрические данные о массогабаритных параметрах подвижного состава и текущих метеорологических условиях. На основе этой информации автоматически рассчитывается необходимое количество тормозных башмаков для закрепления подвижного состава. Пространственная ориентация и автономное перемещение комплекса реализуются с помощью подсистемы навигации. Позиционирование захватного устройства в зоне укладки обеспечивается с помощью бортовой камеры и алгоритмов компьютерного зрения. Это позволяет в режиме реального времени детектировать геометрические параметры колесной пары и рельсовой колеи, что гарантирует точную укладку тормозного башмака вне зависимости от внешних условий. Данные о выполнении технологических операций роботизированного комплекса могут автоматически передаваться в программные средства станционных комплексов перспективной адаптивной системы управления движением поездов с автоматическим учетом всех участников движения, что исключает ошибки, обусловленные человеческим фактором [7, 8].

Алгоритм работы роботизированного комплекса. Инициализация рабочего цикла начинается с того, что бортовой мини-компьютер роботизированного комплекса получает от системы управления железнодорожной станцией команду на выполнение операции закрепления, сопровождаемую телеметрическими данными о массогабаритных параметрах состава и его местоположении. На основании полученных данных система навигации формирует оптимальную траекторию перемещения автоматизированного комплекса к

колесной паре. После позиционирования комплекса в рабочей зоне манипулятор извлекает тормозной башмак из модуля хранения и осуществляет его укладку на рельс таким образом, чтобы носок полоза башмака касался обода колеса. Операции перемещения к колесной паре и укладки тормозного башмака повторяются для необходимого количества колесных пар. По завершении укладки автономный комплекс формирует и передает в систему управления локомотивом сигнал о готовности к выполнению наката колес подвижного состава на тормозные башмаки. После этого машинист производит управляемое перемещение состава до момента остановки на установленных тормозных башмаках.

Заключение. В рамках настоящего исследования сформирована концепция работы мобильного роботизированного комплекса для автономной укладки тормозных башмаков под железнодорожный подвижный состав. В предложенном техническом решении рассмотрена архитектура комплекса, включающая функциональные и вычислительные подсистемы, а также алгоритм его работы. Важнейшей особенностью разработанного комплекса является его интеграция в цифровую экосистему железнодорожной станции, что позволяет перевести процесс установки тормозных башмаков из разряда рутинных травмоопасных операций в категорию автоматизированных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобзев В. А. Развитие технических средств обеспечения безопасности станционных процессов: Учебное пособие / В. А. Кобзев. – М.: МИИТ, 2008. – 76 с.
2. Патент № SU 93237 A1. Полуавтоматический подкладыватель тормозных башмаков: заявл. 20.12.1950 : опубл. 30.11.1951 / К. И. Романко. – 4 с.
3. Шаталова О. В. Закрепление подвижного состава на железнодорожных путях станции / О. В. Шаталова, А. М. Вовк // Безопасность и охрана труда на железнодорожном транспорте. – 2017. – № 3.
4. Добрецов, Р. Ю. Принципы построения системы управления и алгоритмов управления электромеханической подвеской лесных и транспортных гусеничных машин / Р. Ю. Добрецов, Е. О. Забродкин, С. И. Матросов // Транспортные системы : Сборник трудов V Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–17 октября 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. – С. 196–203. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id25-581. – EDN WNHJRD.
5. Артемьев, А. В. Концепции модернизации систем управления движением гусеничных машин с бортовыми коробками передач / А. В. Артемьев, Р. Ю. Добрецов // Известия МГТУ МАМИ. – 2025. – Т. 19, № 4. – С. 226–232. – DOI 10.17816/2074-0530-691546. – EDN DIMEEL.
6. Derammelaere S. A quantitative comparison between BLDC, PMSM, brushed DC and stepping motor technologies / S. Derammelaere, M. Haemers, J. De Viaene, F. Verbelen, K. Stockman // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Chiba, Japan, 2016. – pp. 1–5.
7. Ефанов Д. В., Михайлюта Е. М. Управление надёжностью и безопасностью перевозочного процесса с применением систем непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Мир транспорта. – 2023. – Т. 21. – № 2 (105). – С. 84–94. – DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-10.
8. Ефанов Д. В., Михайлюта Е. М. Технологические основы разработки интеллектуальных систем управления движением поездов с тесно интегрированными безопасными комплексами мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Транспорт Российской Федерации. – 2025. – № 3. – С. 18–25.

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНЫХ ЛАБОРАТОРНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СТЕНДОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДВУХПРОВОДНОЙ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРЕЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

М. В. Башаркин

Приволжский государственный университет путей сообщения

Аннотация. Рассмотрены основные этапы развития лабораторно-исследовательской базы дисциплины «Станционные системы автоматики и телемеханики» в контексте пятидесятилетней истории кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Показана необходимость изучения дисциплины не только на высоком теоретическом уровне, но и с обязательным освоением практических навыков, что обусловлено многокомпонентностью станционных систем контроля и управления железнодорожной автоматики и телемеханики. На примере учебно-исследовательских стендов двухпроводной схемы управления стрелочным электроприводом продемонстрирована возможность перехода от наблюдения за работой схемы в различных технических состояниях к поиску и устранению отказов, а также к экспериментальным исследованиям для проведения научных работ обучающимися.

Введение. Дисциплина «Станционные системы автоматики и телемеханики» (ССАТ) наряду с дисциплинами «Автоматика и телемеханика на перегонах» и «Диспетчерская централизация» относится к числу дисциплин, формирующих профессиональные компетенции инженера путей сообщения по специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» (специализация «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте»). На протяжении 50 лет существования кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» дисциплина ССАТ входила в учебные планы специальностей «Автоматика, телемеханика и связь» и «Системы обеспечения движения поездов», а ее освоение предусмотрено на выпускных курсах. Такое положение дисциплины закономерно: именно к завершению обучения студент должен связать знания по электротехнике, теоретическим основам автоматики и телемеханики, эксплуатационным основам систем и устройств автоматики и телемеханики, основам теории надежности.

Станционные системы автоматики и телемеханики относятся к сложным человеко-машинным системам, в которых в едином алгоритме взаимодействуют постовая аппаратура управления и контроля, кабельные сети, стрелочные электроприводы, светофоры, станционные рельсовые цепи, устройства электропитания и средства отображения информации [1]. Отказ одного элемента, ошибка монтажа либо нарушение временной последовательности работы приборов могут изменить техническое состояние всей системы. Поэтому будущий инженер путей сообщения должен понимать не только назначение отдельных устройств, но и причины возникновения отказов и предотказных состояний, а также их последствия [2].

Лабораторно-исследовательская база в этих условиях выступает не вспомогательным приложением к лекционному курсу, а обязательным элементом подготовки. Принципиальная схема дает статическое представление о связях, тогда как интерактивный лабораторно-исследовательский стенд позволяет наблюдать процесс во времени, измерять электрические

параметры, воспроизводить различные режимы работы, проверять диагностические гипотезы и безопасно отрабатывать последовательность действий. Особенно важно, чтобы лабораторно-исследовательские стенды сохраняли физическую логику эксплуатируемых систем и одновременно обеспечивали возможность проведения измерений на участках, недоступных для непосредственного вмешательства на действующем объекте.

Основная часть. Начало системному формированию лабораторной базы положил Овчинников Владимир Алексеевич (1940–1991). При нем были разработаны первые стенды для изучения объектов станционных систем. Их принципиальное значение состояло в переходе от изображения схемы на бумаге к воспроизведению реальных зависимостей между релейной аппаратурой и управляемыми объектами. После В. А. Овчинникова дисциплину вел Суслин Виктор Константинович (17.11.1959–24.10.2023), обеспечивший дальнейшее совершенствование лабораторной и методической основы.

В начале 1990-х годов из Ташкента в Самару переехал Шумаков Владимир Митрофанович (10.01.1942–13.10.2021). К этому времени он имел более десяти лет опыта руководства факультетом «Автоматика, телемеханика и связь» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта (ныне – Ташкентский государственный транспортный университет) и такой же по времени практический опыт работы в должности главного инженера строительно-монтажного поезда. В 1981 г. В. М. Шумаков защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка методов технической диагностики устройств железнодорожной автоматики и телемеханики» под научным руководством одного из ведущих ученых в области станционных систем, заведующего кафедрой «Автоматика и телемеханика» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (ныне – Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I), доктора технических наук, профессора Владимира Владимировича Сапожникова. Сочетание глубины теоретических знаний и большого практического опыта В. М. Шумакова способствовало усилению практической и диагностической направленности лабораторных работ.



В. А. Овчинников
1940–1991



В. К. Суслин
1959–2023



В. М. Шумаков
1942–2021

Рис. 1. Ведущие преподаватели дисциплины ССАТ

Одними из неотъемлемых элементов станционных систем автоматики и телемеханики являются стрелочные электроприводы. Интегрированная учебно-исследовательская лаборатория станционных систем содержит 4 стенда для анализа работы схем управления

стрелочными электроприводами: двухпроводной схемы управления стрелочным электроприводом СП-6, пятипроводной схемы управления стрелочным электроприводом СП-6, пятипроводной схемы управления стрелочным электроприводом ВСП-150, семипроводной схемы управления стрелочным электроприводом СПГБ-4. Широкое распространение на сети железных дорог РФ благодаря минимальному количеству жил кабеля, используемых для управления и контроля, нашла двухпроводная схема управления стрелочным электроприводом [3].

Вместе с тем схема имеет значимые эксплуатационные недостатки: повышенная нагрузка на контакты пусковых реле при коммутации токов двигателя, повышенный износ щеточно-коллекторного узла электродвигателя, возникновение переходных процессов при неплотном контакте и ослабленных соединениях, а также риск появления ложного контроля при перепутывании линейных проводов Л1 и Л2 или неправильном включении выпрямительных элементов. Эти особенности делают схему методически ценной: обучающийся исследует не отдельное реле, а согласованную работу электрической, логической и электромеханической частей.

До модернизации учебно-исследовательский стенд двухпроводной схемы управления стрелочным электроприводом с пусковым блоком ПС-220 обеспечивал лишь визуальное наблюдение за работой элементов и измерение параметров в контрольных точках. Из-за высокой скорости процессов, протекающих при переводе стрелки, обучающийся восстанавливал последовательность работы элементов по схеме и световой индикации. Для устранения этого ограничения стенд дополнен восьмиканальным регистратором дискретных состояний, который позволяет построить временную диаграмму работы схемы (рисунок 2).



Рис. 2. Временные диаграммы работы двухпроводной схемы управления стрелочным электроприводом

Параллельно с цифровым дополнением учебно-исследовательского стенда разработана специализированная установка для исследования контрольной цепи. В ней сохранены источник питания, трансформатор СКТ-1, контрольное реле, блок диода и резистора (БДР), реле плюсового и минусового контроля, контакты автопереключателя. Установка позволяет снимать осциллограммы с помощью двухканального USB-осциллографа и выводить их на экран с диагональю 81 см (рисунок 3). Существует возможность имитации типовых отказов контрольной цепи с последующим анализом причин их возникновения и влияния на работу схемы [4].

Главный результат модернизации учебно-исследовательской базы заключается не в замене физического стенда цифровой моделью, а в создании условий для наглядного изучения процессов на реальном оборудовании в более доступном для восприятия формате. Благодаря этому сохраняется достоверность объекта исследования и одновременно появляется возможность анализировать быстротекущие процессы, сравнивать различные технические состояния и документировать результаты. Такой подход принципиально важен для инженерной подготовки: обучающийся убеждается, что применение модернизированного стенда не отменяет необходимости знания релейной логики и принципиальных схем, поскольку именно они служат основой для правильного выбора диагностических признаков и точек проведения измерений [5].



Рис. 3. Учебно-исследовательский стенд контрольной цепи двухпроводной схемы управления стрелочным электроприводом. Научный руководитель: М. В. Башаркин (на фото слева). Автор разработки: Д. Д. Сизганов (на фото справа)

Стенд для исследования работы контрольной цепи двухпроводной схемы управления стрелочным электроприводом расширяет диапазон экспериментов. В нормальном режиме студент сопоставляет положение тумблеров, имитирующих отказы, контактов автопереключателя, направление тока и срабатывание реле ПК или МК. В промежуточном положении контроль положения должен отсутствовать. Можно имитировать обрыв до и после БДР с последующей локализацией поврежденного участка, а также изменять сопротивление резистора и емкость конденсатора. В результате объектом анализа становится не внешняя индикация, а физическая причина изменения состояния схемы.

Модернизация учебно-исследовательских стендов позволяет усилить практическую основу проведения лабораторных работ. Ранее стенды решали задачу предметного знакомства с аппаратурой. Модернизированные стенды добавляют возможность исследования временных диаграмм, задания отказов, регулировки величины электрических параметров элементов с последующим анализом влияния на работу схемы в целом.

Следует отметить, что проведенные испытания подтверждают техническую работоспособность стендов, но не являются количественной оценкой педагогической эффективности. Для такой оценки требуется отдельный педагогический эксперимент:

сравнение результатов входного и итогового контроля, времени поиска заданных отказов, количества допущенных в ходе поиска отказа ошибок и устойчивости сформированных навыков. Вместе с тем уже полученные данные показывают, что стенд обеспечивает воспроизводимый измерительный эксперимент и создает необходимые условия для проведения такого исследования.

Модернизированная база может использоваться в нескольких взаимосвязанных формах учебной работы. На первом этапе студенты изучают назначение реле и самостоятельно строят предполагаемую временную диаграмму. На втором этапе выполняется перевод стрелки на стенде и регистрируются фактические состояния приборов. На третьем этапе расчетная и экспериментальная диаграммы сопоставляются, а расхождения объясняются с учетом времени срабатывания и отпускания реле, состояния контактов и выбранного масштаба регистрации. Такой порядок превращает готовый график из иллюстрации в результат проверки предварительной инженерной гипотезы.

Исследование работы контрольной цепи предусматривает следующую последовательность действий: сначала исследуют работу схемы в крайних положениях стрелки, затем в промежуточном. Далее преподаватель вводит одну неисправность, а студент локализует ее, проводя последовательные измерения. Карта диагностических признаков связывает внешнее проявление, вероятный участок, проверочное действие и ожидаемое подтверждение. Подобная организация исключает угадывание и формирует последовательный способ поиска отказа.

Заключение. В ходе работы проведен ретроспективный анализ формирования лабораторно-исследовательской базы кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». Показана необходимость внедрения интерактивных учебно-исследовательских стендов, которые становятся платформой для последовательного перехода от учебной работы к проектной и научно-исследовательской деятельности. Перспективным направлением дальнейшего развития является переход к углубленным исследованиям процессов, протекающих в двухпроводной схеме управления стрелочным электроприводом за счет дополнения стенда аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями, подключаемыми к персональному компьютеру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Станционные системы автоматики и телемеханики : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Вл. В. Сапожников, Б. Н. Елкин, И. М. Кокурин, Л. Ф. Кондратенко, В. А. Кононов; под ред. Вл. В. Сапожникова. – Москва : Транспорт, 2000. – 432 с.
2. Смирнова, Л. Б. Повышение безопасности движения поездов путем модернизации систем электрической централизации / Л. Б. Смирнова, М. В. Башаркин, Д. В. Железнов // Транспортное дело России. – 2026. – № 1. – С. 183–186.
3. Башаркин, М. В. Разработка прототипа измерительного контроллера дискретных параметров двухпроводной схемы управления стрелочным электроприводом / М. В. Башаркин // Вестник СамГУПС. – 2025. – № 3 (69). – С. 90–95.
4. Башаркин, М. В. Разработка имитатора стрелочного электропривода для исследовательского стенда системы автоматизированного управления движением поездов на станции / М. В. Башаркин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 7. – С. 219–222.
5. Башаркин, М. В. Повышение надёжности кабельной сети стрелочных электроприводов за счет комплексного диагностирования / М. В. Башаркин, И. Р. Харламов // Наука и образование транспорту. – 2025. – № 1. – С. 256–258.

ИНТЕГРИРОВАНИЕ СИСТЕМ СВЯЗИ И ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ПРИ НАВИГАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Н. И. Григоренко
ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»

Введение. В последние годы степень автоматизации интеллектуальных транспортных средств постепенно повышалась. Интеллектуальные транспортные средства позволяют в первую очередь снизить влияние человеческого фактора и вероятность дорожно-транспортных происшествий [1]. Планирование траектории движения интеллектуальных транспортных средств зависит от высокоточного позиционирования. Местоположение транспортного средства является важнейшей информацией при разработке систем навигации, помощи водителю и автономного вождения для интеллектуального транспорта [2]. Система ГЛОНАСС является важным методом определения местоположения транспортного средства, однако при наличии туннелей и других препятствий позиционирование может быть неточным или даже невозможным. Данный метод не в полной мере удовлетворяет растущие потребности в области автомобильной электроники с точки зрения точности локации. Сегодня важно изучать новые методы определения местоположения транспортных средств для развития интеллектуальных систем вождения и транспорта.

В настоящее время проводятся различные научные работы по разработке методов определения местоположения транспортных средств, которые включают в себя методы объединения данных с нескольких датчиков, коммуникацию в автомобильных сетях и искусственный интеллект. Решающее значение для автономной навигации в реальном времени имеет локализация в условиях недоступности сигналов глобального позиционирования, таких как ГЛОНАСС или GPS. Методология точного позиционирования транспортного средства представляет собой сложную задачу. Системы позиционирования используются для определения местоположения транспортных средств и людей. Точные координаты транспортного средства – очень важная информация не только для предотвращения дорожно-транспортных происшествий, но и для повышения эффективности спасательных операций и уменьшения заторов на дорогах; она также актуальна при развитии систем автоматического вождения и интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [3, 4].

Автономное позиционирование невозможно в отсутствие сигналов; автомобили не могут исключительно опираться на собственные датчики для определения своего местоположения. Телематические технологии со своим развитием позволили использовать данные о местоположении ближайших транспортных средств для улучшения или замены определения собственного местоположения.

С развитием компьютерных технологий методы искусственного интеллекта все чаще используются для определения местоположения транспортных средств. На рисунке 1 представлены различные методы определения местоположения транспортных средств. Методы машинного обучения считаются перспективными технологиями при развитии интеллектуального транспорта [5]. Методы совместной локализации сочетают в себе технологии ГЛОНАСС, при определении местоположения транспортного средства используют автомобильную сетевую связь и бортовые датчики.

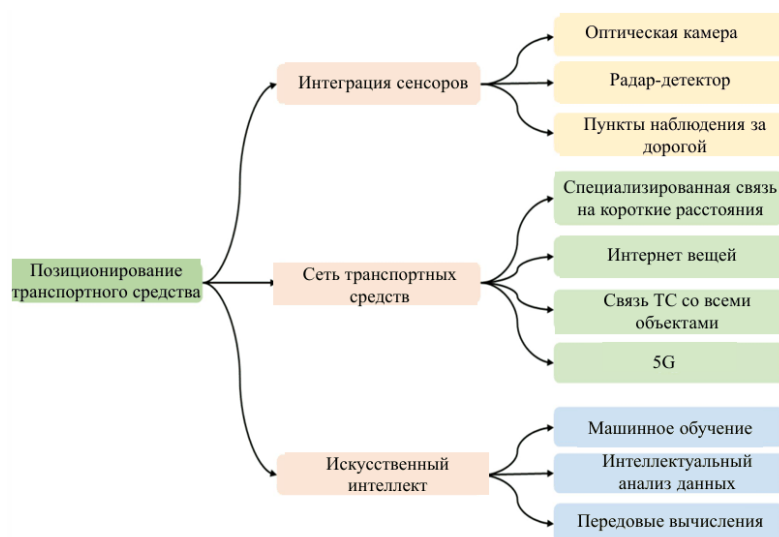


Рис. 1. Существующие методы определения локации транспортного средства

С точки зрения принципов функционирования ГЛОНАСС-позиционирования, его точности и надежности предлагается рассмотреть метод определения местоположения транспортных средств, основанный на комбинированном использовании ГЛОНАСС и автомобильной сетевой связи. Структура предлагаемой работы выглядит следующим образом:

1. ГЛОНАСС и автомобильная сетевая связь: комбинированное позиционирование для повышения точности и надежности определения местоположения.
2. Проверка сценария движения нескольких транспортных средств: моделирование сценария движения нескольких транспортных средств для проверки работы системы в условиях дорожного трафика.
3. Влияние прерывания связи: проверка точности определения местоположения при прерывании связи для оценки эффективности использования автомобильной сети.

Методология. Предложенная методология базируется на использовании глобальной навигационной спутниковой системы и автомобильной сети связи [6]. Для проверки эффективности метода было проведено кинематическое моделирование автомобиля. В среде моделирования была создана сцена движения и рассчитана погрешность позиционирования. Предлагаемая система совместного позиционирования нескольких транспортных средств состоит из трех модулей: ГЛОНАСС, радара миллиметрового диапазона и системы связи между транспортными средствами.

ГЛОНАСС – это система навигации и определения местоположения, использующая радиосвязь. К таким относятся все спутниковые навигационные системы, такие как GPS в США, ГЛОНАСС в России, Galileo в Европе и BeiDou в Китае. Они могут предоставлять информацию о трехмерных координатах, скорости и времени в любой точке земной поверхности или околоземного пространства. Эти три типа информации называются PVT (Position, Velocity and Time – «положение, скорость и время»). В рамках данной работы с помощью ГЛОНАСС можно получить информацию об абсолютном местоположении транспортного средства. Полученные координаты представляют собой широту и долготу на поверхности Земли, которые можно рассчитать и преобразовать в координаты на плоскости.

На рисунке 2 любое место на поверхности Земли имеет трехмерные координаты. Спутники ГЛОНАСС также имеют координаты. Расстояние между спутником и объектом позиционирования можно выразить в координатах как:

$$L = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}, \quad (1)$$

где известны координаты спутника, а координаты целевой точки неизвестны.



Рис. 2. Принцип спутникового позиционирования

Скорость передачи сигнала между спутником и точкой назначения можно принять за скорость света. Тогда расстояние между спутником и точкой назначения можно выразить как

$$L = (t - t') \cdot c, \quad (2)$$

где t – это спутниковое время и t' – время в целевой точке. Объединив два уравнения, получим

$$(t - t') \cdot c = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \quad (3)$$

На этом этапе для решения уравнения требуются значения координат трех других спутников. Для определения местоположения целевой точки на Земле требуется как минимум четыре спутника. В зависимости от количества приемников сигнала позиционирование может делиться на абсолютное и дифференциальное.

Результат. С помощью миллиметрового радара можно получить информацию об относительном положении окружающих транспортных средств по отношению к текущему транспортному средству. Это включает в себя данные о расстоянии и угле наклона окружающего транспортного средства по отношению к текущему, то есть о его положении в локальной системе координат.

К датчикам, которые обычно используются для мониторинга окружающей среды в «умных» автомобилях, относятся камеры, лидары, радары миллиметрового диапазона и ультразвуковые радары. Камера – это компонент, принцип работы которого основан на оптическом принципе [7]. При прохождении света через линзу он улавливается светочувствительным элементом и формирует изображение. Лидар выполняет обнаружение объектов и определение расстояния до них, излучая лазерные импульсы [8]. Лазер отражается от поверхности измеряемого объекта. Лидар может получать такие параметры, как время отражения сигнала и его мощность. Данная информация позволяет определить расстояние до цели, ее ориентацию, состояние движения и другие характеристики. Принцип работы радара миллиметрового диапазона схож с принципом работы лидара. Разница в том, что вместо лазера он излучает электромагнитную волну. Радар вычисляет расстояние по разнице во времени отражения электромагнитной волны и относительную скорость измеряемой цели на основе эффекта Доплера. Принцип работы ультразвукового радара схож с принципом работы лидара, генерируемый им сигнал является ультразвуковым [9]. Из-за различий в принципах работы вышеперечисленных датчиков сценарии их применения отличаются друг от друга. На рисунке 3 показан функционал датчиков и сценарии их применения.



Рис. 3. Датчики и сценарии их применения

Для беспроводной связи и обмена информацией между транспортными средствами, дорогами, пешеходами и интернетом предназначена автомобильная системная сеть. Она основана на внутриавтомобильных, межуровневых и внутриавтомобильных мобильных сетях и работает в соответствии с согласованными протоколами связи и стандартами взаимодействия данных. Она включает в себя уровень сбора данных, уровень сетевой передачи и уровень прикладных платформ, представляя собой интеллектуальную трехмерную архитектуру. Использование датчиков для получения информации и комплексного представления о дорожных условиях происходит на уровне сбора данных. Соединение инфраструктуры с уровнем прикладных платформ происходит через уровень сетевой передачи. Он обеспечивает передачу информации между различными субъектами. Функции управления и эксплуатации выполняются уровнем прикладных платформ. Он способен решать различные задачи, например, управление дорожным движением и контроль безопасности.

Основные узлы автомобильной сетевой связи представлены на рисунке 4. Автомобильная сетевая связь может осуществляться на основе специализированной связи малого радиуса действия (DSRC) или сетей 5G, что позволяет передавать информацию между транспортными средствами. Это также два основных технических направления в современных стандартах автомобильной сетевой связи: DSRC и сотовая связь «автомобиль – всё» (C-V2X). DSRC обладает такими техническими характеристиками, как эксклюзивная полоса пропускания и малый радиус действия. C-V2X обеспечивает преимущества в плане пропускной способности, задержки, управляемости и алгоритмов защиты от помех [10]. При совместном позиционировании, когда сигнал ГЛОНАСС отсутствует, транспортное средство без сигнала может установить связь с другими транспортными средствами, у которых сигнал есть, через автомобильную сеть. Положение транспортного средства без сигнала можно определить по положению окружающих его транспортных средств с нормальным сигналом.

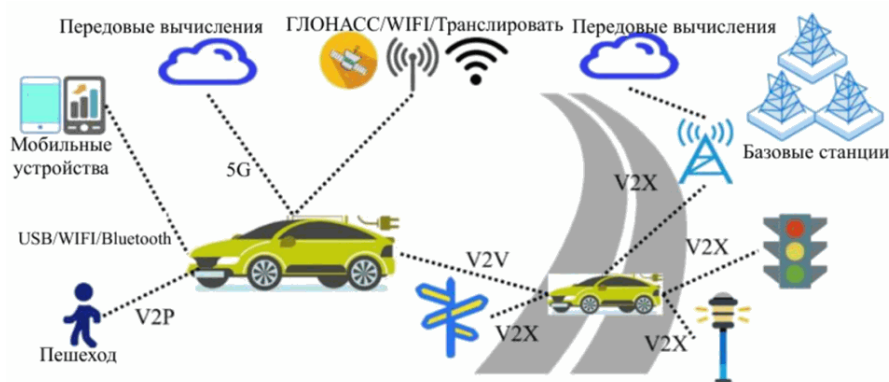


Рис. 4. Архитектура автомобильной сетевой связи.

Интерес представляет показанный способ совместного позиционирования нескольких транспортных средств (рис. 5). Модуль ГЛОНАСС получает информацию об абсолютном местоположении транспортного средства с помехами. С помощью фильтров для обработки сигналов можно получить грубую оценку местоположения на основе данных, полученных от самого транспортного средства. Система связи между транспортными средствами передает эту грубую оценку местоположения другим транспортным средствам поблизости. В сочетании с информацией об относительном местоположении, получаемой с помощью радара миллиметрового диапазона, это позволяет осуществлять совместную локализацию нескольких транспортных средств.

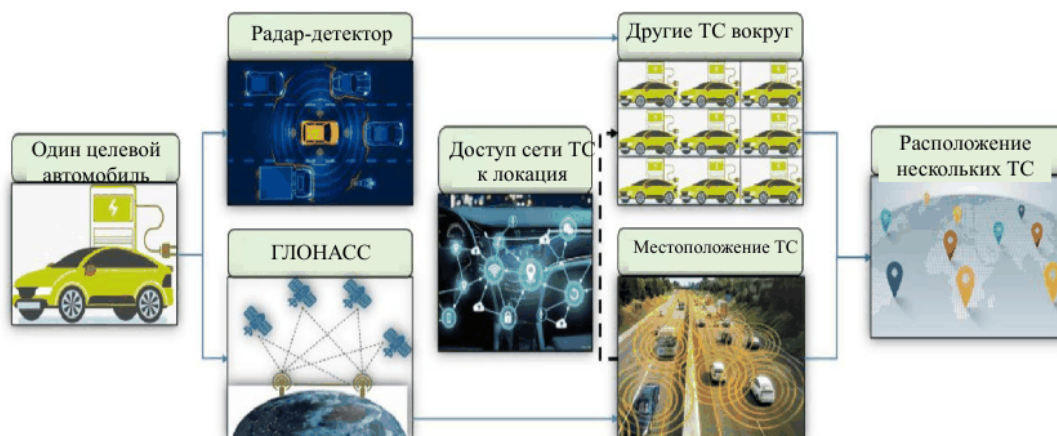


Рис. 5. Процесс совместного позиционирования нескольких транспортных средств

Четыре транспортных средства (А, Б, В и Г) соединены между собой. Каждое транспортное средство может определять свое местоположение с помощью глобальной навигационной спутниковой системы. Транспортные средства могут взаимодействовать друг с другом через автомобильные сети, обмениваясь информацией о своем местоположении с другими транспортными средствами. Транспортное средство может определять свое относительное положение в пределах определенного расстояния с помощью радара миллиметрового диапазона. На основе полученной информации транспортное средство может определить свое местоположение, а также местоположение других транспортных средств вокруг себя. Взаимосвязь между транспортными средствами показана на рисунке 6а.

Результаты. Определение местоположения транспортного средства с помощью относительного позиционирования. При совместной локализации нескольких транспортных средств одно из них выбирается в качестве целевого для упрощения исследования и

повышения точности представления данных. Сигнал ГЛОНАСС фильтруется для получения результата оценки местоположения этого транспортного средства [11]. Результаты передаются ближайшим транспортным средствам через автомобильную сеть. В то же время транспортное средство может определять положение ближайших транспортных средств относительно себя с помощью радара миллиметрового диапазона. Зная расстояние между целью радара и окружающим транспортным средством, можно определить положение этого транспортного средства.



Рис. 6. а – Взаимосвязь между транспортными средствами;
б – Модель движения транспортного средства

Положение этого транспортного средства определяется на основе математического аппарата и относительного расстояния до другого транспортного средства. Для проверки эффективности метода был смоделирован сценарий движения нескольких транспортных средств. Продолжительность каждого моделирования составляет 30 секунд, а размер шага – 0,1 секунды. Проводилось моделирование линейного движения транспортных средств. Сценарий движения включает две полосы. Ширина полос составляет 3,75 м (магистральная улица общегородского значения), на каждой полосе по пять транспортных средств. Транспортные средства движутся по осевой линии своих полос. На скоростной полосе транспортные средства движутся со скоростью 50 км/ч на расстоянии 80 м друг от друга. На разгонной полосе транспортные средства движутся с начальной скоростью 30 км/ч на расстоянии 50 м друг от друга, как показано на рисунке 7а. После начала моделирования, при $0 < t < 10$ с, первый автомобиль на обеих полосах движется в соответствии с кривой ускорения, показанной на рисунке 7б. При $t > 10$ с первый автомобиль на обеих полосах движения сохраняет равномерное линейное движение. При моделировании движения учитываются колебания скорости транспортных средств при линейном движении и изменение положения окружающих транспортных средств с течением времени.

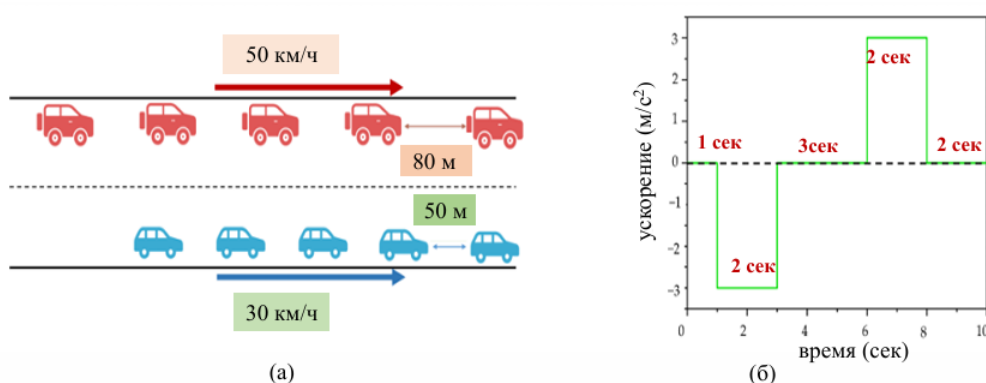


Рис. 7. а – Сценарий моделирования движения по прямой; б – Кривая изменения ускорения

Рассмотрим сценарий моделирования при смене полосы движения. Сценарий движения включает две полосы. Ширина полос составляет 3,75 м, на каждой полосе по пять автомобилей. Транспортные средства движутся по осевой линии своих полос. Начальная скорость на обеих полосах – 30 км/ч, расстояние между автомобилями № 4 и № 5, а также между автомобилями № 6 и № 7 – 100 м. Расстояние между передней и задней частью других автомобилей – 50 м, как показано на рис. 8а.

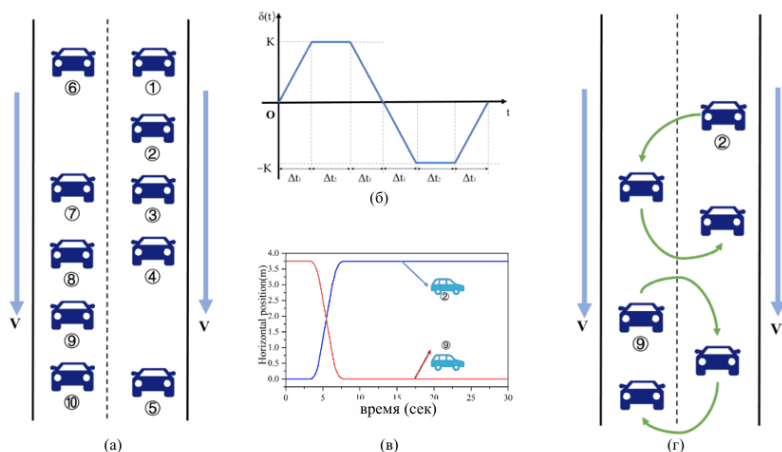


Рис. 8. а – Сценарий моделирования перестроения; б – Модель угла поворота при перестроении; в – Кривая бокового положения при перестроении; г – Автомобиль 2 и автомобиль 9 при моделировании перестроения, время (сек)

После запуска симуляции автомобили 2 и 9 выполняют маневр перестроения на участке $3 \text{ с} < t < 8 \text{ с}$, в то время как остальные транспортные средства продолжают двигаться равномерно по прямой. Угол поворота при перестроении показан на рис. 8б. Предположим, что транспортное средство имеет линейную модель с двумя степенями свободы, постоянной продольной скоростью и небольшим угловым смещением курса. При упрощении модели движения с учетом скорости предполагается, что угол бокового отклонения равен нулю. Соответствующая кривая смены полосы движения показана на рис. 8в. На рис. 8г показаны автомобили 2 и 9 при моделировании смены полосы движения. При $9 \text{ с} < t < 19 \text{ с}$ первая машина на обеих полосах движется так же, как на рис. 7б: «равномерная скорость – равномерное замедление – равномерная скорость – равномерное ускорение – равномерная скорость». Остальные восемь машин движутся по линейной модели «погоня за хвостом».

Общий радар миллиметрового диапазона обеспечивает более высокую точность определения продольного положения, чем точность определения поперечного положения, при этом дальность обнаружения составляет от 100 до 200 м. В этой среде моделирования предполагается, что радар может обнаруживать транспортные средства в радиусе 100 м, при этом местоположение транспортного средства принимается за центр круга. Поперечные и продольные погрешности определения относительного положения подчиняются нормальному распределению со стандартным отклонением. Данные обновляются каждые 0,1 секунды.

Точность определения местоположения с помощью спутниковой навигации обычно составляет около 10 м, в то время как точность определения скорости гораздо выше. В моделировании предполагается, что система глобального позиционирования может определять абсолютное местоположение и скорость транспортного средства. Поперечные, продольные и угловые погрешности направления движения подчиняются нормальному распределению.

В симуляции предполагается, что транспортное средство может получать информацию о местоположении от других транспортных средств в радиусе 100 м, при этом местоположение собственного транспортного средства принимается за центр круга. Для проверки эффективности метода совместного определения местоположения при нестабильной связи предполагается, что связь прерывается в период от 20 до 25 секунд. Не все транспортные средства имеют доступ к информации об абсолютном местоположении других транспортных средств. В остальное время все транспортные средства отправляют и получают сообщения каждые 0,1 секунды.

Выводы. Рассмотрен метод совместного определения местоположения, основанный на ГЛОНАСС и связи по сети транспортного средства. Точное определение местоположения транспортного средства играет важную роль в интеллектуальном вождении и перевозках. В случае помех или недостаточного количества спутников точность определения местоположения с помощью глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) значительно снижается. Для устранения проблем нелокализации из-за отсутствия сигналов ГЛОНАСС предложена схема совместной локализации нескольких транспортных средств на основе ГЛОНАСС и автомобильных сетей.

Целевое транспортное средство сначала получает информацию о своем местоположении через ГЛОНАСС, а затем передает ее находящимся поблизости транспортным средствам по сети связи. Целевое транспортное средство может корректировать свои координаты, сверяясь с информацией о других машинах и реальной обстановке вокруг. Сценарий движения нескольких транспортных средств был разработан для проверки эффективности данного метода. Применение технологии совместного позиционирования для нескольких транспортных средств обеспечивает большую точность, чем одиночная локализация с помощью ГЛОНАСС. Среднеквадратическая погрешность позиционирования может быть снижена до уровня менее 0,5 м. Данное исследование проводилось в среде моделирования, и эффективность метода была подтверждена результатами симуляции. Ограничением работы является отсутствие проверки на реальных транспортных средствах, что станет направлением наших будущих исследований. С развитием интеллектуальных транспортных систем информация о местоположении автомобиля становится важным параметром, определяющим его состояние во время движения. В данной статье рассматривается роль сетевых коммуникаций в определении местоположения автомобиля. В ближайшем будущем этот подход можно будет применять для точного позиционирования реальных транспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проказин Д. Л. Интеллектуальные транспортные системы (ITS): исследование возможностей применения ITS для управления потоками, мониторинга дорожной ситуации и повышения безопасности дорожного движения // Безопасность дорожного движения. 2025. № 2. С. 6–10.
2. Григоренко, Н. И. Восприятие окружающей среды автономным транспортом при интеграции датчиков / Н. И. Григоренко // Современные тенденции развития транспортной отрасли: Материалы III Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 21–22 апреля 2026 года. – Нижний Новгород: ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», 2026. – С. 283–288. – EDN WHZCAN.
3. Миронюк В. П., Анненков А. В. Анализ технологий, обеспечивающих позиционирование высокоавтоматизированных транспортных средств // Дороги и мосты. 2024. № 52/2. С. 233–261.
4. ГОСТ Р 70249-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы искусственного интеллекта на автомобильном транспорте. Высокоавтоматизированные транспортные средства. Термины и определения. М.: ФГБУ «РСТ», 2022. – 16 с.

5. Обзор использования технологий машинного обучения в обеспечении информационной безопасности данных: настоящее и будущее / А. К. Доргушаова, В. А. Довгаль, Н. Ш. Козлова, Р. С. Козлов // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. : Естественно-математические и технические науки. 2024. Вып. 1 (336). С. 51–59. DOI: 10.53598/2410-3225-2024-1-336-51-59
6. Григоренко, Н. И. Интеграция инновационных технологий в развитии транспортной инфраструктуры / Н. И. Григоренко // Транспортный бизнес и логистика: актуальные аспекты развития: Сборник тезисов IV Всероссийской научно-практической конференции, Самара, 17–19 февраля 2026 года. – Самара: ООО «САМАРАМА», 2026. – С. 94–96. – EDN EЕКСQТ.
7. Haider, A.; Hel-Or, H. What Can We Learn from Depth Camera Sensor Noise? Sensors 2022, 22, 5448.
8. Шибаев, В. М., Зуев, М. А., & Баланев, К. С. (2024). Технология LiDAR в автономных транспортных средствах. Информатика. Экономика. Управление – Informatics. Economics. Management, 3(2), 0219–0225. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2024-3-2-0219-0225>
9. Vargas, J.; Alsweiss, S.; Toker, O.; Razdan, R.; Santos, J. An overview of autonomous vehicles sensors and their vulnerability to weather conditions. Sensors 2021, 21, 5397
10. Архитектура сети V2X для реализации сервисов ADAS / В. Н. Бабич, М. А. Виноцкий, Е. В. Дусталев, А. А. Савельева // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : Сборник научных статей XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4 т., Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2024. – С. 69–73. – EDN IFPFJX.
11. Вахрамеев, Р. А. Использование компьютерного зрения для аналитики дорожного движения / Р. А. Вахрамеев, В. С. Созинова, С. В. Болдин // Образование в цифровую эпоху: опыт, проблемы и перспективы, Нижний Новгород, 21–22 декабря 2023 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, 2024. – С. 101–104. – EDN IMYNZI.

УДК: 656.021

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ АВТОНОМНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Н. И. Григоренко
ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»

Введение. Стремительный рост непрерывных исследований и усилия промышленности в области использования автономного мобильного транспорта придали импульс многим научным и коммерческим структурам для активизации работ в этом направлении. Спектр задач, решаемых с помощью таких систем, крайне широк: от робототехнических комплексов до наблюдения, освоения космоса, оборонной отрасли, нефтегазовой и химической промышленности, автоматизации производственных процессов, ликвидации последствий стихийных бедствий, строительства, морской индустрии, оказания персональной помощи, работы в экстремальных условиях, спортивных развлечений, сельского хозяйства, транспортной логистики и множества других промышленных и непромышленных сфер. Каждая из этих сред создает определенные проблемы. Использование навигационных систем является приоритетным для всех стран [1]. Общая конфигурация системы мобильного транспорта в основном зависит от соответствующей операционной среды. Применение прогностических моделей позволяет предвидеть результаты трансформаций городской транспортной системы, обусловленных как колебаниями спроса на перевозки, так и корректировками предложения транспортных услуг [2].

Методы. Создание автономного мобильного транспорта и роботизированных систем представляет особую многофакторную задачу, связанную с адаптацией для работы в неструктурированной внедорожной местности, что обуславливает высокую актуальность данного направления научных изысканий. Автономное транспортное средство взаимодействует с внешней средой без присутствия человека на борту [3]. На дорогах общего пользования на систему навигации автономных транспортных средств влияют различные факторы окружающей среды, которая менее структурирована и более непредсказуема (например, освещение, тени, окклюзии и текстура), что существенно влияет на механизм выстраивания траектории движения. АТС необходимо решить следующие вопросы для автономной навигации: восприятие; локализация и картографирование; понимание возникающей ситуации.

Механизм восприятия окружающей среды возможен с помощью различных датчиков и извлечения полезной информации с помощью этих датчиков. Для корректного функционирования автономной навигации крайне важна система восприятия. В неструктурированной наружной среде в режиме реального времени для эффективной работы необходимо иметь доступ к достоверным и точным данным и обладать устойчивыми способностями к восприятию. Достижение этих характеристик зависит от оснащения несколькими сенсорными модальностями (которые могут быть экстероцептивными или проприоцептивными) [4]. Слияние датчиков (объединение различных модальностей датчиков) было применено во многих современных приложениях автономных мобильных роботов и беспилотных автомобилей. Мультимодальное объединение датчиков объединяет взаимодополняющие свойства различных датчиков для достижения лучшего восприятия окружающей среды в различных условиях [5]. Во многих мобильных приложениях для восприятия наземным автономным мобильным транспортом или роботизированными системами используются данные с различных сенсорных устройств. К этим устройствам относятся: глобальные навигационные спутниковые системы (ГЛОНАСС), инерциальные измерительные блоки (IMU), камеры, лидары, радары, ультразвуковые системы и одометрические датчики.

Следующей составляющей автономной навигации считается формирование первичных данных, используемых для локализации и картографирования внешней среды, поступающих от системы восприятия. Необходимо соблюдение корректной картографированной информации внешней среды и позиционирования на сложном уровне в зависимости от возникшей ситуации. Широко распространенный метод базируется на подходе одновременной локализации и картографирования (SLAM), применяемом во многих мобильных автономных транспортных средствах для создания карт в незнакомых местах или обновления уже существующих карт, при этом обеспечивая контроль текущего положения и отслеживание пройденного маршрута. Применяется высокоточный лазерный дальномер, измеряющий время полета, для выявления объектов. Определение семантических категорий представляет собой непростую задачу, обусловленную изменчивостью условий освещения, наличием теней и перекрытий, разнообразием текстур, а также присутствием классов, которые невозможно напрямую визуализировать. Вариативность освещения, теней, окклюзий, текстуры и наличие невидимых препятствий осложняют задачу точного восприятия в неструктурированной наружной среде. В нескольких исследовательских работах было использовано объединение данных камеры и лидара для улучшения понимания сцен во время движения.

Одной из критических составляющих для обеспечения независимой работы систем картографирования является автономное формирование маршрута для навигации автономного транспорта. В неструктурированных средах возникает необходимость перемещения по неровной местности; в этом случае функция навигации должна бесперебойно работать в приложениях. При планировании маршрута происходит разделение на глобальный и локальный уровни. При этом требуется предварительное знание операционной среды, что определяется как автономный режим планирования траектории движения. Планирование локального пути, известное как онлайн-планирование пути АТС, позволяет принимать решения в режиме реального времени на основе данных о ближайшем окружении. Автономное планирование локального пути АТС для оптимального передвижения по местности в неструктурированной внешней среде является важной задачей при работе в условиях бездорожья.

Несмотря на значительный прогресс в вычислительных и инженерных технологиях, полностью автономная навигация в неструктурированных средах еще не достигнута. Коммерческое применение навигации АТС на городских дорогах вызывает большой интерес во всем мире. В отличие от урбанизированной среды [6], где методы автономного ориентирования достигли высокого уровня развития, исследования в области навигации вне дорог остаются недостаточно проработанными по сравнению с исследованиями городского дорожного движения.

На рисунке 1 показаны методы автономной навигации, которые можно разделить на классические модульные циклы и комплексные подходы, основанные на обучении. Модульная архитектура цикла включает в себя промежуточные представления, которые могут быть интерпретированы человеком и которые могут предоставить информацию, связанную с режимами сбоев подхода. Очевидно, что будущее развитие автономной навигации будет зависеть от дальнейших достижений в восприятии окружающей среды и машинном обучении.



Рис. 1. Классические и сквозные подходы к автономной навигации

Обсуждение. В современных условиях обсуждаются и оцениваются наиболее перспективные методы, используемые в классических циклах навигации, а также новые подходы, основанные на обучении. Зондирование внешней и внутренней среды АТС путем извлечения исходных данных датчиков и их интерпретации является основным принципом восприятия. Для восприятия в модульном или сквозном подходе к навигации датчики играют решающую роль в представлении информации об окружающей среде или внутренних характеристиках. Были проведены исследования широкого спектра различных сенсорных модальностей для достижения лучшего восприятия. Модальность датчика представляет собой тип датчика, который воспринимает определенную форму энергии и обрабатывает сигнал с использованием аналогичных методов. К базовым типам сенсорных сигналов относятся звуковые волны, механическое давление, световое излучение (включая инфракрасный и видимый диапазоны) и магнитные поля. В состав системы восприятия обычно входят

различные устройства: лидары, радары, сонары, системы глобальной навигации (GNSS), инерциальные измерительные блоки (IMU), одометрические датчики и различные камеры (RGB, инфракрасные и глубинные).

Для ориентирования в незнакомых условиях датчики на основе машинного зрения имеют решающее значение. Системы, оснащённые датчиками на основе машинного зрения, способствуют пониманию информации об окружающей среде. Всенаправленные камеры используются там, где требуется больше информации об окружающей среде. Эти камеры обеспечивают более широкий угол обзора, чем обычные камеры, которые обычно имеют ограниченное поле зрения. Постоянное совершенствование в направлении разработки полностью автономных систем приведет к оптимальной методологии. В настоящее время существует несколько методов машинного зрения для автономного вождения: прогнозирование глубины плотности; плотная глубина с помощью слияния монокулярной камеры и LiDAR; высокая глубина благодаря объединению стереокамеры и лидара; мультимодальное обнаружение объектов; мультимодальная семантическая сегментация; мультимодальная сегментация экземпляров.

Подходы к планированию траектории движения АТС в локальной среде могут быть в целом классифицированы как классические методы или методы, основанные на обучении, которые пытаются модифицировать планирование траектории на основе таких факторов, как условия окружающей среды и предыдущий опыт [7, 8]. Классические методы основаны на модульной архитектуре с восприятием окружающей среды, планированием путей относительно сгенерированных глобальных карт и следованием траектории. Многие классические методы, применимые для навигации, адаптированы для статических условий.

В целом, стратегии планирования маршрутов используют доступные данные датчиков автономных объектов об их окружении для картографирования, анализа и построения локальных маршрутов с обходом препятствий. Эти методы локального планирования пути эффективны в мобильных приложениях, поскольку данные о динамике окружающей среды поступают от сенсоров в режиме реального времени. В отличие от глобальных подходов к планированию маршрута, локальное планирование пути более важно для практической работы автономных объектов и обычно служит связующим звеном между высокоуровневым планированием и непосредственным управлением объектом. Многие классические алгоритмы локального планирования могут генерировать оптимальные пути в локальных средах, избегая при этом проблем локальных минимумов [9]. Эти методы включают в себя такие подходы, как алгоритм нечеткой логики, метод искусственного потенциального поля и алгоритм имитационного отжига. Однако в целом эти методы не учитывают относительные скорости между автономными объектами и динамическими объектами окружающей среды, что может привести к трудностям. Методы визуально-инерциальной одометрии успешно показывают себя в сценариях навигации на открытом воздухе, но не подходят для навигации в условиях бездорожья без предварительно созданных карт или помощи ГЛОНАСС.

Выводы. Восприятие окружающей среды, анализ и понимание сценария автономным объектом имеют решающее значение для создания полезных карт и принятия разумных решений. В неструктурированных средах с растительностью сложно получить представление о сценарии на основе признаков. Различные методы SLAM обеспечивают полноформатную картографическую информацию, но способны ошибочно принимать территории, покрытые травой, за непроходимые, а местность с грязью считать проходимой. Синергия картографических/семантических карт на базе лидара с обучением с подкреплением на основе эгоцентрических изображений для планирования локальной траектории автономного объекта

может стать многообещающим направлением для более надежной навигации по внешней неструктурированной среде. Этот подход будет сочетать SLAM и понимание сценария на основе изображений для создания более высокого уровня пространственного понимания местной среды, чтобы обеспечивать более точное и безопасное движение. В целом, приведенный всесторонний обзор научных публикаций показал, что дальнейшие исследования методов мультимодального слияния данных датчиков, а также методов понимания сценария и планирования задач на основе глубокого обучения обеспечивают наибольшие перспективы для решения задачи полной автономности навигации в неструктурированных средах.

Анализ актуальной ситуации в сфере автономной наземной навигации отмечает ряд нерешенных задач в этом сегменте. Для улучшения автономной навигации в неструктурированных средах рассмотрены перспективные направления будущих работ. Мультимодальное слияние данных датчиков с использованием глубокого обучения и концепций инкрементального понимания сценария способствует сохранению топологии входных данных и пространственной геометрии представленной сцены. Основанная на обучении концепция иерархического планирования траекторий является перспективной областью исследований для эффективной реализации методологии полностью автономной навигации в неструктурированной наружной среде. Применение этих методов в контексте автономной навигации на открытой неструктурированной местности может существенно улучшить адаптивность автономного объекта в предметной области, понимание сценария и способность осознанно принимать решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шавыраа Ч. Д. Использование навигационных систем как основы «Умных городов» // Техника и технология транспорта. 2019. № 4 (15). С. 15. Электронный ресурс: <http://transport-kgasu.ru/files/N15-15ITS419.pdf>
2. Якимов М. Р., Попов Ю. А. Транспортное планирование: практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Vision® VISUM : монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Проспект, 2022. – 176 с.
3. Григоренко, Н. И. Система распознавания объектов беспилотных автомобилей в условиях бездорожья / Н. И. Григоренко, В. А. Гутников // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2023. – № 3–4(106–107). – С. 20–27. – EDN LRRLIX.
4. Варламов А. А., Кравченко А. Н., Горбачева А. В., Осадчий М. А. Язык прикосновений: биологические аспекты тактильного восприятия и особенности тактильных коммуникативных сигналов. Вопросы языкознания, 2020, 2: 75–92. DOI: 10.31857/S0373658X0008857-1
5. Шепель И. О. Модифицированный алгоритм построения карты занятости по облаку точек от нескольких лидаров // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 257–265. DOI: 10.15827/0236-235X.130.257-265.
6. Гришкин В. М., Дягилев М. С. Обнаружение пространственных объектов для автономных транспортных средств // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» № 6/2022. DOI: 10.55186/26584964_2022_5_6_2
7. Басс Л. П., Кузьмина М. Г., Николаева О. В. Сверточные нейронные сети с глубоким обучением в задачах обработки гиперспектральных спутниковых данных // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. № 282. 32 с. doi: 10.20948/prepr-2018-282. Электронный ресурс: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-28>
8. Sivakumar, A. N.; Modi, S.; Gasparino, M. V.; Ellis, C.; Velasquez, A. E. B.; Chowdhary, G.; Gupta, S. Learned visual navigation for under-canopy agricultural robots. In Proceedings of the 17th Robotics: Science and Systems, Virtual. 12–16 July 2021.
9. Родионов О. А., Рашид Б. Разработка семантической карты для беспилотного автомобиля с использованием метода одновременной локализации и картографирования // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 6 (88). С. 900–914. Электронный ресурс: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-900-914>

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА КОРРЕКТИРУЕМЫХ ВЫХОДОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Е. И. Елина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Введение. Одной из особенностей систем обеспечения движения поездов является высокая степень зависимости безопасности перевозочного процесса от корректности работы цифровых устройств, реализованных на основе микроэлектронных компонентов [1–3]. Такие устройства широко применяются в системах электроснабжения, радиотехнического обеспечения, связи, автоматики и телемеханики и пр., обеспечивая интервальное регулирование движения поездов, диспетчерское управление, управление стрелочными переводами, реализуя контроль и мониторинг состояния объектов инфраструктуры и выполнение многих других процессов, влияющих на работу железнодорожного транспорта. Несмотря на высокие показатели надёжности элементной базы, полное исключение возникновения неисправностей невозможно. По этой причине необходимо уделять внимание методам поиска решений, позволяющим выявлять нарушения (ошибки) в работе цифровых устройств до того, как они окажут влияние на процессы управления движением поездов и приведут к ухудшению безопасности транспортной системы.

Особенности выбора корректируемых выходов. Для решения задачи обнаружения ошибок в цифровых устройствах используются различные подходы [4–6], к числу которых относится встроенный контроль вычислений. Одним из наиболее «гибких» подходов к построению схем встроенного контроля (СВК) является использование принципа логической коррекции сигналов (ЛКС) [7, 8]. Рассмотрим принцип работы ЛКС. На вход объекта диагностирования $F(X)$ и блока контрольной логики $G(X)$ в СВК поступает набор значений аргументов $\langle X \rangle = \langle x_t x_{t-1} \dots x_2 x_1 \rangle$. Объект диагностирования $F(X)$ реализует n булевых функций $f_n(X), f_{n-1}(X), \dots, f_2(X), f_1(X)$, значения которых для каждого набора переменных образуют булев вектор $\langle f_n(X) f_{n-1}(X) \dots f_2(X) f_1(X) \rangle$. Аналогично блок контрольной логики $G(X)$ формирует вектор $\langle g_n(X) g_{n-1}(X) \dots g_2(X) g_1(X) \rangle$. Коррекция выходных сигналов с блока $F(X)$ осуществляется с использованием элементов сложения по модулю два (XOR) в соответствии с правилом $h_i(X) = f_i(X) \oplus g_i(X), i = \overline{1, n}$, что позволяет сформировать выходной вектор $\langle h_n(X) h_{n-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$. Именно он и контролируется схемой тестера, что позволяет косвенно контролировать возникновение неисправностей в объекте диагностирования.

Несмотря на большое количество исследований, посвящённых синтезу СВК на основе ЛКС [9, 10], выбор количества корректируемых выходов и их расположение в СВК практически не рассматриваются. В частности, при построении СВК на основе модульных взвешенных кодов с суммированием $WS(m, k, M)$, где m – число информационных символов, k – число контрольных символов, а M – модуль, при этом ранее введенное число выходов объекта диагностирования определяется как $n = m + k$, как правило, рассматриваются три «базовые» структуры организации ЛКС: I тип – с коррекцией только контрольных символов, II тип – с коррекцией только информационных символов, III тип – с коррекцией всех символов

[11]. Такое разделение на три структуры охватывает лишь наиболее общие варианты организации ЛКС. Вместе с тем выбор множества корректируемых выходов определяет возможности дальнейшего синтеза схемы и ее итоговые характеристики.

Пусть объект диагностирования имеет n выходов. Тогда коррекции с помощью ЛКС может подвергаться любое множество выходов мощностью p , где $0 \leq p \leq n$. Для значения p число возможных вариантов размещения XOR определяется величиной C_n^p . Следовательно, даже при фиксированном количестве корректируемых выходов, существует множество вариантов реализаций СВК. Например, при $n = 6$ и $p = 3$ существует $C_6^3 = 20$ различных вариантов размещения XOR на выходах объекта диагностирования. При отсутствии ограничений на число корректируемых выходов общее количество вариантов размещения XOR при фиксированном значении n определяется суммой сочетаний $C_n^0 + C_n^1 + \dots + C_n^n = \sum_{p=0}^n C_n^p = 2^n$. Для рассматриваемого примера при $n = 6$ общее количество вариантов размещения XOR составляет $2^6 = 64$.

Рассмотрим, как изменение числа корректируемых выходов влияет на возможности синтеза СВК.

При $p = 0$ ЛКС отсутствует. В этом случае реализуется классическая структура встроенного контроля, основанная на дополнении информационных сигналов контрольными. Возможность построения самопроверяемой [12–14] СВК определяется исключительно свойствами исходного множества выходных функций объекта диагностирования $F(X)$, что существенно ограничивает возможности синтеза самопроверяемой СВК.

При $p = 1$ осуществляется коррекция одного сигнала. Такое решение характеризуется минимальной структурной избыточностью, однако реализация различных вариантов синтеза СВК остается ограниченной.

При $1 < p < n$ появляется рост числа возможных вариантов построения СВК, что позволяет влиять на самопроверяемость СВК и на сложность функций $g_i(X)$.

При $p = n$ коррекции подвергаются все выходы объекта диагностирования. Структура обладает максимальной «гибкостью».

Вместе с тем увеличение числа корректируемых выходов не всегда приводит к улучшению показателей СВК. Каждый дополнительный корректируемый выход требует введения XOR , а значит возрастёт площадь схемы, увеличится структурная избыточность, а в некоторых случаях произойдет рост задержки сигнала, т. к. размещение XOR для различных выходов объекта диагностирования влияет и на критический путь. Поиск рационального соотношения между количеством корректируемых выходов и показателями СВК представляет собой самостоятельную научную задачу. При этом можно предположить, что среди множества возможных вариантов размещения XOR существуют структуры, обеспечивающие лучшие показатели СВК по сравнению с «базовыми» вариантами организации ЛКС I – III типов при одинаковом числе корректируемых выходов.

Для поиска решения данной задачи рассмотрим $WS(m, k, M)$ -коды, являющиеся разделимыми, а также позволяющие равномерно распределять информационные векторы по контрольным. В качестве примера был выбран $WS(4, 2, 4)$ -код, исследованный в работах [15, 16]. На рисунке представлены примеры каскадов преобразования сигналов для $WS(4, 2, 4)$ -кода, где функции, отвечающие за контрольные символы $f_6(X)$ и $f_5(X)$, а также один информационный символ вычисляются напрямую. Для трех других информационных

символов применяется ЛКС. При этом для корректируемых функций приведены варианты их расположения в СВК, что позволяет проиллюстрировать неоднозначность реализации СВК. Количество XOR , а также их расположение в структуре непосредственно влияют на характеристики СВК. Увеличение числа XOR расширяет множество допустимых вариантов построения СВК, вместе с тем это может привести к увеличению площади, занимаемой устройством на кристалле и увеличению задержки распространения сигнала. Даже при одинаковом количестве корректируемых функций различные варианты расположения элементов логической коррекции могут приводить к различным диагностическим свойствам СВК. Так, одна структура может не удовлетворять условиям самопроверяемости, тогда как при ином расположении элементов логической коррекции эти условия могут быть выполнены. Кроме того, различные варианты реализации характеризуются различными показателями структурной избыточности.

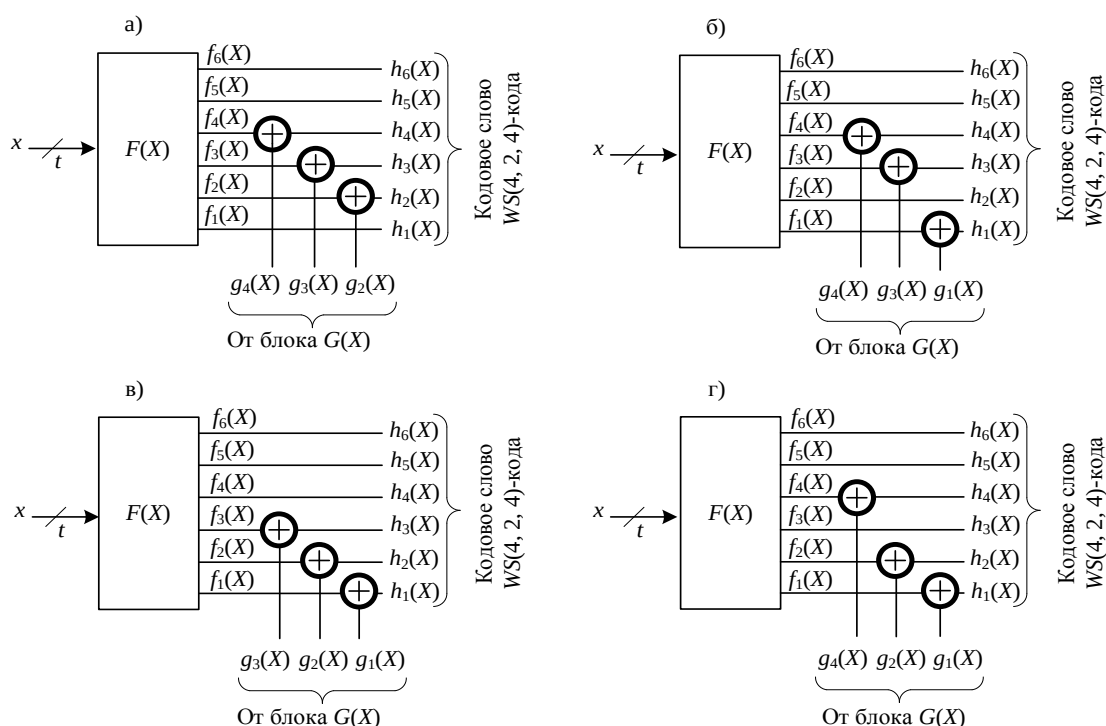


Рис. 1. Каскады элементов преобразования в структурах организации СВК с вариантами расположения трех корректируемых информационных символов

Выводы. В настоящей статье показано, что даже при неизменных параметрах используемого кода и одинаковом числе корректируемых выходов возможно построение нескольких структурно различных вариантов СВК, что напрямую будет влиять на характеристики проектируемой схемы. А значит, одним из этапов синтеза СВК на основе ЛКС следует рассматривать выбор количества и структурного расположения корректируемых выходов. Для цифровых устройств, применяемых на железнодорожном транспорте, данная задача приобретает особую актуальность, поскольку позволяет находить решения, удовлетворяющие заданным требованиям при различных ограничениях.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку методов выбора множества корректируемых выходов и проведение вычислительных экспериментов для анализа влияния различных вариантов распределения корректируемых выходов на показатели СВК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефанов, Д. В. Интеграция систем прогнозирования временных параметров работы устройств ограждения на железнодорожных переездах с интеллектуальными транспортными системами на автомобильных дорогах / Д. В. Ефанов, Е. И. Елина, А. С. Кашталинский // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2026. – Т. 20, № 2. – С. 31–41. – DOI 10.36724/2072-8735-2026-20-2-31-41.
2. Лыков, А. А. Формализация моделей внешней среды в имитационных моделях систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики / А. А. Лыков, Д. С. Марков, В. Б. Соколов // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 356–374. – DOI 10.20295/2412-9186-2019-5-3-356-374.
3. Ефанов, Д. В. Киберфизическая модель системы управления движением поездов нового поколения / Д. В. Ефанов, Е. М. Михайлюта // Транспорт России: проблемы и перспективы–2025 : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 26–27 ноября 2025 г. – Санкт-Петербург : Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, 2026. – С. 111–116.
4. Ланцов, В. Н. Современные подходы к проектированию и тестированию интегральных микросхем / В. Н. Ланцов, С. Г. Мосин. – Владимир: Издательство Владимирского государственного университета, 2010. – 285 с.
5. Сперанский, Д. В. Тестирование нечетких линейных автоматов / Д. В. Сперанский // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 233–240. – DOI 10.18500/1816-9791-2019-19-2-233-240.
6. Матросова, А. Ю. Построение последовательности, обнаруживающей робастно тестируемые неисправности задержек путей в схемах с памятью / А. Ю. Матросова, С. В. Чернышов, О. Х. Ким, Е. А. Николаева // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 11. – С. 148–168. – DOI 10.31857/S0005231021110093.
7. Гессель, М. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.
8. Гессель, М. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 8. – С. 161–172.
9. Efanov, D. V. Design of self-checking discrete devices based on Boolean signals correction and composition of constant-weight codes "1-out-of-4" and "3-out-of-4" / D. V. Efanov, Y. I. Yelina, S. T. Boltayev, N. M. Aripov, A. R. Azizov, E. K. Ametova, S. I. Valiev // IEEE Access. – 2026. – Vol. 14. – P. 42924–42942. – DOI 10.1109/ACCESS.2026.3670019.
10. Елина, Е. И. Взвешенные коды Боуза – Лина в схемах встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов / Е. И. Елина, Д. В. Ефанов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2025. – № 1. – С. 45–62. – DOI 10.7868/S3034644425010047.
11. Ефанов, Д. В. Исследование способов синтеза схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов с применением равномерных разделимых кодов / Д. В. Ефанов, Е. И. Елина // Микроэлектроника. – 2024. – Т. 53, № 5. – С. 413–426. – DOI 10.31857/S0544126924050079.
12. Дубова, Т. А. Построение полного теста проверки работоспособности n-разрядного сумматора / Т. А. Дубова, В. В. Первов // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 11. – С. 161–169.
13. Lala, P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design / P. K. Lala. – San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers, 2001. – 216 p.
14. Согомонян, Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.
15. Ефанов, Д. В. Синтез самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов Боуза – Лина / Д. В. Ефанов, Е. И. Елина // Проблемы управления. – 2024. – № 4. – С. 26–43. – DOI 10.25728/ru.2024.4.3.
16. Ефанов, Д. В. Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов с суммированием в кольце вычетов по заданному модулю / Д. В. Ефанов, Е. И. Елина // Автоматика и телемеханика. – 2026. – № 5. – С. 108–130. – DOI 10.7868/S2413977726050065.

СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ВЫХОДНОЙ – КОЛА ОКТЯБРЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Д. В. Ефанов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Введение. Процессы физического износа и старения присущи любым инженерным сооружениям и системам управления, что в полной мере касается и транспортной инфраструктуры. Поэтому для поддержания заданных значений показателей надежности и безопасности сооружений применяются разнообразные методы, включающие в себя внесение избыточности в конструкции (как по параметрам, так и по особенностям самих структур), систему технического обслуживания, содержания и эксплуатации, технические средства периодического и непрерывного мониторинга состояния. В связи с активным развитием информационных технологий и методов искусственного интеллекта огромную популярность в первой половине настоящего столетия получили системы непрерывного мониторинга состояния технических объектов и сооружений [1–3].

Системы непрерывного мониторинга внедряются на уникальных технических сооружениях и на объектах критической инфраструктуры. Особую роль они играют в сфере железнодорожного транспорта и представляют собой важнейшие компоненты будущего интеллектуального комплекса адаптивного управления движением поездов, что особенно важно при создании и развитии высокоскоростного сообщения [4, 5]. Важно это учитывать и в разрабатываемых интеллектуальных системах с адаптивным управлением, ядро которых описано в исследованиях профессора И. М. Кокурина [6, 7].

В настоящее время системы непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры не имеют тесной интеграции с системами управления движением поездов, что обусловлено спецификой их разработки и проектирования, а также отсутствием требований по функциональной безопасности [8]. Однако, несмотря на подобные ограничения, на вновь построенном после обрушения в 2020 году мостовом сооружении через реку Кола в Мурманской области на участке Выходной – Кола Октябрьской железной дороги для обеспечения надежности и безопасности конструкции в проект был заложен раздел по системе непрерывного мониторинга технического состояния, в которой имеется интеграция с работой заградительной сигнализации [9]. Это первое подобное решение на железных дорогах, которое при должном развитии станет основой для адаптивного управления движением поездов с учетом данных о состоянии искусственных сооружений и инфраструктурных объектов [10]. Именно краткому описанию особенностей системы непрерывного мониторинга на мостовом сооружении через реку Кола и посвящена настоящая статья.

Краткое описание особенностей системы непрерывного мониторинга. Объектом диагностирования и мониторинга является мостовое сооружение через реку Кола. Для обеспечения сбора диагностической информации на объекте установлена первая отечественная система непрерывного мониторинга, разработанная под руководством автора настоящей статьи.

В системе использовано оптоволоконное оборудование, произведенное в России в одном из подразделений ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная

компания». Среди датчиков применены такие приборы, как акселерометры, тензометры, инклинометры, размещенные в контрольных точках конструкции мостового сооружения. Также для комплексной аналитики данных впервые было использовано решение по косвенному определению весовых характеристик подвижного состава, основанное на использовании оптических датчиков, работающих аналогично тому, как это описано в [11]. Зона взвешивания расположена на подходе к мостовому сооружению со стороны станции Выходной. Для определения дополнительных параметров течения горной реки установлены датчики зеркала воды, позволяющие фиксировать ее уровень, а также косвенно определять скорость течения. Информация собирается с помощью оптоволоконных трактов передачи данных и доставляется в концентратор, расположенный в здании поста безопасности возле мостового сооружения. Вся обработка данных производится локально в концентраторе, а результаты мониторинга передаются в центр мониторинга Октябрьской железной дороги и в систему управления на уровне станционных и перегонных средств сигнализации, централизации и блокировки. Система непрерывного мониторинга реализована полностью на отечественных аппаратных и программных средствах, что соответствует современной тенденции импортозамещения и технологического суверенитета.

Особенностью системы непрерывного мониторинга, как отмечено выше, является то, что она имеет интеграцию с системой управления движением поездов. По оптоволоконному кабелю, размещенному параллельно воздушной линии связи на столбах, сигнал тревоги передается на расстояние примерно в 3 км на пост электрической централизации станции Выходной. Также сигнал передается на пост охраны. Это позволяет осуществить увязку с заградительной сигнализацией мостового сооружения. Заградительные сигналы нормально погашены и включаются красными показаниями при наличии опасности движения по мостовому сооружению. Одновременно с этим отключается кодирование рельсовых цепей. На устройства локомотива перестают поступать кодовые посылки и происходит сбой одного из разрешающих сигналов, что вкупе с включением заградительной сигнализации требует от машиниста немедленной остановки поезда. Подобная интеграция является одним из самых простых вариантов организации непосредственного взаимодействия системы непрерывного мониторинга с системой управления движением поездов [12]. Однако в перспективе развития принципов синтеза и реализации систем мониторинга и управления возможно непосредственное использование результатов мониторинга в алгоритмах управления, учитывающих не только парадигму полной остановки при наличии дефектов, но и позволяющих менять скоростные режимы проследования участков железных дорог с зафиксированными повреждениями [4].

Заключение. Система непрерывного мониторинга мостового сооружения на участке Выходной – Кола Октябрьской железной дороги, установленная в момент завершения его строительства и запущенная в эксплуатацию в 2021 году, уникальна тем, что для нее впервые осуществлено информационное сопряжение с системой управления движением поездов в части средств сигнализации, централизации и блокировки. Это позволяет не только обеспечивать непрерывный анализ диагностической информации с датчиков, расположенных на мостовом сооружении, но и гарантировать своевременную реакцию системы управления на потенциальные дефекты конструкций, влияя на снижение скорости движения поездов вплоть до полной их остановки.

Особую значимость представленный пример реализации интегрированных систем мониторинга и управления приобретает ввиду строительства скоростных и высокоскоростных магистралей в Российской Федерации, где для достижения более высоких показателей

надежности и безопасности просто требуется учитывать в управляющих алгоритмах технические состояния объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. Вопросам развития технологий управления на железнодорожном транспорте посвящены некоторые исследования автора настоящей статьи, что будет отражено в последующих публикациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефанов, Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
2. Belyi, A. A. Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance (Saint-Petersburg Example) / A. A. Belyi, E. S. Karapetov, Yu. I. Efimenko // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 189. – Pp. 145–151. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.
3. Sokolov, S. A. Evaluation of Loads Applied on Engineering Structures Based on Structural Health Monitoring / S. A. Sokolov, D. G. Plotnikov, A. A. Grachev, V. A. Lebedev // *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. – 2020. – Vol. 14. – No. 2. – Pp. 146–150.
4. Ефанов, Д. В. Технологические основы разработки интеллектуальных систем управления движением поездов с тесно интегрированными безопасными комплексами мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры / Д. В. Ефанов, Е. М. Михайлюта // *Транспорт Российской Федерации*. – 2025. – № 3. – С. 18–25.
5. Ефанов, Д. В. Киберфизическая модель системы управления движением поездов нового поколения / Д. В. Ефанов, Е. М. Михайлюта // *Транспорт России: проблемы и перспективы – 2025: сборник научных статей Юбилейной международной научно-практической конференции. 26–27 ноября 2025 г.* / под редакцией д-ра техн. наук, проф. Д. А. Скороходова. – СПб.: ИПТ РАН, 2026. – С. 111–116.
6. Кокурин, И. М. Интеллектуальная система управления движением поездов на основе автоматизации диспетчерского регулирования и центрального автоведения / Кокурин И. М. // *Автоматика на транспорте*. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 305–314.
7. Кокурин, И. М. Теоретические и технологические основы построения адаптивной системы диспетчерской централизации / Кокурин И. М. // *Автоматика на транспорте*. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 345–354.
8. Ефанов, Д. В. Управление надёжностью и безопасностью перевозочного процесса с применением систем непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры / Д. В. Ефанов // *Мир транспорта*. – 2023. – Т. 21. – № 2 (105). – С. 84–94. – DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-10.
9. РЖД: мост с первой инновационной системой непрерывного мониторинга и подключением к управлению заградительным сигналом // *Мостовые сооружения. XXI век*. – 2021. – № 4 (51). – С. 18–19.
10. Ефанов, Д. В. Перспективы управления движением на железнодорожных магистралях при использовании данных от систем мониторинга инженерных конструкций и сооружений / Д. В. Ефанов // *Мостовые сооружения XXI век*. – 2021. – № 4 (51). – С. 17.
11. Ефанов, Д. В. Применение оптических датчиков в системах управления движением поездов / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, В. В. Хорошев // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2019. – Т. 62. – № 4. – С. 364–371. – DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-364-371.
12. Ефанов, Д. В. Способы информационного сопряжения систем автоматизированного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры с системами управления движением поездов / Д. В. Ефанов, Е. М. Михайлюта // *Наука и техника транспорта*. – 2025. – № 2. – С. 63–70. – EDN: HVOYLY.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ «ЦИФРОВОЙ ПЭК» ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Т. Б. Ефимова, А. В. Овод

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. В условиях современного инновационного развития и цифровой трансформации транспортного комплекса РФ серьезную роль играет оптимизация бизнес-процессов, связанных с обработкой данных и контролем выполнения задач. Разработка и внедрение цифровых платформ определяют прозрачность операций, сокращение временных затрат, переход к автоматизированному выполнению задач. В условиях импортозамещения программного обеспечения перед российскими компаниями стоит задача перехода на отечественные ИТ-решения и использования свободно распространяемого ПО [1].

Производственный экологический контроль (ПЭК) представляет собой системно организованную деятельность предприятия, направленную на обеспечение соблюдения требований природоохранного законодательства и установленных нормативов допустимого воздействия на окружающую среду. Утверждение и разработка программ производственного экологического контроля определяется Федеральным законом № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и Приказом Минприроды России от 18.02.2022 № 109 и являются обязательным условием для компаний, работающих с объектами I, II и III категории [2].

Лаборатории ПЭК имеют дело с большими объемами измерительных данных, регистрацией первичных наблюдений, определением показателей, на основе которых создаются отчётные протоколы. В результате проведенного анализа выявлено, что регистрация результатов исследований, а также создание протоколов в большинстве компаний ведется с использованием неспециализированного и/или зарубежного программного обеспечения, что, безусловно, относится к рисковым факторам деятельности. Также следует отметить, что в большинстве подразделений нет единой серверной системы обработки данных, что мешает централизованно хранить информацию, проверять правильность расчётов. Данная работа посвящена разработке структуры хранения данных для приложения «Цифровой ПЭК», благодаря которому осуществляется цифровая регистрация результатов измерений, их обработка, хранение на сервере, создание необходимой отчетной документации (протоколов).

Разработка структуры хранения данных. Разрабатываемое приложение должно выполнять учет заявок, фиксировать объект исследования, объект контроля, точки отбора, лабораторные показатели, контролировать срок выполнения задач, исполнителей, планировать измерения, процессы их внесения и хранения результатов, создавать протоколы с учетом введенных данных, максимально перенести эти функции с пользователя на приложение, осуществлять поиск необходимой информации, администрирование пользователей, восстановление работоспособности при возникновении нештатных ситуаций.

При разработке структуры хранения данных для приложения был выполнен анализ деятельности экологической лаборатории, в результате были выделены необходимые для структуры сущности, представляющие собой связанную цепочку: сущность компании как

главного объекта учёта, далее с ней связываются точки контроля (атмосферный воздух, рабочая зона, источники выбросов), а затем – показатели (код, наименование, единица измерения, норматив, допустимый диапазон значений).

Запланированная работа (элемент годового плана) – ключевая сущность. Она фиксирует дату и время проведения, объект, собственный тип, приоритет и статус. Посредством элемента плана происходит переход данных из этапа планирования в фактическое исполнение. С ним связывается сущность результата измерения, которая включает код заявки, работы, номер пробы, данные исполнителя, методики, условия измерений и значения по показателям. В результате создается протокол – основной документ, формируемый приложением на основании всех данных. На рисунке 1 приведена логическая структура хранения данных приложения «Цифровой ПЭК».

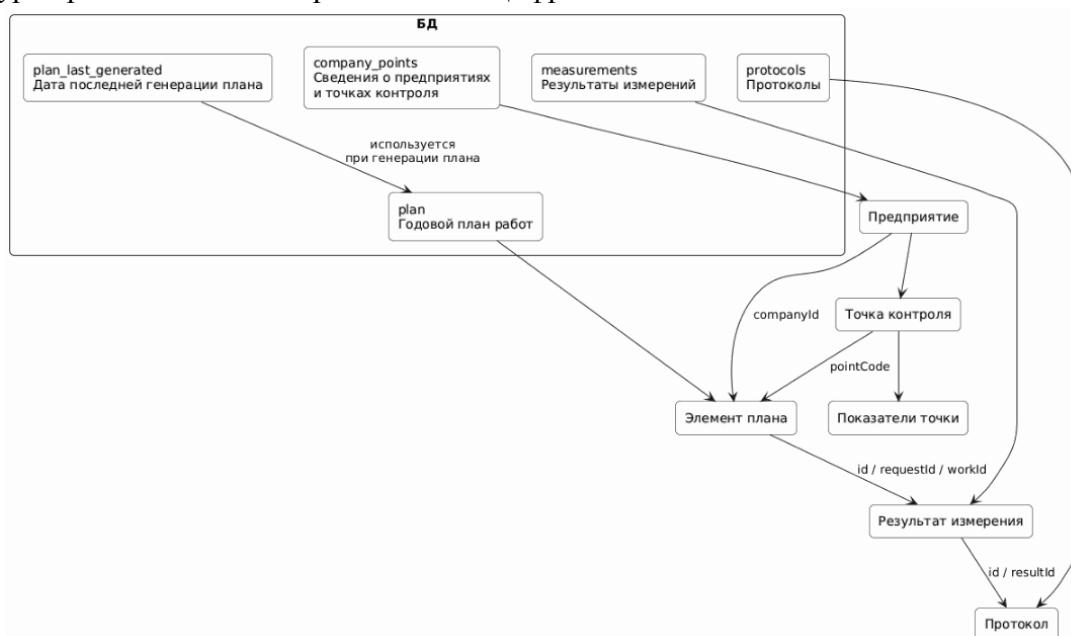


Рис. 1. Структура хранения данных системы «Цифровой ПЭК»

Использована модель хранения, которая сочетает базу данных SQLite и логическое представление сущностей в формате JSON. Логическая связанность данных обеспечена поддержкой связей между сущностями через поля идентификаторов внутри структур.

Обеспечение целостности данных. Целостность данных обеспечивается на уровне структуры базы данных: применены ограничения в виде первичных ключей и уникальности, поэтому результат измерения не может существовать вне контекста заявки; а также на уровне прикладной логики, когда запись создается или изменяется, осуществляется проверка наличия связанной сущности.

Транзакционная обработка обеспечивает атомарность операций: при возникновении ошибки все изменения отменяются, это предотвращает формирование частично сохранённых состояний. Иерархическая последовательность процедур валидации включает в себя проверку на наличие обязательных полей, процесс контроля диапазонов значений параметров, дат и чисел, контроль логической взаимосвязи параметров.

Заключение. Благодаря разработанному механизму учета действий выполняется контроль за датой и временем выполнения операций создания, изменения или удаления данных, что позволяет анализировать историю изменений, определять причины ошибок. Данное решение легко масштабируется и может быть адаптировано для любых структурных подразделений [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, Д. В. Проектирование и фронтенд-разработка подсистемы мониторинга перерасхода по договорам для АСКУЭ / Д. В. Кузнецов, Т. Л. Грубов, Т. Б. Ефимова // Вестник СамГУПС. – 2024. – № 2(64). – С. 63–68. – EDN SNINBH.
2. Приказ Минприроды России от 18.02.2022 № 109 «Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля». – М., 2022.
3. Шуркалин, И. М. Разработка web-интерфейса для автоматизации подготовки паспортов на разработку цифровых сервисов / И. М. Шуркалин, Т. Б. Ефимова // Наука и образование транспорту. – 2025. – № 2. – С. 109–110. – EDN TJMWYY.

УДК 004.8:656.25

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВОГО ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ АПРОБАЦИИ ПРОГРАММЫ «ИИ-ЭКСПЕРТ СЦБ» ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А. Г. Исайчева¹, А. В. Заводовский², А. А. Астапенкова¹

¹Приволжский государственный университет путей сообщения

²Жигулевская дистанция СЦБ – структурного подразделения Куйбышевской дирекции
инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры
филиала ОАО «РЖД»

Введение. Система технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) формирует значительные массивы параметрической информации. Анализ статистических данных системы позволяет оценить уровень систематизации, динамику и возможную причину возникновения отказа технического средства. В оперативных условиях специалистам выполнить эти функции затруднительно из-за большого количества текущих задач, что обосновывает возможность применения технологии искусственного интеллекта при принятии решений.

Применение искусственного интеллекта на железнодорожном транспорте рассматривается как один из способов автоматизации мониторинга и технического обслуживания оборудования [1]. Основные понятия технического диагностирования установлены ГОСТ [2], а развитие средств непрерывного мониторинга устройств ЖАТ рассмотрено в работах [3, 4]. При этом интеллектуальный алгоритм не должен заменять нормативные требования и решение ответственного работника, поэтому разработанная программа «ИИ-эксперт СЦБ» построена как средство поддержки принятия решений специалистом, а не как автономная система управления.

Методика и программная реализация. В программу внедрён классификатор на основе алгоритма случайного леса. Входными данными служат тип контролируемого параметра, измеренное значение, число повторений, характер изменения и предполагаемый источник влияния. Дополнительно вычисляются нормированное положение значения в контрольном диапазоне, удаление от ближайшей границы и признак физически неправдоподобного измерения.

Нормативный и обучаемый блоки выполняются параллельно. Если значение выходит за физически допустимые пределы либо нормативная проверка фиксирует критическое

состояние, приоритет сохраняется за детерминированным заключением. При расхождении результатов или низкой уверенности программа требует подтверждения специалистом. Такая технология принятия решений соответствует принципам доверия и оценки качества систем искусственного интеллекта [5, 6].

Для программной апробации сформированы 160 обучающих и 60 контрольных модельных ситуаций. Рассматривались пять классов: нормальное состояние, предупредительное отклонение, критическое отклонение, ошибка измерения и вероятное участие смежного хозяйства. В контрольную выборку вошло по 12 ситуаций каждого класса; она не использовалась при обучении модели.

Результаты обучения. На независимой контрольной выборке правильно классифицировано 56 из 60 ситуаций. Общая точность составила 0,933, макроусредненная точность – 0,940, полнота – 0,933, F1-мера – 0,934. Матрица ошибок приведена на рисунке 1.

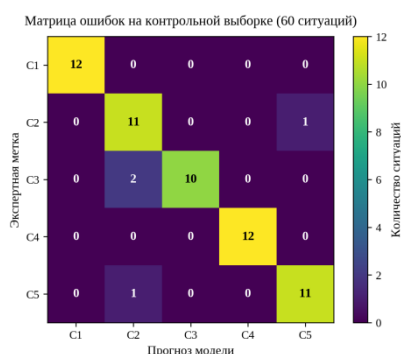


Рис. 1. Матрица ошибок

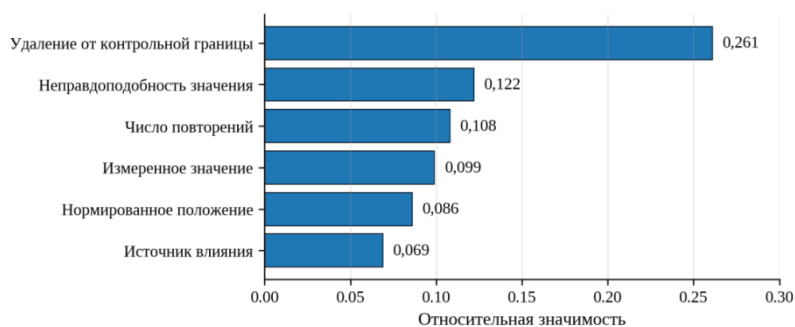


Рис. 2. Значимые признаки обученной модели

На рис 1: C1 – нормальное состояние; C2 – предупредительное отклонение; C3 – критическое отклонение; C4 – ошибка измерения; C5 – вероятное участие смежного хозяйства

Модель без ошибок определила нормальные состояния и ошибки измерения. Основные расхождения возникли между предупредительным, критическим и межхозяйственным классами: такие ситуации отличаются не только величиной параметра, но и контекстом события. Наибольшее влияние на прогноз оказали удаление от контрольной границы, неправдоподобность измерения, число повторений и нормированное положение параметра. Модель учитывает сочетание измерения и диагностического контекста (рис. 2).

Применение результатов. Пользователь получает нормативное заключение, прогноз модели, оценку уверенности и рекомендуемое действие. Специалист может подтвердить или изменить класс, а исправленная запись сохраняется для последующего переобучения. Полученные показатели относятся к модельным данным; перед эксплуатационной апробацией необходимо использовать утвержденные пороги и проверить модель на обезличенных архивных событиях.

Заключение. Рассмотрено внедрение обучаемого классификатора в программу «ИИ-эксперт СЦБ», предназначенную для предварительного анализа диагностических данных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Интеллектуальный модуль работает совместно с нормативной проверкой и подтверждением специалиста. Для апробации использованы 160 обучающих и 60 независимых контрольных модельных ситуаций. На контрольной выборке верно классифицировано 56 записей, точность составила 0,933, макроусредненная F1-мера – 0,934. Результаты подтверждают работоспособность программного решения и определяют направление дальнейшей проверки на обезличенных эксплуатационных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПНСТ 884–2023. Искусственный интеллект на железнодорожном транспорте. Варианты использования. – Москва : Российский институт стандартизации, 2023.
2. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2009.
3. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2016. – 171 с.
4. Ефанов Д. В., Плеханов П. А. Непрерывное диагностирование устройств СЦБ // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 6. – С. 18–20.
5. ГОСТ Р 59276-2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения. – Москва : Стандартинформ, 2021.
6. ГОСТ Р 59898-2021. Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022.

УДК 656.256

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Г. Г. Киселев, С. В. Коркина

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. Железнодорожные переезды относятся к объектам транспортной инфраструктуры с высоким уровнем риска. Пересечение автомобильных и рельсовых путей в едином уровне требует безупречной слаженности действий и строгой дисциплины водителей. Данные участки, с одной стороны, выступают причиной серьезных временных потерь для автомобилистов, а с другой – являются очагами аварийности с тяжелыми последствиями, включающими гибель людей и крупный материальный ущерб.

Согласно данным эксплуатационной статистики, штатные системы автоматической переездной сигнализации (АПС) не обеспечивают должного уровня безопасности. Основная причина кроется в человеческом факторе: до 98% аварий происходит из-за умышленного пренебрежения водителями ПДД. Дополнительным негативным фактором выступает низкое качество технического содержания железнодорожных переездов. В связи с этим возникает объективная потребность в разработке нетрадиционных подходов, которые сочетали бы принудительное блокирование движения с мерами информационно-психологического воздействия на автомобилистов.

Аварийность на железнодорожных переездах сохраняется на рекордном уровне как для Российской Федерации, так и для большинства индустриальных стран. В подавляющем большинстве инцидентов виновными признаются водители автотранспорта, пренебрегающие установленными правилами. Ошибочное восприятие дорожной обстановки, опрометчивость и расчет на «авось» приводят к необратимым последствиям.

Примером влияния на уровень аварийности является установка светодиодных дисплеев, демонстрирующих обратный отсчет до зеленого света, на светофорах города. Число ДТП на данных объектах снизилось на 20% и более. Результаты продемонстрировали эффективность информирования водителей о точном временном интервале, что напрямую влияет на снижение аварийности.

В ОАО «РЖД» реализуется комплекс целенаправленных мероприятий по сокращению аварийности: проводятся комиссионные проверки состояния переездов, выполняются их капитальные ремонты, а также производится плановая замена выработавших свой ресурс конструктивных элементов. Тем не менее, как обоснованно отмечается в источниках [3–5], данные усилия не дадут полноценного эффекта без внедрения оповещающих систем нового поколения, которые должны учитывать возросшие скоростные характеристики и технические параметры современного автотранспорта.

Для кардинального улучшения ситуации предлагается внедрение запатентованного сигнально-информирующего комплекса [6, 7], основное преимущество которого заключается в автономности и независимости от существующих схем автоблокировки. Это позволяет оснащать комплексом переезды любого типа без необходимости сложной реконструкции уже установленного оборудования.

Предлагаемый комплекс включает в себя следующие функциональные элементы (рис. 1): счётные пункты (устанавливаются на нормированном расстоянии от переезда) – выполняют подсчёт колёсных пар для идентификации поезда, фиксируют его скорость и ускорение, определяют направление движения (чёт/нечёт) и передают радиоданные на центральные приемники; центральные приёмники – обрабатывают полученную информацию и ретранслируют её на устройства отображения; ЖК-экраны – смонтированы с двух сторон дороги перед переездом; переездная сигнализация с переключаемыми огнями, синхронизированными со звуковыми сигналами.

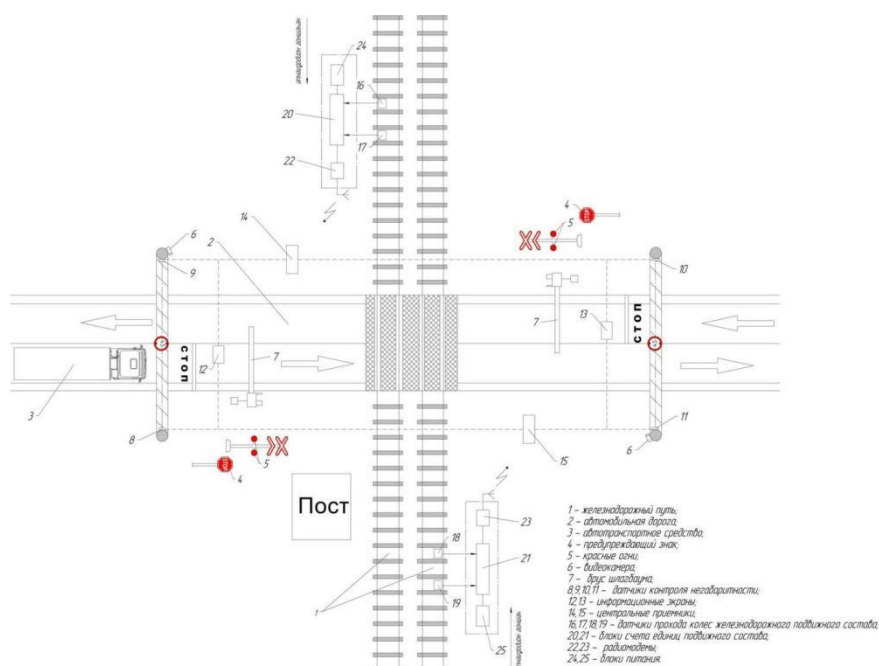


Рис. 1. Сигнально-информирующий комплекс железнодорожного переезда

Отличие предложенного решения – вывод на ЖК-экраны (рис. 2) прогнозных параметров в дополнение к штатному звуковому и световому оповещению о приближении поезда. Информация выводится в реальном масштабе времени по следующим позициям: 1) Время до перекрытия – остаток времени до того, как закроется шлагбаум; 2) Таймер обратного отсчёта отображает расчётное время, оставшееся до поднятия шлагбаума; 3) Фактическая скорость и направление движения приближающегося к переезду подвижного состава; 4) Альтернативные пути – перечень путей объезда с указанием расстояния и ориентиров на

местности; 5) Предупреждение и информирование о нештатных ситуациях: Внимание!!! Превышение транспортным средством допустимой габаритной высоты. Ведутся путевые ремонтные работы, что может привести к задержкам и изменению организации движения.



Рис. 2. Пример информации выводимой на ЖК-экраны

Наличие информации о точной продолжительности ожидания (рассчитанной на основе данных о длине блок-участка и скорости состава) позволяет водителю принять взвешенное решение: дожидаться проезда поезда или выбрать объездной путь, что особенно актуально на переездах с малой интенсивностью движения. Для таких объектов предусмотрена возможность питания информационных экранов от солнечных батарей.

Функционалом системы предусмотрено автоматическое информирование диспетчера и вывод данных на ЖК экраны при каждом случае регистрации датчиками превышения высотного ограничения для транспортного средства.

Применение сигнально-информирующего комплекса на переезде позволяет решить ряд важных задач: повысить степень осведомленности водителя и снизить неопределенность, тем самым уменьшить аварийность; снизить время вынужденного ожидания на переезде на 5–10% благодаря оптимальному выбору маршрута и более быстрому принятию решения; осуществлять контроль негабарита автоматически реагировать в случае каких либо отклонений [8, 9].

Данное решение примечательно тем, что подходит для переездов любой конфигурации и встраивается в действующие алгоритмы работы шлагбаумов без изменений, а значит, затраты на внедрение минимальны и оправданны. Соответствие поставленным задачам по программе ОАО «РЖД» "Цифровая железная дорога до 2030 г." свидетельствует о значительном потенциале предложенного решения. Не исключается и альтернативный путь развития благодаря интеграции с внешними навигационными системами («Яндекс.Навигатор», 2ГИС и им подобными), которые обеспечат автоматизированную маршрутизацию автотранспорта на основе оперативных данных о занятости переездов железнодорожным подвижным составом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воеводина, С. П. Комплексный информационный подход для предупреждения аварийных ситуаций на железнодорожных переездах / С. П. Воеводина, Г. Г. Киселев // Обеспечение безопасности движения как перспективное направление совершенствования транспортной инфраструктуры: Материалы Международной студенческой научно-практической конференции, Нижний Новгород, 07 апреля 2022 года. – Нижний Новгород: Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный университет путей сообщения" в г. Нижнем Новгороде, 2022. – С. 74–78. – EDN EDFNHR.

2. Киселев, Г. Г. Повышение уровня обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах / Г. Г. Киселев, С. В. Коркина // Научно-технические аспекты инновационного развития транспортного комплекса : Материалы III Международной научно-практической конференции, в рамках 3-го Международного Научного форума Донецкой Народной Республики, Донецк, 25–26 мая 2017 года / Донецкая академия транспорта; ГУ "Институт Экономических Исследований". – Донецк: Донецкая академия транспорта, 2017. – С. 19–22. – EDN YSIXBF.
3. Коваленко В. Н. Современные тенденции автоматизации переездов на железнодорожном транспорте / В. Н. Коваленко, М. Н. Катаев // Инновационный транспорт. – 2015. – № 3(17). – С. 54–58.
4. Система оповещения о свободности железнодорожных переездов / М. Г. Комогорцев, Е. В. Непомнящих, Я. В. Клочков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 26–28.
5. Федухин А. В. Информационный подход к повышению безопасности движения на железнодорожных переездах / А. В. Федухин, А. А. Муха // Математические машины и системы. – 2015. – № 4. – С. 145–151
6. Патент № 2662306 Российская Федерация, МПК B61L 29/00. Сигнально-контролирующий комплекс железнодорожного переезда: № 2017125221: заявл. 13.07.2017; опубл. 25.07.2018 / Г. Г. Киселев, С. В. Коркина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный университет путей сообщения" (СамГУПС).
7. Патент № 161003 Российская Федерация, МПК B61L 29/00. Сигнально-контролирующий комплекс железнодорожного переезда: № 2015116472/11: заявл. 29.04.2015; опубл. 10.04.2016 / Г. Г. Киселев, Ю. А. Кочетков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Самарский государственный университет путей сообщения" (СамГУПС).
8. Снижение аварийности, связанной со столкновениями автотракторной техники с железнодорожным подвижным составом / Ю. А. Кочетков, Г. Г. Киселев, С. В. Коркина, А. Г. Старикова // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: Межвузовский сборник научных статей международным участием, Самара, 01–05 апреля 2014 года / Ответственный редактор О. М. Батищева. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2014. – С. 166–170.
9. Киселев, Г. Г. Повышение эффективности системы безопасности на железнодорожных переездах / Г. Г. Киселев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 148–152. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-12-148-152. – EDN FMEVOY.

УДК 620.179.17

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СЕТЕВОГО КОММУТАТОРА

Л. В. Козиенко, П. Н. Коношанов

Иркутский государственный университет путей сообщения

Введение. Современное активное сетевое оборудование такое, как коммутаторы, маршрутизаторы, серверы в процессе работы выделяет значительное количество тепла. Для его отвода применяются системы воздушного охлаждения, основным элементом которых являются осевые вентиляторы. Надёжность системы охлаждения в значительной мере определяет ресурс всего устройства: перегрев электронных компонентов ведёт к деградации диэлектриков, снижению быстродействия и в итоге к преждевременному выходу оборудования из строя.

Отказ вентилятора нередко происходит постепенно: износ подшипников, разбалансировка ротора или загрязнение лопастей крыльчатки проявляются задолго до полной остановки. В связи с этим актуальной задачей становится разработка методов предиктивного

технического обслуживания, позволяющих фиксировать признаки деградации на ранних стадиях [1–3].

Одним из перспективных неразрушающих методов диагностики вращающихся механизмов является акустический контроль [4–5]. Любой механический узел в процессе работы формирует характерный акустический сигнал; изменение его спектрального состава влияет на появление новых гармоник, рост шумового фона, сдвиг частот, которые служат прямым индикатором возникающих неисправностей. Важным практическим преимуществом метода является возможность применения доступных средств регистрации: в частности, встроенных микрофонов смартфонов, что существенно снижает стоимость диагностики и делает её пригодной для оперативного применения в условиях эксплуатации.

Цель настоящей работы состоит в исследовании спектральных характеристик акустического сигнала вентилятора сетевого коммутатора, оценке воспроизводимости результатов при использовании различных смартфонов и определении устойчивых диагностических признаков, пригодных для периодического контроля состояния системы охлаждения.

Объект исследования и методика эксперимента. В качестве объекта исследования выбран сетевой коммутатор Cisco Catalyst 1900, эксплуатировавшийся более 25 лет, сначала в составе локальной вычислительной сети ИрГУПС, затем в лаборатории «Системы передачи информации» кафедры АТС. За весь период эксплуатации техническое обслуживание с вскрытием корпуса не проводилось, замена вентилятора или иных элементов системы охлаждения не производилась. Информация о модели и технических характеристиках установленного вентилятора изначально отсутствовала, что позволило рассматривать исследуемое устройство как систему с неизвестными параметрами, типичное для реальной эксплуатации.

Акустические записи проводились в лабораторном помещении при фоновом уровне шума около 30 дБА. Смартфоны располагались на расстоянии примерно 10 см от вентиляционной решётки коммутатора. Всего выполнено пять независимых измерительных сессий (записи №1–5, табл. 1) с использованием различных моделей мобильных устройств. Форматы записи: WAV или AAC с частотой дискретизации 48 кГц. Для анализа из каждой записи выделялся фрагмент длительностью 15 с после выхода вентилятора на рабочий режим.

Спектральный анализ выполнялся в программе Audacity с использованием оконной функции Хэмминга при размере «окна» 16 384 отсчёта, что обеспечило частотное разрешение ~2,7 Гц на слот. Для всех пяти записей параметры анализа были идентичны, что позволяет сопоставлять полученные спектры.

Теоретические основы спектральной диагностики вентиляторов. При работе осевого вентилятора в его акустическом спектре формируются три основные группы частотных составляющих. Первая – это гармоники вращения вала с частотой $f_s = \text{RPM} / 60$, где RPM – скорость вращения в оборотах в минуту. Вторая – это гармоники прохождения лопастей (Blade Passing Frequency, BPF): $f_{BPF} = f_s \times B$, где B – число лопастей крыльчатки; при этом возбуждаются кратные составляющие $2f_{BPF}$, $3f_{BPF}$ и т. д. Третья группа – это составляющие, обусловленные работой электронной схемы управления двигателем (ШИМ-регулятора), как правило, в диапазоне 500–2000 Гц. Помимо перечисленных, в спектре присутствует широкополосный шум, обусловленный турбулентностью воздушного потока и механическими потерями в подшипниках. В таблице 2 приведена классификация основных видов гармоник, возникающих при работе осевых вентиляторов.

Таблица 1

Параметры акустических записей

№	Модель смартфона	Каналы	Частота дискр., кГц	Разрядность, бит	Время записи, с	Размер файла, Кб	Битрейт, Кбит/с
1	Samsung	Моно	48	16	22,6	2 120	768
2	Redmi Note 12S	Стерео	48	16	24,0	4 509	1536
3	iPhone 11	Моно	48	16	22,8	2 138	768
4	Redmi 9C	Стерео	48	16	22,4	4 208	1536
5	Realme 14T	Стерео	48	16	20,8	3 893	1536

Таблица 2

Основные виды гармоник, возникающих при работе вентилятора

Тип гармоник	Формула / диапазон	Физическая причина	Характер тона
Вращение вала (f_s)	$f_s = \text{RPM} / 60$	Механическое вращение ротора двигателя	Слабый, низкочастотный
Частота Лопастей (BPF)	$f_{BPF} = f_s \times B$	Рассекание воздушного потока лопастями крыльчатки	Наиболее интенсивный
ШИМ-коммутация	$f_{\text{ШИМ}} = 500\text{--}2000 \text{ Гц}$	Электронная схема управления электродвигателем	Громкий, тональный
Кратные Гармоники BPF	$2f_{BPF}, 3f_{BPF}, 4f_{BPF}, \dots$	Нелинейность аэродинамического возбуждения лопастей	Убывающие по амплитуде
Низкочастотный шум ($< 200 \text{ Гц}$)	$< 200 \text{ Гц}$	Отрыв потока, турбулентность у основания лопасти	Широкополосный
Высокочастотный шум ($> 1 \text{ кГц}$)	$1\text{--}10 \text{ кГц}$ и выше	Турбулентность потока, работа подшипников	Широкополосный, зависит от износа

Примечание: f_s – частота вращения вала; RPM – число оборотов в минуту; B – число лопастей крыльчатки.

Результаты спектрального анализа. На рисунках 1–4 представлены амплитудно-частотные спектры акустических сигналов для пяти измерительных сессий. Несмотря на заметные различия в форме кривых, обусловленные конструктивными особенностями применявшихся смартфонов, во всех записях прослеживается единая совокупность диагностически значимых составляющих.

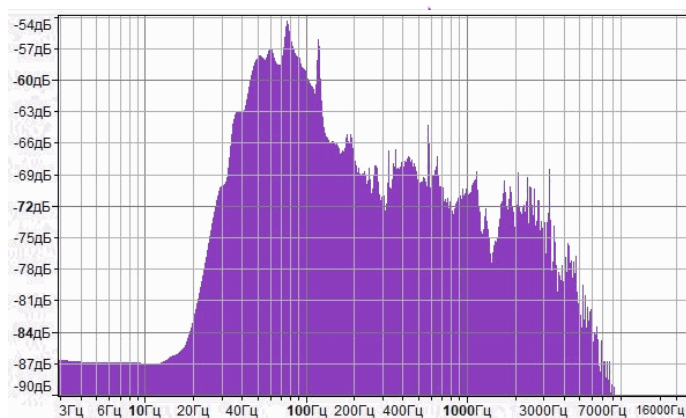


Рис. 1. Спектр акустического сигнала, запись №1

Запись №1 характеризуется высоким уровнем низкочастотного шума (порог -87 дБ): основная энергия сосредоточена в полосе 20–400 Гц, где наблюдается широкий горб с максимумом около -57 дБ в районе 80–100 Гц. В этом же диапазоне фиксируются несколько узких пиков, наиболее заметный из которых расположен вблизи 100 Гц. Выше 1 кГц энергия монотонно убывает, достигая шумового фона около 3–5 кГц. Высокий уровень НЧ-шума обусловлен отсутствием аппаратного шумоподавления в применённом смартфоне; вместе с тем это же обстоятельство позволяет наблюдать неискажённую картину низкочастотной части спектра вентилятора.

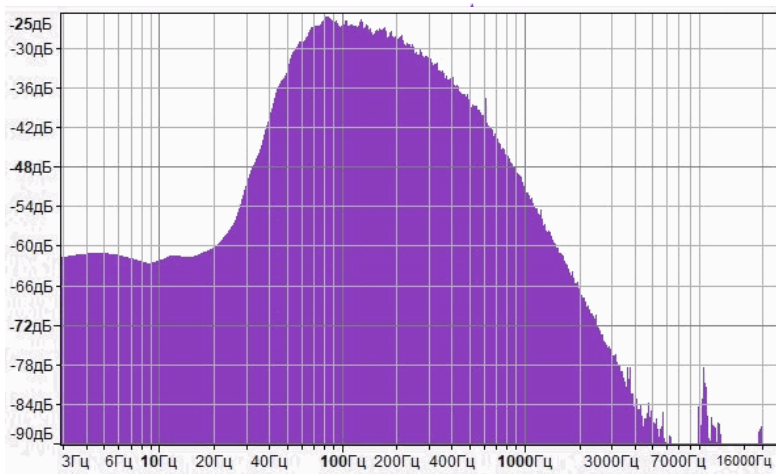


Рис. 2. Спектр акустического сигнала, запись №2

Запись №2 существенно отличается по форме: спектр имеет вид широкого симметричного горба с максимумом около -26 дБ в диапазоне 100–150 Гц. Выше 1 кГц наблюдается резкий обрыв до уровня -78 дБ и ниже. В области 5–20 Гц заметны два локальных возвышения (-61 дБ), вероятно, связанных с вибрацией корпуса коммутатора. Сглаженный характер спектра без острых тональных пиков объясняется работой агрессивного алгоритма шумоподавления и полосовой фильтрацией встроенного микрофона смартфона. Тем не менее частотная область 60–800 Гц воспроизведена достаточно корректно, что позволяет идентифицировать общую структуру сигнала.

Запись №3 демонстрирует двугорбый профиль: первый горб в диапазоне 30–100 Гц (уровень около -63 дБ), второй, значительно более выраженный – в диапазоне 100–400 Гц с максимумом -41 дБ. Отчётливо выделяется узкий тональный пик в районе 600–700 Гц (около -46 дБ) – он соответствует ШИМ-частоте электронной схемы управления двигателем. Выше

1 кГц спектр содержит богатую гребёнку дискретных пиков вплоть до 3 кГц, интерпретируемых как кратные гармоники ВРФ и ШИМ.

Запись №4 выглядит принципиально иначе: низкочастотная составляющая ниже 20 Гц практически отсутствует, что указывает на наличие в смартфоне высокочастотного фильтра-заграждения. Зато в диапазоне 20–200 Гц отчётливо выделяется остроконечный пик около 100 Гц (–46 дБ), а на частоте ~500 Гц – второй узкополосный пик (–49 дБ). Широкий горб 400–2000 Гц содержит множество дискретных составляющих. Подобный профиль характерен для микрофона с подъёмом чувствительности в средних частотах: он подавляет инфразвуковые помехи и акцентирует тональные компоненты, делая их хорошо различимыми.

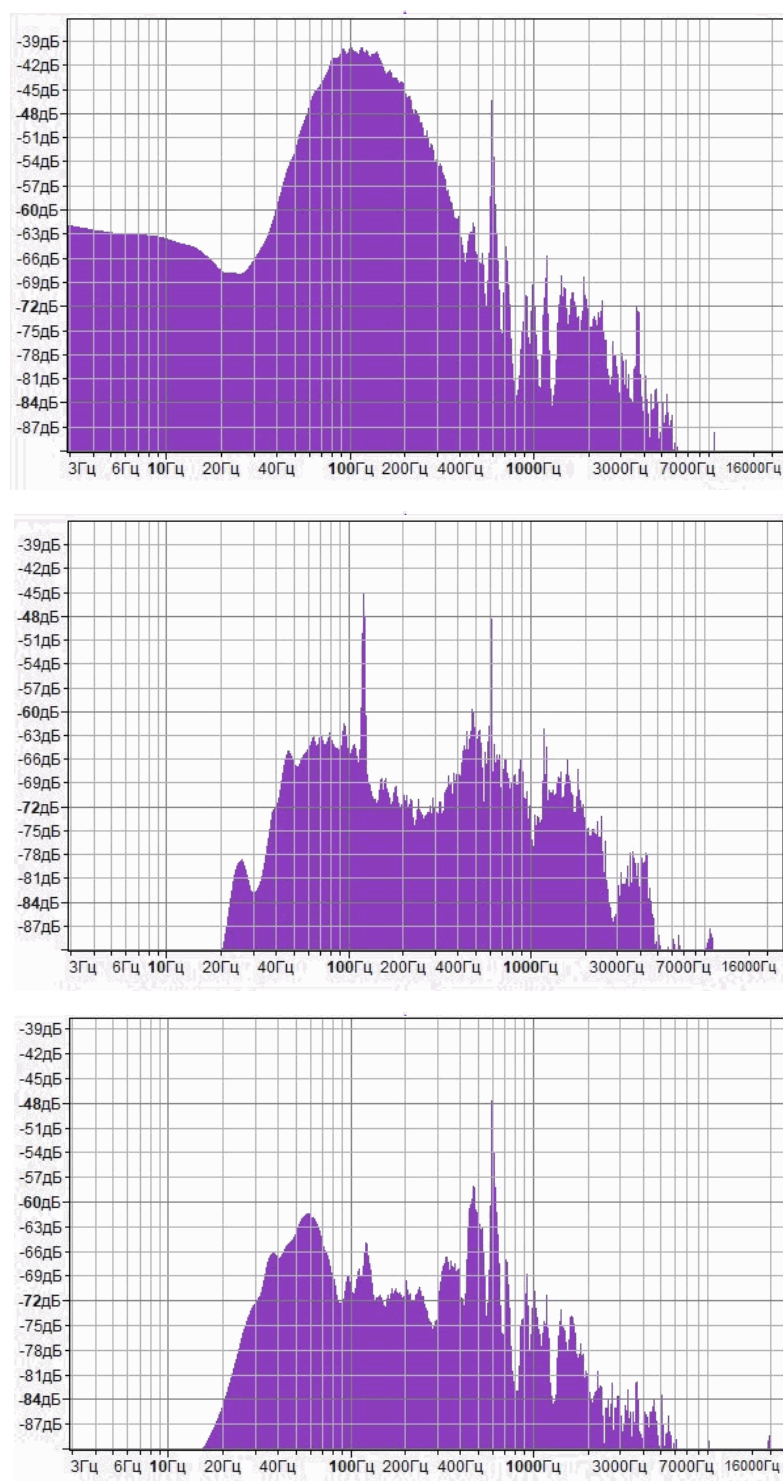


Рис. 3. Спектры акустического сигнала, запись №3, 4 и 5

**Результаты спектрального анализа
акустических записей вентилятора Cisco Catalyst 1900**

Запись	Осн. пик, Гц	BPF, Гц	Особенности спектра	Особенности микрофона / устройства
№1	~80–100	~310	Широкий горб 30–400 Гц, высокий шумовой фон (–87 дБ), несколько узких пиков в 80–120 Гц	Нет шумоподавления; плоская АЧХ до 7 кГц
№2	~100–150	~310	Плавный широкий горб 60–800 Гц (макс. – 26 дБ), резкий обрыв выше 1 кГц	Активное шумоподавление, фильтр высоких частот; повышенная чувствительность
№3	~100–200	~310	Двугорбый профиль; выраженный тональный пик ~600–700 Гц (ШИМ); гребёнка кратных до 3 кГц	Сбалансированная АЧХ; хорошо выделяет тональные составляющие
№4	~100	~310–500	Слабый НЧ-фон (от 20 Гц), два острых узкополосных пика ~100 Гц и ~500 Гц; горб 400–2000 Гц	Фильтр НЧ; выраженный подъём в средних частотах; высокое разрешение тональных пиков
№5	~50–80	~310	Горб 30–80 Гц, провал, второй горб 400–700 Гц; острый пик ~500–600 Гц (ШИМ); богатая гребёнка до 2 кГц	Неравномерная АЧХ с провалом в 100–300 Гц; хорошо регистрирует ШИМ-частоту

Запись №5 занимает промежуточное положение. Спектр состоит из двух выраженных лепестков: первый – горб 30–80 Гц (–62 дБ), второй – горб 400–700 Гц. Между ними прослеживается характерный провал в области 100–300 Гц – особенность АЧХ конкретного микрофона. Острый пик в районе 500–600 Гц (–49 дБ) соответствует ШИМ-гармонике и воспроизводится так же уверенно, как и в записях №3 и №4. Гребёнка кратных гармоник прослеживается до 2 кГц включительно.

Идентификация параметров вентилятора. Сопоставление всех пяти спектров позволяет уверенно выделить три устойчивых тональных компонента: пик в районе 62 Гц (частота вращения вала f_s), пик около 310 Гц (BPF) и пик около 580–600 Гц (ШИМ-управление). По значениям f_s и f_{BPF} вычисляется число лопастей: $B = f_{BPF} / f_s = 310 / 62 \approx 5$. Скорость вращения: $RPM = f_s \times 60 = 62 \times 60 = 3720$ об/мин. Для подтверждения полученных результатов корпус коммутатора был вскрыт. Осмотр показал, что на задней панели установлен двухпроводной бесщёточный вентилятор постоянного тока (BLDC) размером 40×40×10 мм с пятью лопастями крыльчатки, что является полным соответствием акустическим параметрам. Сводные идентифицированные параметры приведены в таблице 4.

ШИМ-гармоника на частоте ~584 Гц обусловлена работой 8-битного таймера схемы управления электродвигателем. При подаче пульсирующего напряжения катушки ротора вибрируют с этой же частотой, передавая колебания на корпус двигателя и формируя

акустическое излучение. Примечательно, что данная составляющая является наиболее информативной с диагностической точки зрения: она уверенно регистрируется во всех трёх наиболее качественных записях (№3–5) независимо от различий в АЧХ микрофонов.

Проведённое исследование подтверждает, что основные спектральные признаки работающего вентилятора: частота вращения вала, BPF и ШИМ-гармоника, они воспроизводятся во всех пяти записях, хотя форма огибающей спектра варьируется в зависимости от типа смартфона. Ключевой вывод состоит в следующем: для надёжного детектирования тональных диагностических признаков достаточно любого современного смартфона, однако для сопоставления спектров, полученных в разные периоды эксплуатации, желательно использовать одно и то же устройство или устройства с близкими характеристиками АЧХ микрофона.

Таблица 4

Идентифицированные параметры вентилятора Cisco Catalyst 1900

Параметр	Значение	Источник
Частота вращения вала f_s	~62 Гц (3720 об/мин)	Спектральный пик, записи №1–№5
Частота лопастей f_{BPF}	~310 Гц	Все записи
Число лопастей $B = f_{BPF} / f_s$	$310 / 62 \approx 5$	Расчёт по формуле
ШИМ-частота управления	~580–600 Гц	Записи №3, №4, №5
Кратные гармоники BPF	620, 930, 1240, 1550 Гц ($\times 2$ – $\times 5$)	Записи №3, №4, №5
Тип вентилятора (по совокупности признаков)	BLDC, 2-провод., 40×40×10 мм, постоянная скорость	Вскрытие корпуса, подтверждено

Вариации в уровнях и частичное перекрытие пиков шумовым фоном в записях №1 и №2 свидетельствуют о том, что для слабых механических гармоник (вращение вала, низкочастотные гармоники подшипников) может потребоваться предварительная фильтрация или применение методов усреднения спектра. Тем не менее основные диагностические признаки обнаруживаются без дополнительной обработки.

Перспективным направлением является накопление базы эталонных спектров для вентиляторов в различных технических состояниях с последующим обучением нейросетевой модели классификации. В таком случае смартфон с соответствующим приложением становится полноценным переносным инструментом предиктивной диагностики системы охлаждения сетевого оборудования.

Заключение. В ходе исследования установлено, что метод акустического контроля с применением встроенных микрофонов смартфонов позволяет надёжно регистрировать основные спектральные составляющие работающего вентилятора сетевого коммутатора. По результатам анализа пяти записей, выполненных разными устройствами, определены следующие параметры вентилятора Cisco Catalyst 1900: число лопастей 5, скорость вращения ~3720 об/мин, ШИМ-частота схемы управления ~584 Гц. Все параметры подтверждены прямым осмотром.

Сравнительный анализ спектров показал, что тональные диагностические признаки воспроизводятся независимо от типа записывающего устройства, тогда как широкополосные и низкоуровневые составляющие существенно зависят от характеристик микрофона. Для периодического мониторинга рекомендуется использовать одно и то же устройство в

одинаковых условиях измерения. Дальнейшее развитие метода предполагает формирование базы эталонных спектров и разработку автоматических алгоритмов классификации технического состояния на основе методов машинного обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grosse, C. U., & Ohtsu, M. (Eds.). (2022). Acoustic Emission Testing. Springer Science & Business Media.
2. Sikorska, J. Z., Hodkiewicz, M., & Ma, L. (2011). Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(5), 1803–1836.
3. Sinha, J. K., Elbibah, K., & D. M. (2014). A future possibility of vibration based condition monitoring of rotating machines. *Journal of Engineering and Technology*, 4(1), 1–19.
4. Капранов Б. И. Акустические методы контроля и диагностики. Часть 1: учебное пособие / Б. И. Капранов, М. М. Коротков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 186 с.
5. ГОСТ 23829–85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения.

УДК 656.25

О ПОДХОДАХ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ НАДЁЖНОСТИ КАНАЛОВ СВЯЗИ НА РАБОТУ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

В. С. Кузьмин, А. Н. Токарев

Российский университет транспорта (МИИТ)

Введение. В условиях высокоскоростного движения предполагается осуществить переход от классических систем интервального регулирования к т. н. гибридным. В гибридных системах регулирования движения поездов для передачи приказов разрешения / запрета на движение используют несколько независимых каналов «поезд – земля»: одного или нескольких индуктивных каналов автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) в составе рельсовых цепей с различными частотами несущих и методами модуляции (например, непрерывного типа АЛСН с частотой несущего сигнала 25 Гц и многозначной двухчастотной непрерывного типа единого ряда АЛС-ЕН-2Ч с двухкратной фазоразностной модуляцией и частотами несущих 175 и 275 Гц [1]) и одного или нескольких беспроводных каналов передачи информации различных стандартов (например, LTE и DMR [2]) и частотных диапазонов (для LTE – 1800 и 350 МГц, для DMR – 160 МГц [2]). Такой подход использован в рамках создания Российской системы управления движением поездов (РСУДП) и призван обеспечить устойчивость графика [3]. Следует также отметить, что применение беспроводных каналов передачи информации в гибридных системах не ограничивается только передачей приказов разрешения / запрета на движение. Широкополосная подвижная связь также призвана решать вопросы передачи большого объёма диагностических данных о состоянии подвижного состава и объектов инфраструктуры [4].

Функционирование каналов передачи информации «поезд – земля» не только в гибридных, но и вообще в любых системах регулирования движения поездов подвержено влиянию различных дестабилизирующих факторов. Одной из проблем, стоящих перед разработчиками гибридных систем, является то, что интенсивность возникновения одиночных отказов (сбоев, приводящих к отсутствию получения бортовым управляющим вычислительным комплексом в установленном интервале времени очередного приказа разрешения на движение) в различных каналах может существенно различаться в зависимости

от инерционности бортовых управляющих вычислительных комплексов при принятии решения о применении экстренного торможения или снижении фактической скорости движения служебным торможением при отсутствии подтверждения ранее полученного приказа разрешения на движение; эксплуатационной протяженности применяемых рельсовых цепей; длительности кодовых комбинаций, передаваемых индуктивным способом; характерной электромагнитной обстановки и т. п. Наличие нескольких каналов передачи информации «поезд – земля» позволяет повысить устойчивость графика движения поездов в случае возникновения одиночных отказов (сбоев) вследствие воздействия в первую очередь характерной электромагнитной обстановки, формируемой высокоскоростным поездом. При этом алгоритмы функционирования гибридных систем интервального регулирования при возникновении одиночных отказов (сбоев) в работе каналов связи могут различаться. Так, в рамках проектных решений для РСУДП предполагается ограничивать скорость движения при отказах радиоканала до 200–300 км/ч [3], а при одновременном отказе всех каналов возможно как служебное торможение в последнюю полученную в приказе прицельную точку, так и применение автостопного торможения.

В отношении РСУДП и предполагаемого к применению электропоезда серии ЭВС360 сведения о надёжных характеристиках каналов передачи информации в настоящее время отсутствуют. Имеются разрозненные сведения, касающиеся влияния тягового тока, протекающего в контактном проводе, на работу бортовых возимых радиостанций и отдельные сведения, посвященные вопросам построения схем канализации тягового тока и тональных рельсовых цепей повышенной длины [5]. Оценка влияния интенсивности возникновения отказов (сбоев) на нарушения графика движения поездов при применении гибридных систем регулирования движения поездов, в первую очередь на величину средней наработки до нарушения графика движения поездов (по аналогии со средней наработкой до отказа), ранее не выполнялась. С учётом этого целью настоящей работы является формирование принципов и подходов к такой оценке.

Материалы и методы. Под отказом (одиночным сбоем) в канале в рамках настоящей работы будет пониматься воздействие электромагнитной помехи или кратковременный выход из строя приёмопередающей аппаратуры по иным причинам, длительность которого превышает инерционность бортовых управляющих вычислительных комплексов при принятии решения о применении экстренного торможения или снижении фактической скорости движения служебным торможением при отсутствии подтверждения ранее полученного приказа разрешения на движение, обеспечивающую внутреннюю помехоустойчивость работы бортовой аппаратуры (основных устройств безопасности), и приводит к неверной интерпретации текущей поездной ситуации: получению более запрещающего приказа или отсутствию получения приказа как такового. Последствием одиночного сбоя будем считать невозможность получения информации о приказе разрешения / запрета на движение вплоть до восстановления канала (с учётом упомянутой инерционности).

Независимыми в рамках исследования будем считать такие два канала, одиночные отказы (сбои), в одном из которых не приводят к отказам (сбоям) другого. Тем самым приказ разрешения на движение к бортовым основным устройствам безопасности не передаётся только в том случае, когда одновременно отказали все доступные каналы, например, вследствие воздействия электромагнитной помехи.

Для оценки влияния надёжных характеристик каналов связи, в первую очередь соотношения между интенсивностями возникновения отказов (сбоев) в каждом из них,

определяемых аналогично методологии, представленной в исследовании [6], целесообразно применять графовые модели.

Вопросам применения таких моделей, особенно в области оценки показателей функциональной безопасности, посвящено значительное количество исследований, в частности [7]. Применяемая в данной работе методология расчета показателей функциональной безопасности может быть распространена и на оценку влияния надёжностных характеристик каналов на нарушения графика движения поездов.

Результаты и их обсуждения. Для анализа применимости теоретических положений, изложенных в работе [7], к решению задачи оценки влияния параметров каналов на реализацию графика движения поездов в условиях применения гибридных систем регулирования, была разработана упрощённая графовая модель (рис. 1), в которой рассматривается система с двумя независимыми каналами передачи информации «поезд – земля»: индуктивным и беспроводным. Также на рисунке приведено расчётное выражение для определения средней наработки T_H до нарушения графика движения поездов.

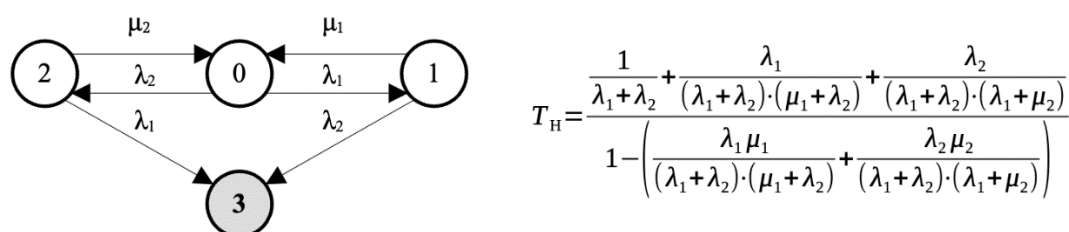


Рис. 1. Предложенная графовая модель и расчётное выражение

В рассмотренном примере имеют место следующие ограничения и допущения. В рамках предложенной модели не учитываются отказы, связанные с функционированием безопасных управляющих вычислительных комплексов напольного сегмента гибридной системы регулирования движения поездов (например, радио-блок-центра) и бортовой аппаратуры, а также нарушения графика движения поездов, связанные с невыполнением условий по безопасности. Предполагается, что движение поездов при штатном функционировании хотя бы одного из каналов осуществляется в соответствии с установленным графиком и действующими ограничениями скоростями без отклонений, приводящих к искусственному снижению пропускной способности и соответствующим нарушениям графика.

Рассматриваемая гибридная система может находиться в следующих состояниях:

0 – оба канала передачи информации «поезд – земля» функционируют штатно, график движения поездов соблюдается;

1 – отказ индуктивного канала рельсовых цепей, определение точки прицельного торможения по беспроводному каналу передачи данных, график движения соблюдается;

2 – отказ беспроводного канала передачи информации, определение точки прицельного торможения по индуктивному каналу рельсовых цепей, график движения соблюдается;

3 – отказ обоих каналов «поезд – земля»; график движения поездов нарушен вследствие применения необоснованного экстренного торможения / служебного торможения в последнюю полученную в предшествующем приказе разрешения на движение ординату.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

λ_1 – интенсивность отказа индуктивного канала передачи информации;

λ_2 – интенсивность отказа беспроводного канала передачи информации;

μ_1 – интенсивность восстановления функционирования индуктивного канала передачи информации;

μ_2 – интенсивность восстановления функционирования беспроводного канала передачи информации.

Предполагается, что среднее время восстановления графика движения поездов существенно превышает среднее время восстановления функционирования каждого из каналов (чаще всего определяется резервами, заложенными в графике движения поездов, в том числе за счёт сокращения времени оборота поезда по конечным точкам маршрута или за счёт сокращения времени / отмены остановки, если это возможно).

С учётом вышеизложенного все состояния системы можно разделить на два множества: $S_1 = \{0, 1, 2\}$, в котором график движения поездов не нарушен $S_2 = \{3\}$, при котором график движения поездов нарушается.

С учётом методологии, приведённой в [7], среднее время наработки T_H до нарушения графика движения поездов определяется на множестве состояний S_1 с учётом выражения, представленного на рисунке 1. Отношение полученной величины к аналогичной T_{HK} для классической системы регулирования движения поездов с одним каналом передачи информации позволяет оценить увеличение времени наработки до нарушения графика движения поездов при применении двух независимых каналов. С учётом этого был получен соответствующий график (рис. 2). При моделировании предполагалось, что $\lambda_1 = 8 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, а $\mu_1 = 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$.

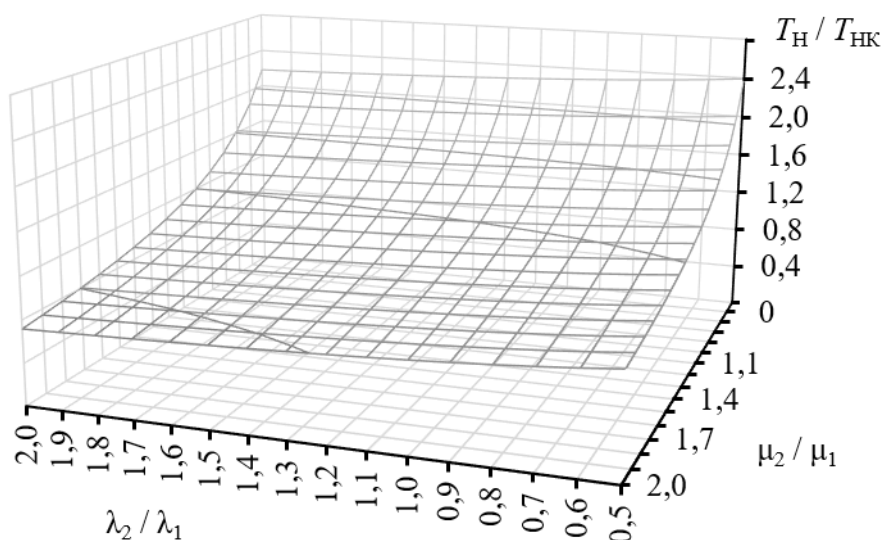


Рис. 2. Результаты моделирования

Анализ графика показал, что при равенстве интенсивностей одиночных отказов (сбоев) среднее время наработки до нарушения графика движения поездов в 1,3 раза выше, чем у классической системы. При большем значении интенсивности отказов радиоканала (при

увеличении соотношения λ_2 / λ_1) время наработки до нарушения графика движения поездов может оказаться ниже, чем у классической системы (при условии одинаковых интенсивностей отказов в индуктивном канале передачи информации в гибридной и классической системах). Так при заданных значениях и равенстве интенсивностей восстановления индуктивного и радиоканала $\mu_1 = \mu_2$ уже при соотношении $\lambda_2 / \lambda_1 = 1,58$ среднее время наработки до нарушения графика для гибридной и классической систем оказывается одинаковым.

Для получения более точной оценки в дальнейшем необходимо разработать обобщённые математические модели, снимающие указанные ограничения и допущения и обеспечивающие оценку влияния на график движения параметров применяемых каналов передачи информации в гибридных системах управления движением поездов при их произвольном числе.

Заключение. В результате выполнения работы на основе известных подходов к оценке показателей функциональной безопасности были сформированы принципы и подходы к оценке влияния надёжностных характеристик каналов «поезд – земля» на график движения поездов при применении гибридных систем регулирования. Предложена простейшая графовая модель для оценки времени наработки до отказа, приводящего к нарушению графика движения поездов при наличии двух различных по интенсивности возникновения сбоя и интенсивности восстановления каналов связи. В условиях принятых ограничений и допущения установлено, что применение двух независимых каналов «поезд – земля» позволяет повысить среднюю наработку до нарушения графика движения поездов.

Последующие исследования должны быть направлены на формирование комплексных моделей, учитывающих большее количество независимых каналов, а также особенности алгоритмов функционирования гибридных систем, включая приоритетность выбора источника получения информации о допустимой и целевой скоростях движения. Полученные результаты представляют практический интерес при разработке технических решений, направленных на повышение устойчивости графика движения поездов средствами автоматики телемеханики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российская система управления и обеспечения безопасности движения поездов на ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург / Е. Н. Розенберг, А. Г. Баранов, А. Д. Сметанина, В. С. Лобанова // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 8. – С. 26–29. – EDN TIBLPX.
2. Единое телекоммуникационное решение для ВСЖМ-1 / А. В. Шурдак, А. О. Ермаков, Д. Е. Новиков, Д. А. Романюк // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 7. – С. 12–14. – DOI 10.62994/AT.2024.7.7.003. – EDN VWLTJF.
3. Розенберг, Е. Н. Проектные решения РСУДП для ВСЖМ-1 / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, А. Г. Баранов // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 3. – С. 2–4. – DOI 10.34649/AT.2024.3.3.001. – EDN FNNPZI.
4. Озеров, А. В. Опыт КНР в области оснащения технологической радиосвязью высокоскоростных железных дорог / А. В. Озеров // Наука и технологии железных дорог. – 2024. – Т. 8, № 4(32). – С. 19–24. – EDN EGRPSW.
5. Воронин, В. А. Выбор параметров рельсовых цепей для ВСЖМ-1 / В. А. Воронин // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 5. – С. 30–33. – EDN ZYUGMN.
6. Анализ работоспособности автоматической локомотивной сигнализации числового кода / В. С. Антоненко, Ю. А. Кравцов, В. М. Сафро, А. Б. Чегуров // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 1(26). – С. 101–113. – EDN NTZCDH.
7. Розенберг, Е. Н. Модели функциональной безопасности двухуровневой системы железнодорожной автоматики и телемеханики / Е. Н. Розенберг, И. Б. Шубинский // Транспорт Урала. – 2006. – № 2(9). – С. 30–36. – EDN KDMJTL.

ТИШЕ ЕДЕШЬ, ДАЛЬШЕ БУДЕШЬ: ПОЛНЫЙ ГИД ПО ВЫБОРУ СЕТЕВЫХ ПРОТОКОЛОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ ИОТ-УСТРОЙСТВ

А. А. Лиенко, Т. С. Зайцева

Сибирский государственный университет путей сообщения

Введение. С развитием средств коммуникации и вычислительной техники широкое распространение получают технологии интернета вещей (IoT). Концепция «умного» дома масштабируется до уровня квартала, и даже целого города, где одним из ключевых направлений автоматизации становится сфера жилищно-коммунального хозяйства.

Большой проблемой здесь является огромное разнообразие устройств и протоколов взаимодействия между ними, а также централизация сбора и обработки информации. Существующие в настоящий момент на рынке решения не могут быть масштабированы до уровня города.

На рынке «умных» устройств представлено огромное разнообразие программно-аппаратных решений по автоматизации. Эти решения варьируются от отдельных до комплексных устройств «под ключ», со своей спецификой работы и различными протоколами. Большой проблемой в данном случае является увязка всех доступных вариантов автоматизации в единую систему.

Одной из основных задач для разработчиков такой системы является обеспечение универсальности работы с различными коммуникационными протоколами передачи данных, однако это требует огромных трудозатрат и в долгосрочной перспективе нецелесообразно, в связи с уходом с рынка устаревших и приходом новых устройств и протоколов. Поэтому перед началом разработки системы необходимо провести сравнительный анализ существующих протоколов передачи данных и оценить возможность и целесообразность интеграции с устройствами, поддерживающими эти протоколы.

Транспортные протоколы обеспечивают надежную передачу и прием данных. Они также должны удовлетворять разнообразные требования устройств IoT, такие как ограничение энергопотребления, минимизация задержек или обеспечение целостности данных в нестабильные условия.

Рассмотрим различные транспортные протоколы, доступные для систем IoT.

Протокол обмена данными MQTT существует более двадцати лет и широко используется в сетях связи различных типов. Интернет вещей – одна из областей, в которой MQTT стал наиболее востребованным.

MQTT – Message Queue Telemetry Transport. MQTT – это стандартный протокол обмена сообщениями для Интернета вещей (IoT). Он разработан как чрезвычайно легкий транспорт обмена сообщениями для публикации/подписки, который идеально подходит для подключения удаленных устройств с небольшим объемом кода и минимальной пропускной способностью сети. Сегодня MQTT используется в самых разных отраслях промышленности, таких как автомобилестроение, производство, телекоммуникации, нефть и газ и т. д.

Протокол отличается высокой масштабируемостью, позволяя объединять в сеть от тысяч, до миллионов устройств в зависимости от из вычислительной мощности. Он также

известен своей простотой в освоении, низкими системными требованиями и широкой совместимостью с интернет-приложениями.

MQTT использует трехчастную структуру сообщений, состоящую из темы, полезной нагрузки и нескольких управляющих флагов, что обеспечивает легкую и эффективную коммуникацию (рис. 1). Раздел является текстовым и иерархическим, что обеспечивает гибкую систему маршрутизации сообщений, в то время как полезная нагрузка, несущая фактические данные, может быть любого размера и типа, включая двоичную и текстовую [1].

Преимуществами использования MQTT для транспортной отрасли являются стабильная работа при движении через зоны перебойной связи, эффективная передача данных с движущихся объектов и поддержка приоритета критических сообщений.

MQTT используется в разных сценариях использования и отраслях. В автомобильной отрасли примером является приложение BMW Car-Sharing, которое использует HiveMQ для надежного подключения. В логистике благодаря протоколу MQTT транспортные компании сокращают расходы и улучшают отслеживание активов.

CoAP – это специализированный облегченный веб-протокол, созданный специально для маломощных устройств. В его основе лежит UDP (протокол пользовательских датогрaмм), который обеспечивает низкие накладные расходы, а модель «запрос – ответ» делает его легковесным (см. рис. 2).



Рис. 1. Структура MQTT



Рис. 2. Структура протокола CoAP

В экосистеме IoT CoAP является предпочтительным протоколом для локальных сетей с большим количеством автономных датчиков и исполнительных устройств, где критически важны низкое энергопотребление и минимальная нагрузка на сеть. Его модель «клиент-сервер» эффективна для получения состояния конкретного устройства по запросу. Протокол широко применяется в промышленном интернете вещей, умных городах, системах домашней автоматизации и сельском хозяйстве, а также в интеллектуальном транспорте: мониторинг дорожных условий, парковка, вывоз отходов. В сложных IoT-системах CoAP часто используется на уровне конечных устройств, а шлюзы транслируют их данные в облачные платформы по протоколу MQTT [2].

Главные преимущества CoAP – это энергоэффективность для автономных датчиков, быстрое оповещение об изменениях и простота интеграции с системами управления.

CoAP используется как легкий протокол для взаимодействия между датчиками и шлюзами в рамках IoT-платформ. Например, Yandex Cloud IoT, КРОК Cloud IoT используются логистическими компаниями для построения собственных систем, поддерживают CoAP наряду с MQTT для подключения устройств с ограниченными ресурсами.

LoRaWAN – это беспроводная технология, получившая значительное распространение в последние годы, в первую очередь благодаря своей способности обеспечивать связь между устройствами IoT на большом расстоянии и низкому энергопотреблению. В основе

технологии лежит одноименный протокол, специально созданный для автономных устройств с батарейным питанием и использующий свободные от лицензирования радиочастотные диапазоны [3].

LoRaWAN произвела революцию в сфере IoT, предложив уникальное сочетание дальности связи и энергоэффективности. При подключении к несотовой сети устройства LoRa способны реализовывать множество IoT-решений, надежно доставляя пакеты с критически важными данными. Данная технология занимает особую нишу, заполняя пробел между сотовыми сетями и стандартами вроде Wi-Fi/BLE (рис. 3). В отличие от них, сотовые решения потребляют много энергии, а Wi-Fi и Bluetooth имеют ограниченный радиус и плохую проникающую способность сквозь стены.

Технология LoRaWAN обладает рядом преимуществ по сравнению с другими технологиями беспроводной связи. К этим преимуществам относятся дальняя связь, низкое энергопотребление, гибкость и низкая стоимость [3].

LoRaWAN идеален для мониторинга активов внутри крупных складских комплексов, логистических парков и на территориях аэропортов. Например, группа «Волма» (логистика цемента и строительных материалов) внедряла решения на базе LoRaWAN для отслеживания подвижного состава и оборудования на своей территории. Компания ОАО «РЖД» также использует LoRaWAN для мониторинга инфраструктуры и грузов на железнодорожных узлах, что позволяет отслеживать вагоны и контейнеры без зависимости от сотовых сетей.

NB-IoT (Narrow Band Internet of Things или узкополосный интернет вещей) – это специальный стандарт связи, созданный для работы маломощных устройств, которые передают небольшой объем данных (рис. 4).

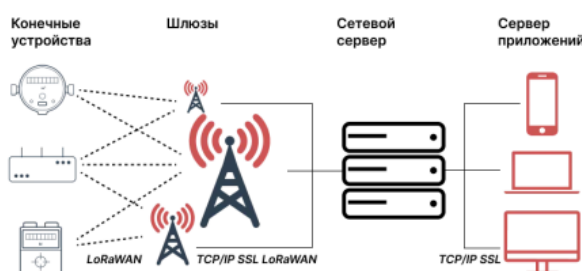


Рис. 3. Технологический стек LoRaWAN

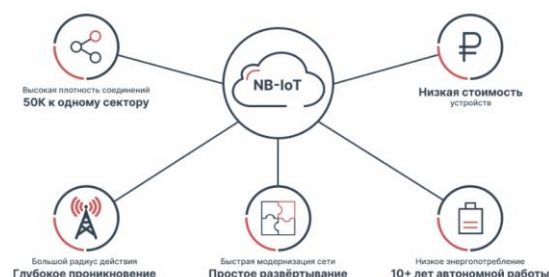


Рис. 4. Особенности NB-IoT

Эта технология предлагает целый ряд преимуществ для решений Интернета вещей, таких как увеличенная зона покрытия, сниженное энергопотребление, продленный срок службы батареи и ускоренное подключение к сети [4].

Благодаря развитию технологии NB-IoT ее использование в различных сферах быстро растет. Телекоммуникационные компании и операторы связи увеличивают инвестиции в разработку улучшенных NB-IoT устройств и развитие сетевой инфраструктуры. Интеграция с искусственным интеллектом и средствами аналитики позволяет бизнесу обрабатывать значительные массивы информации, собираемой с помощью NB-IoT устройств. Ожидается, что дальнейший рост внедрения IoT-устройств вместе с развитием машинного обучения в промышленных и коммерческих приложениях будет стимулировать расширение рынка NB-IoT.

Преимущества NB-IoT – технология поддерживает огромное количество соединений за счет создания сетей, которые подключаются к миллиардам устройств как в помещении, так и на улице; NB-IoT является более энергоэффективным по сравнению с другими сотовыми технологиями благодаря тому, что устройства NB-IoT способны переходить в спящий режим,

когда не передают данные; Минимальный расход заряда в режиме ожидания позволяет NB-IoT поддерживать работу узлов на протяжении длительного периода времени – до 10 лет от одной батарейки [4].

NB-IoT датчики используют логистические операторы, работающие с «Газпромнефтью», для мониторинга перемещения и уровня топлива в цистернах и бензовозах.

Для наглядного сравнения возможностей сетевых протоколов при работе с конкретными типами транспортных IoT-устройств представлена сводная таблица, которая учитывает ключевые операционные требования и условия эксплуатации (см. табл.1).

Таблица 1

Сравнение сетевых протоколов для транспортных IoT-устройств

Характеристика	MQTT	CoAP	LoRaWAN	NB-IoT
Архитектура передачи	Издатель-подписчик	Запрос-ответ	Звезда	Звезда
Транспортный уровень	TCP	UDP	LoRa PHY	LTE Cat-NB1
Энергопотребление	Среднее	Низкое	Очень низкое	Высокое
Скорость передачи	10–100 кбит/с	10–50 кбит/с	0.3–50 кбит/с	20–250 кбит/с
Задержка	50–500 мс	100–1000 мс	1–10 с	1.5–10 с
Дальность связи	Зависит от сети	Зависит от сети	2–15 км (город) 15–45 км (село)	1–10 км
Частота передачи	Высокая	Средняя	Низкая (редкие сообщения)	Высокая
Стоимость внедрения	Низкая	Низкая	Очень низкая	Высокая
Эксплуатационные расходы	Низкие	Низкие	Очень низкие	Высокие (абонплата)
Надежность доставки	Высокая (с QoS)	Средняя	Низкая-средняя	Очень высокая

Из таблицы следует, что MQTT оптимален для систем, требующих минимальной задержки и высокой надежности передачи данных в реальном времени, таких как управление транспортными потоками и экстренные оповещения. CoAP подходит для статичной дорожной инфраструктуры благодаря балансу энергоэффективности и функциональности. LoRaWAN незаменим для задач долгосрочного мониторинга с многолетней работой от батареи, но ограничен низкой скоростью передачи. NB-IoT обеспечивает премиальную надежность и мобильность для критически важных приложений, однако требует значительных эксплуатационных затрат.

На основе проведенного сравнительного анализа ключевых характеристик сетевых протоколов были сформулированы конкретные рекомендации для различных сценариев использования в интеллектуальных транспортных системах.

Для систем управления движением в реальном времени, таких как умные светофоры и адаптивное управление потоками, рекомендуется MQTT благодаря минимальной задержке и надежной доставке с QoS. Для статичной дорожной инфраструктуры (датчики парковок, мониторинг дорожного покрытия) оптимален CoAP, обеспечивающий баланс энергоэффективности и функциональности. Для долгосрочного мониторинга транспорта и грузов, где критична автономность устройств, предпочтителен LoRaWAN, позволяющий

работать годами от батареи. Для критически важных систем (платные дороги, экстренные оповещения) следует выбирать NB-IoT, гарантирующий высочайшую надежность связи, несмотря на более высокие эксплуатационные затраты. Для телематических систем коммерческого транспорта подходит MQTT в сочетании с сотовыми сетями для баланса стоимости и функциональности.

Проведенный анализ демонстрирует отсутствие универсального решения для всех задач транспортного IoT. Выбор оптимального протокола должен основываться на конкретных требованиях приложения, учитывая компромисс между энергоэффективностью, пропускной способностью, задержкой и стоимостью. Дальнейшее развитие транспортных IoT-систем будет связано с созданием интеллектуальных адаптивных систем, способных динамически выбирать оптимальные протоколы связи в зависимости от текущих условий и требований приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сетевые протоколы IoT: ключевые протоколы, используемые в сетях IoT [Электронный ресурс] // Diverse Daily. – URL: <https://diversedaily.com/iot-networking-protocols-key-protocols-used-in-iot-networking/> (дата обращения: 03.11.2025).
2. Протокол ограниченных приложений [Электронный ресурс] // Рувики. – URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/CoAP> (дата обращения: 03.11.2025).
3. Обзор LoRaWAN и её применение в IoT [Электронный ресурс] // Nekta. – URL: <https://neka.tech/blog/ispolzovanie-lorawan-v-internete-veshhej-obzor-tekhnologii/> (дата обращения: 03.11.2025).
4. Что такое NB-IoT? Технология IOT передачи данных [Электронный ресурс] // Iotans. – URL: <https://iotans.ru/chto-takoe-nb-iot-tekhnologiya-iot-peredachi-dannyh/> (дата обращения: 03.11.2025).

УДК 656.259.12:004.72

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ СЕТИ НА СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ О СОСТОЯНИИ НАПОЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЖАТ

В. А. Надежкин, С. А. Надежкина

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. Эффективность и стабильность интервального управления движением поездов во многом определяются оперативностью и своевременностью поступления достоверных содержательных диагностических данных о контрольном состоянии напольных объектов железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), в частности таких элементов, как рельсовые цепи, токопроводящие рельсовые стыки, изолирующие стыки [1].

Существующие на сегодняшний день системы мониторинга на линейных участках железных дорог применяют различные по своей физической природе топологии сети касательно транспортировки телеметрической информации по каналам сбора диагностических данных о состоянии компонент ЖАТ. В связи со стремительным нарастанием объема поступающей информации с напольного оборудования по телемеханическим каналам связи и применением ограниченных по своим характеристикам применяемых топологий сети, эксплуатационная составляющая объектов ЖАТ постепенно снижается вследствие низкой пропускной способности каналов передачи диагностических

данных, значительных задержек при передаче пакетированной информации с одного оконечного пункта на другой, неполноты контроля параметров оборудования и, соответственно, высокого уровня ложных срабатываний [2]. Именно поэтому актуальность работы обусловлена необходимостью анализа влияния топологий сети в условиях нарастающей плотности потока пакетов диагностических данных и обоснованием выбора наиболее актуальной топологии сети связи для мониторинга текущего состояния компонент систем технической диагностики.

Целью работы является оценка влияния структуры топологии сети связи на временные параметры доставки пакетов данных о состоянии напольных объектов ЖАТ.

Материалы и методы. Методологической основой проводимого исследования являются базовые положения теории передачи пакетной информации, а также принципы построения отказоустойчивых инфотелекоммуникационных архитектур сети связи на основе эталонной модели OSI [3, 4].

Анализ влияния топологии сети связи на пропускную способность каналов передачи пакетов данных проводился на основе трех наиболее часто используемых эталонных моделей:

- линейная топология, при которой все используемые медиаконвертеры сигнальных точек последовательным образом подключены к одному оптическому волокну для непосредственной транспортировки пакетов данных в обе стороны [5]. При возникновении отказа одного из эксплуатируемых узлов происходит потеря связи с последующими задействованными узлами. Вследствие этого, линейная топология характеризуется наиболее явной уязвимостью к единичным отказам в работе и увеличением задержки передачи данных (рис. 1);

- звездообразная топология, обеспечивающая подключение всех контролируемых сигнальных точек к центральному коммутатору, расположенному на посту ЭЦ. При такой структуре центральный узел при появлении неисправности является единственной точкой отказа, соответственно, при этой топологии основным недостатком выступает полная потеря работоспособности сети при отказе центрального узла (рис. 2).

- кольцевая топология сети связи, за счет которой организуется замкнутый контур соединения каждого медиаконвертера друг с другом. Транспортировка диагностических данных реализуется в одном направлении по часовой стрелке с возможностью перенаправления движения пакетов данных вследствие возникновения неисправности или обрыва кабеля. За счет активизации резервного маршрута такая топология сети связи является наиболее перспективной и удобной в реализации (рис. 3).

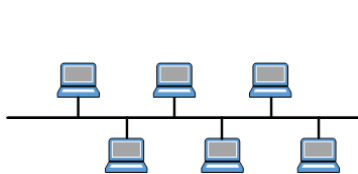


Рис. 1. Линейная топология сети связи

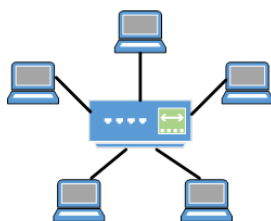


Рис. 2. Архитектура сети связи в виде топологии «звезда»

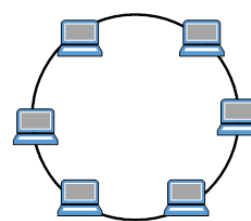


Рис. 3. Кольцевая структура передачи содержательных данных

Так, в ходе имитационного эксперимента в программном эмуляторе сети по временным характеристикам каждой рассматриваемой топологии передачи информации получены

значения среднего времени восстановления связности после разрыва эксплуатируемого кабеля, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная оценка влияния топологии сети на скорость транспортировки информации

Параметр сравнения	Линейная архитектура сети связи	Топология «Звезда»	Кольцевая топология сети передачи данных
Среднее время задержки доставки пакета данных, мс	2,1 – 18,7 (показатель увеличивается в соответствии с числом задействованных узлов)	1,8 (показатель постоянный, не зависит от количества узлов)	2,3 (при прямом направлении) 4,5 (при резервном пути)
Период восстановления связности при отказе, с	6,8	3,2	<0,5, поскольку происходит своевременное переключение на резервный путь

Анализ полученных результатов доказывает, что наилучшее сочетание надежности, времени восстановления при появлении дефекта в работе, задержке в масштабировании и периоде переключения на резервный путь демонстрирует кольцевая топология сети связи, что делает ее наиболее предпочтительной для организации передачи содержательных данных о текущем состоянии компонент систем ЖАТ.

Выводы. Проведенное исследование подтвердило, что выбор топологии сети связи оказывает определяющее влияние на временные параметры передачи информации о состоянии напольного оборудования. Кольцевая структура транспортировки пакетов данных с обеспечением резервного пути передачи при возникновении отказа или обрыва кабеля становится оптимальным инструментом для сети железных дорог, позволяя обеспечивать мгновенное переключение маршрута передачи информации, тем самым устанавливая высокую отказоустойчивость. Дальнейшие исследования будут направлены на формирование методики адаптивного определения вида топологии в зависимости от протяженности и вида участка, интенсивности потока отказов и предъявляемых условий к пропускной способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефанов, Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2016. – 171 с. – EDN XEZRCX.
2. Надежкин, В. А. Оценка влияния на восстанавливаемость устройств ЖАТ использования систем технического диагностирования и мониторинга / В. А. Надежкин, С. А. Надежкина, А. Р. Мусин // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования. – Казань: КГЭУ, 2025. – С. 444–448. – EDN IWXPWF.
3. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с. – ISBN 978-5-49807-389-7.
4. Сарычева, С. А. Цифровые сквозные технологии в условиях современной экономики / С. А. Сарычева, А. О. Кочетова, В. А. Надежкин // Актуальные проблемы развития экономических, финансовых и кредитных систем : сборник материалов X Международной научно-практической конференции, Белгород, 15 сентября 2022 года. – Белгород: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2022. – С. 407–410. – EDN EWWIHU.
5. Васин, Н. Н. Системы и сети пакетной коммутации. Часть 1. Основы построения сетей пакетной коммутации: учебное пособие. Самара: ПГУТИ, ИУНЛ, 2015. 238 с.

БЕСКОНТАКТНОЕ УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ СХОДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**В. А. Надежкин, П. А. Данилина***Приволжский государственный университет путей сообщения*

Введение. Повышение интенсивности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте сопровождается ростом осевых нагрузок, скоростей движения и длины составов, что повышает требования к системам обеспечения движения поездов. Критически важным является раннее выявление схода колесной пары, а также появление волочащихся или провисающих элементов, нарушающих нижний габарит. Несвоевременное обнаружение таких неисправностей приводит к повреждению верхнего строения пути, стрелочных переводов, напольного оборудования СЦБ и может спровоцировать аварийные ситуации с тяжелыми последствиями.

В настоящее время основным средством контроля на сети железных дорог служат устройства контроля схода подвижного состава (УКСПС), функционирующие на принципе механического разрушения токопроводящих датчиков при контакте с сошедшей колесной парой или волочащейся деталью. Разрыв последовательной электрической цепи инициирует формирование запрещающего сигнала на входных светофорах. Однако многолетняя эксплуатация выявила системные ограничения данной схемы. Во-первых, после каждого срабатывания требуется замена датчиков и восстановление контура, что увеличивает время простоя оборудования. Во-вторых, статистика отказов показывает, что до 90% тревог являются ложными, вызываясь ударными воздействиями посторонних предметов, а также нарушением электрического контакта в соединительных узлах вследствие вибраций и коррозии [1]. Каждый ложный сигнал влечет остановку поезда и визуальный осмотр состава, что приводит к сбоям графика движения.

Наиболее существенным недостатком УКСПС следует признать отсутствие информации о пространственной локализации события. Поскольку разрушение может произойти в любой точке цепи, определение неисправного вагона или тележки осуществляется лишь путем послеостановочного осмотра всего состава, что при большой длине поезда и ограниченной видимости занимает значительное время.

Материалы и методы. В связи с этим требуется разработка бесконтактного устройства контроля схода подвижного состава. Разрабатываемое устройство использует комбинацию двух типов датчиков: фотоэлектрических пар сквозного типа и индуктивного датчика счета осей. Первые формируют контролируемую оптическую зону в пределах рельсовой колеи, вторые обеспечивают дискретизацию подвижного состава по осям с определением порядкового номера и направления движения (рис. 1).

Конфигурация оптических каналов включает три независимых луча: нижний, расположенный поперек пути на высоте 40–60 мм относительно головки, и два боковых, смещенных к внутренним граням рельсов на том же уровне. В качестве излучателей и приемников предложены датчики серии SICK GSE6, имеющие степень защиты IP67, рабочий диапазон температур от – 25 до +55 °С и дальность действия до 15 м [2]. Применение модулированного инфракрасного сигнала с временной селекцией позволяет подавить влияние внешней засветки.

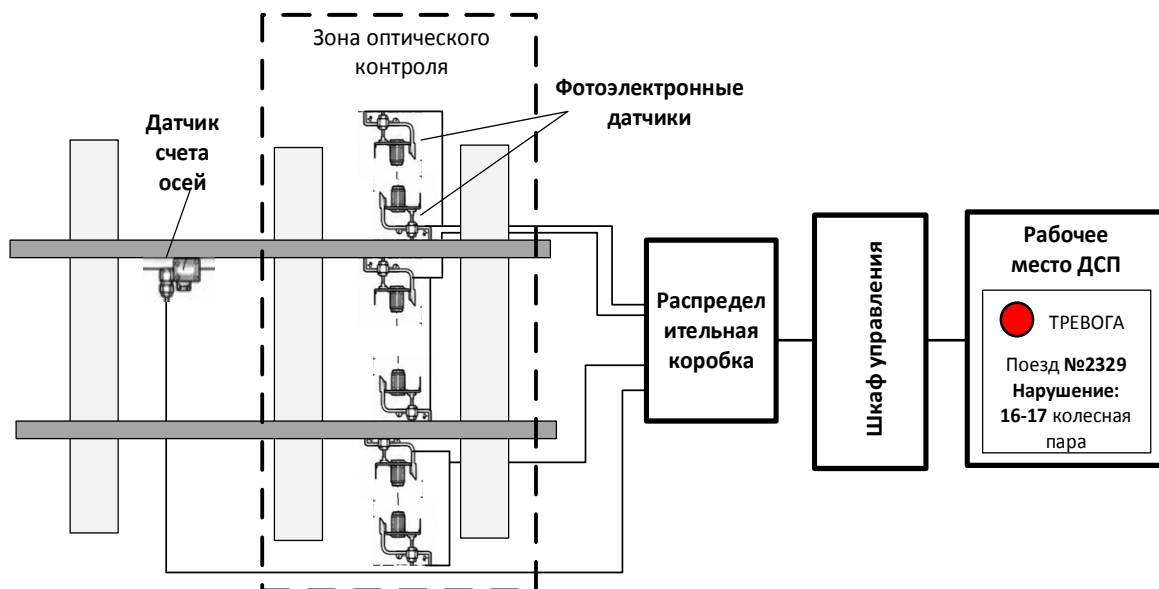


Рис. 1. Функциональная схема системы бесконтактного устройства контроля схода подвижного состава

Датчик счета осей (типа ДПЭП) монтируется на подошве рельса перед зоной оптического контроля на расстоянии около 1,5 м. Его работа основана на изменении индуктивности двух последовательных чувствительных элементов при прохождении гребня колеса. Разность фаз сигналов определяет направление движения, а подсчет импульсов дает порядковый номер оси. Устройство обеспечивает регистрацию на скоростях до 400 км/ч в температурном интервале от -60 до $+70$ °С.

Центральным элементом системы служит микроконтроллер, принимающий сигналы от датчиков и реализующий алгоритм принятия решений. В режиме ожидания контроллер периодически проводит самодиагностику оптических каналов – при отсутствии сигнала (загрязнение, обледенение) формируется диагностическое сообщение, но не тревога. Переход в рабочий режим инициируется первым импульсом счетчика осей, что соответствует вступлению поезда на контролируемый участок. С этого момента начинается непрерывный подсчет осей и мониторинг состояния каждого луча.

При перекрытии любого луча на время, превышающее заданный порог (временная фильтрация для подавления кратковременных помех), контроллер фиксирует текущее значение счетчика осей и определяет интервал между последней пройденной и следующей ожидаемой осью. Например, если пересечение произошло после 16-й оси, а 17-я еще не зарегистрирована, то нарушение локализовано в межосевом промежутке 16–17. Тревожное сообщение с указанием этого интервала передается на пульт ДСП и может дублироваться по радиоканалу. После освобождения участка, т. е. при отсутствии импульсов от счетчика в течение заданной выдержки, система производит сброс и возвращается в исходное состояние. Все события сохраняются в энергонезависимой памяти с отметкой времени и передаются на табло дежурному по станции.

Для обеспечения работоспособности в зимних условиях предусмотрен локальный электрообогрев оптических элементов с использованием саморегулируемого нагревательного кабеля, поддерживающего положительную температуру на поверхности линз и в зоне прохождения луча [3]. Управление обогревом осуществляется по сигналу внешнего термодатчика.

Для верификации предложенных алгоритмов был разработан лабораторный макет на основе микроконтроллера, фотоэлектрической пары (передатчик–приемник) и символьного дисплея 16×2. Программное обеспечение эмулирует подсчет осей и реализует логику формирования тревоги при перекрытии луча. При свободном состоянии луча на индикатор выводится статус «Нормальное состояние»; при перекрытии генерируется сообщение «Тревога X-Y», где X – текущий номер оси, $Y = X + 1$. Дополнительно данные транслируются в последовательный порт для регистрации.

Испытания макета подтвердили корректность детектирования перекрытия, устойчивость к кратковременным помехам, а также однозначную привязку события к текущему значению счетчика. Полученные результаты подтверждают принципиальную реализуемость системы и корректность выбранного метода локализации.

Отказ от разрушаемых элементов исключает затраты на восстановление после каждого срабатывания – оптический канал восстанавливается автоматически после ухода перекрывающего объекта. Определение межосевого интервала локализует зону поиска неисправности, сокращая время осмотра состава.

Заключение. Предложенная бесконтактная система контроля схода подвижного состава с определением межосевого интервала нарушения представляет собой альтернативу традиционным УКСПС. Комбинирование оптической регистрации габарита с индуктивным счетом осей обеспечивает высокую достоверность и информативность. Лабораторные испытания подтвердили работоспособность алгоритма. Внедрение устройства на реальных участках позволит повысить безопасность движения и снизить эксплуатационные издержки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бейбулатова, С. И. Этапы повышения надежности конструкции датчиков УКСПС / С. И. Бейбулатова, Д. И. Селиверов. – Текст : непосредственный // Технические науки: традиции и инновации : материалы I Междунар. науч. конф. (г. Челябинск, январь 2012 г.). – Челябинск : Два комсомольца, 2012. – С. 56–58. – URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/6/1310>.
2. SICK. GSE6-P4212. Фотоэлектрические датчики в миниатюрном корпусе : технический паспорт изделия. – Waldkirch : SICK AG, 2021. – 7 с. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sick.com/media/pdf/9/49/049/dataSheet_GSE6-4212_1061396_ru.pdf (дата обращения: 20.03.2026).
3. Обогрев стрелочных переводов ОС-АТС : техническое описание. – М. : ООО «АТС-Технологии», 2019. – 16 с. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://atsvarka.ru/portfolio/produkcija/sistema-ehlektroobogreva-strelochnykh-perevodov?ysclid=mpd7cuwbi8357507415> (дата обращения: 20.03.2026).

УДК 621.396.9:656.2

ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ ПОЕЗДОВ ЗА СЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ МЕЖДУ РАДИОИНТЕРФЕЙСАМИ (LTE, 5G, Wi-Fi, DMR)

А. П. Припутников, Т. Б. Шокиров

Приволжский государственный университет путей сообщения

Актуальность: Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики предъявляют повышенные требования к каналам передачи данных. Такие критически важные

функции, как передача команд автоматического торможения, сигнализация состояния путевого развития и голосовая связь между диспетчерским пунктом и локомотивной бригадой, не допускают перерывов в соединении. Вместе с тем ни одна из существующих технологий радиодоступа не способна гарантировать стабильное покрытие на всем протяжении маршрута следования. Тоннельные участки, горная местность, плотная городская застройка формируют зоны с неуверенным приемом, а сложная электромагнитная обстановка на сортировочных станциях дополнительно усугубляет ситуацию.

Особую значимость данная проблема приобретает в свете предстоящего завершения эксплуатационного цикла системы GSM-R, запланированного на 2030 год, и перехода к платформе нового поколения FRMCS. Данная архитектура, строящаяся на основе стандартов 5G NR, предполагает использование широкого набора радиointерфейсов, включая LTE, Wi-Fi и спутниковые каналы. В условиях движения высокоскоростных поездов со скоростями до 350–400 км/ч смена сот происходит каждые 30–60 секунд, а вероятность сбоя при переключении возрастает пропорционально скорости. Указанные обстоятельства диктуют необходимость создания интеллектуальных алгоритмов, способных заблаговременно определять наиболее подходящий радиointерфейс и осуществлять переключение с минимальной задержкой.

Постановка задачи. Настоящая работа посвящена разработке и экспериментальной оценке механизма динамического переключения между разнородными радиointерфейсами для повышения живучести систем связи на железнодорожном транспорте. Для реализации поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

Провести анализ существующих подходов к организации хендвера в условиях высокоскоростного движения и выявить их ограничения.

Разработать алгоритм прогнозирующего выбора целевого радиointерфейса, использующий нейросетевую модель LSTM.

Предложить процедуру бесшовного переключения с применением механизма Make-Before-Break и мульти-коннективности.

Выполнить имитационное моделирование и количественно оценить эффективность предложенных решений.

Методы решения задачи 1. Общая архитектура системы:

Предлагаемое решение базируется на трехуровневой архитектуре, включающей следующие компоненты:

Подсистема сбора данных. Бортовой маршрутизатор осуществляет непрерывный мониторинг показателей качества для всех доступных радиотехнологий: уровень принимаемого сигнала (RSSI), отношение сигнал-шум (SNR), круговое время задержки (RTT) и степень загрузки канала. Параллельно фиксируются текущая скорость состава и координаты GPS.

Подсистема прогнозирования. На основе накопленных временных рядов LSTM-сеть вычисляет прогнозные значения показателей качества для каждого из каналов на горизонте планирования, составляющем 5 секунд. Архитектура нейронной сети включает скрытый слой с 64 нейронами, обучение выполняется с использованием оптимизатора Adam, в качестве функции потерь выбрана среднеквадратичная ошибка (MSE).

Подсистема принятия решений. На основе прогнозных значений с учетом заданных приоритетов – минимизация задержки для критического трафика и максимизация пропускной способности для пассажирского – выбирается целевой интерфейс и инициируется процедура коммутации.

2. Модель прогнозирования на основе LSTM: (Приложение 1).

Результатом вычислений LSTM-сети является набор предсказаний, а именно – ожидаемые значения SNR и задержки для каждого из интерфейсов (LTE, 5G, Wi-Fi) на момент времени, отстоящий на Δt от текущего. Для настройки весовых коэффициентов модели использовались реальные трассы, записанные в различных условиях эксплуатации: на равнинных и горных участках, при низких и высоких скоростях движения. В распоряжении обучающего алгоритма находилось 100 тысяч точек данных, из которых 20% были зарезервированы для проверки точности на независимых данных.

3. Алгоритм динамической коммутации:

Для реализации процедуры динамического переключения между различными радиотехнологиями был разработан программный модуль HandoverController, функциональность которого охватывает три основных аспекта: обоснованный выбор целевого канала, бесшовную смену интерфейса по схеме Make-Before-Break и резервирование критически важных команд через несколько каналов одновременно.

3.1. Обоснование выбора целевого интерфейса:

Определение наиболее подходящего радиоинтерфейса базируется на прогностических оценках SNR и временной задержки, вырабатываемых LSTM-моделью. При этом решающее правило дифференцируется в зависимости от категории обслуживаемого трафика. Для приложений безопасности (управление торможением, автоблокировка):

- для задач, связанных с обеспечением безопасности (торможение, сигнализация), приоритет отдается минимизации задержки при условии, что прогнозируемое отношение сигнал-шум превышает порог в 15 дБ:

$$- RAT_{target} = \arg \min_i (\text{PredictedLatency}_i) \text{ при } \text{PredictedSNR}_i > 15 \text{ дБ}$$

Для пассажирского трафика (интернет-сервисы, мультимедиа) критерием выступает максимизация пропускной способности канала при соблюдении ограничения по задержке менее 50 мс: $RAT_{target} = \arg \max_i (\text{PredictedBandwidth}_i) \text{ при } \text{PredictedLatency}_i < 50 \text{ мс}$

3.2. Механизм бесшовной смены канала:

Процесс переключения между интерфейсами организован по принципу Make-Before-Break, гарантирующему непрерывность обслуживания. Данный подход предусматривает следующую последовательность операций:

- инициализация соединения через выбранный целевой интерфейс параллельно с существующим каналом.
- включение режима двунаправленной буферизации с дублированием передаваемых пакетов на период коммутации.
- после получения подтверждения стабильной работы нового канала – штатное завершение работы через старый интерфейс.

Реализация описанной логики содержится в методе `perform_handover`. Временные затраты на переключение, согласно результатам моделирования, укладываются в диапазон 30–50 мс, что соответствует требованиям URLLC для систем управления подвижными объектами.

3.3. Многоканальное резервирование:

С целью повышения гарантий доставки управляющих сигналов, относящихся к категории критических, задействуется механизм многосетевого соединения. Суть его состоит в том, что особо важная команда (к примеру, сигнал экстренного торможения) направляется одновременно по двум каналам с наилучшими показателями качества. Функция `send_critical_command` управляет процессом дублированной отправки, а при

отсутствии подтверждения – инициирует повторные попытки передачи. Применение данного подхода обеспечивает снижение вероятности потери критического пакета на 5–10% в условиях ухудшения электромагнитной обстановки, что коррелирует с результатами экспериментальных исследований.

Анализ полученных результатов.

1. Тестовые кейсы. Оценка эффективности разработанного алгоритма выполнялась с использованием имитационного моделирования. Было рассмотрено три типовых сценария, отражающих различные эксплуатационные условия железнодорожного транспорта. В таблице 1 приведены параметры каждого из них: скоростной режим, характер местности и набор доступных радиотехнологий. Моделирование каждого сценария осуществлялось в течение 60 минут непрерывного движения.

Таблица 1

Сценарии тестирования

Сценарии	Скорость, км/ч	Тип местности	Доступные интерфейсы
Сценарий 1	150	Городская застройка	LTE, Wi-Fi
Сценарий 2	300	Пригородная трасса	5G, LTE
Сценарий 3	350	Тоннели / горный рельеф	LTE, DMR

Длительность моделирования каждого сценария – 60 минут непрерывного движения.

2. Оценка эффективности. Сравнительный анализ проводился по четырем показателям: доля успешных переключений, длительность перерыва в передаче данных, интенсивность потерь пакетов и средняя задержка доставки. В таблице 2 представлены результаты для двух вариантов – базового (без применения оптимизации) и с использованием предложенного алгоритма.

Таблица 2

Метрики и результаты

Метрика	Без оптимизации	Предлагаемый алгоритм	Улучшение
Успешность хендвера (среднее), %	89.3	94.5	+5.2 п.п.
Время прерывания связи (среднее), мс	84	42	50%
Потери пакетов (средние), %	2.8	0.7	75%
Средняя задержка, мс	35	22	37%

Наибольший прирост показателя успешности переключений зафиксирован в третьем сценарии, характеризующемся тоннельными участками и пересеченной местностью. Здесь доля успешных хендверов возросла с 86,1 до 93,8%. Данное улучшение обусловлено возможностью алгоритма заблаговременно определять моменты ухудшения сигнала и заранее инициировать переключение на резервный DMR-канал.

3. Сопоставление с существующими решениями. Для объективной оценки эффективности разработанного алгоритма было выполнено сравнение с результатами, представленными в научной литературе по проблематике хендвера в высокоскоростных

железнодорожных сетях. В таблице 3 приведены данные по доле успешных переключений для нескольких референтных подходов, а также для предлагаемого в настоящей работе решения.

Таблица 3

Сравнение с известными подходами

Подход	Источник	Успешность хендовера, %
Успешность хендовера (среднее), %	89.3	94.5
Время прерывания связи (среднее), мс	84	42
Подход	Источник	Успешность хендовера, %
Потери пакетов (средние), %	2.8	0.7
Средняя задержка, мс	35	22

Как видно из представленных данных, предложенный алгоритм демонстрирует прирост успешности переключений в диапазоне от 1,7 до 4,4 процентных пункта относительно рассмотренных аналогов. Учитывая, что для систем класса SIL минимально допустимый порог успешности хендовера составляет 95%, достигнутое значение (94,5%) находится на границе требований, что подтверждает практическую значимость разработанного решения.

Практическое приложение результатов. Разработанный механизм динамической коммутации радиоканалов ориентирован на внедрение в составе бортового оборудования в рамках архитектуры перспективной системы FRMCS в качестве модуля интеллектуальной RAT-маршрутизации. Ниже приведены основные сценарии его практического использования.

Высокоскоростные железнодорожные линии. На магистральных, где движение осуществляется со скоростями до 400 км/ч, приоритетными технологиями выступают 5G и LTE. Упреждающий выбор интерфейса выполняется на основе данных о текущей скорости и координатах поезда, что позволяет минимизировать риски сбоя при смене сот.

Участки со сложным профилем и тоннели. При приближении к зонам, где прогнозируется ухудшение или потеря сигнала сотовых сетей, алгоритм заблаговременно инициирует переключение на DMR-канал. После выхода на открытый участок производится автоматический возврат к 5G или LTE.

Крупные сортировочные станции и городские транспортные узлы. В условиях высокой плотности радиоэлектронного оборудования и интенсивного обмена данными предлагается использовать Wi-Fi-сети, развернутые на инфраструктурных объектах, для передачи больших массивов телеметрической информации. Управляющие же команды, требующие минимальной задержки, продолжают передаваться через LTE/5G.

Резервирование каналов для критически важных команд. Применение многосетевого соединения с дублированием сигналов управления позволяет достичь уровня надежности, соответствующего требованиям SIL-4 для систем автоблокировки и автоматического торможения.

Оптимальная конфигурация бортового оборудования включает четыре модема (LTE, 5G, Wi-Fi, DMR), интегрированных в единую аппаратную платформу с отдельным процессорным модулем для выполнения LSTM-прогнозов. Согласно результатам имитационного моделирования, время переключения не превышает 50 мс, что согласуется с нормативными требованиями URLLC для приложений управления подвижным составом.

Выводы. По итогам проведенного исследования можно сформулировать следующие основные результаты:

Обзор существующих решений в области управления переключениями между сотами показывает, что они разработаны без учета особенностей железнодорожного транспорта. В частности, традиционные механизмы хендвера не обеспечивают необходимого уровня живучести связи на участках с нестабильным радиопокрытием, что подтверждает актуальность настоящей работы.

Предложен комплексный алгоритм динамической коммутации между технологиями LTE, 5G, Wi-Fi и DMR, включающий три ключевых элемента:

прогнозирование состояния каналов с использованием LSTM-сети на основе данных о скорости движения и географических координатах;

дифференцированный выбор целевого интерфейса в зависимости от категории трафика (критический или пассажирский);

процедуру бесшовного переключения по схеме Make-Before-Break с поддержкой многоканального резервирования.

В ходе имитационного моделирования зафиксированы следующие улучшения относительно базового сценария: доля успешных переключений возросла на 5,2 процентных пункта, достигнув 94,5%; длительность перерыва в передаче данных сократилась вдвое; объем потерянных пакетов уменьшился на 75%.

Разработанный механизм может быть адаптирован для применения в рамках архитектуры FRMCS, в том числе на высокоскоростных линиях, участках со сложным рельефом и крупных сортировочных узлах, где требования к надежности связи особенно высоки.

В качестве приоритетных направлений дальнейших научно-исследовательских работ выделяются: расширение функционала алгоритма на спутниковые каналы (Starlink, Iridium), внедрение методов когнитивного радио, а также создание системы защиты от умышленных помех и киберугроз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ai, B. 5G for Railways: Next Generation Railway Dedicated Communications / B. Ai, K. Guan, R. He [et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2022. – Vol. 60, no. 11. – P. 78–84. Ссылка: https://www.researchgate.net/publication/361832676_5G_for_Railways_the_Next_Generation_Railway_Dedicated_Communications
2. Горелов, Г. В. Обеспечение отказоустойчивости каналов передачи данных в цифровых сетях технологической радиосвязи / Г. В. Горелов, В. А. Кудряшов, Е. В. Фомин // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 8. – С. 14–18. Ссылка: <https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-nadezhnosti-peredachi-dannyh-v-tsifrovyyh-kanalah-radiosvyazi-na-osnove-nedvoichnogo-kodirovaniya-s-paketirovaniem-oshibok>
3. FRMCS: Future Railway Mobile Communication System [Электронный ресурс]. – UIC / 3GPP Specification. Ссылка: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs>
4. 5G-R optimization framework for high-speed trains: handover performance with LSTM-based prediction // Journal of Science and Technology. – 2024. – Vol. 15, No. 3. – P. 45–58. Ссылка: <https://hal.science/hal-04356866v1/document>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ЖАТ

Е. М. Тарасов

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. Совершенствование качества функционирования и контроль (определение) фактического технического состояния объектов диагностики, в частности напольных устройств ЖАТ, являются важной проблемой, от оптимального решения которой зависит эффективность их использования. Требуемый уровень качества функционирования и надёжности контроля сложнофункциональных технических систем может быть обеспечен методами технического диагностирования в комплексе интеллектуальных киберфизических систем. Известно, что резервом повышения надёжности является переход от планово-предупредительного ремонта и обслуживания к стратегии ремонта по фактическому состоянию, а для этого необходимо прямое применение средств и методов технического диагностирования и мониторинга [1]. Техническое диагностирование напольных устройств ЖАТ при такой постановке задачи удобнее всего решить методами и принципами распознавания образов как компонентами 3-го уровня киберфизической системы – CPS (Cyber – Physical Systems).

В настоящее время при совершенствовании составных частей CPS и их взаимодействии все чаще используются методы искусственного интеллекта с алгоритмами машинного обучения [2, 3].

Исследование и анализ свойств информационно-измерительных технологических систем, взаимодействие их функций и цифровых составляющих – актуальное направление современной науки [5]. Именно с осмыслением принципов CPS и возникновением действий аналогичных вызван переход к индустрии 4.0 (I4.0) – прогнозируемое событие, связанное с массовым внедрением CPS в производство и транспорт.

Материалы и методы. Концепция киберфизических систем – это глубокий охват понимания различных физических сущностей различного вида и сложности, искусственных интеллектуальных подсистем, управляющих и вычислительных процессов, представляющие компоненты как единое целое [4].

В CPS вычислительная компонента распределена в комплексе в соответствии с выполняемыми функциями: управление, диагностика, контроль и т. д., Следовательно, CPS это системы, объединяющие различные объекты (физических, искусственных подсистем) и датчиков, процессоров и контроллеров управления, представляющее как единый комплекс.

Прототипами CPS являются встроенные информационно-управляющие системы, АСУ технологическими процессами, а также распределенные вычислительные системы. Поэтому концепция построения CPS считается развитием технической кибернетики, с одной стороны, а с другой – интеллектуальных систем [6].

Концепция CPS основана на интеграции физических процессов и вычислительных ресурсов для достижения эмерджентности, т. е. появления новых свойств и возможностей CPS. Это объединение позволяет получить синергетический эффект за счет новых систем связей, включающих цифровые двойники, подсистемы принятия решений, самонастройки системы для достижения точности управления, глубины диагностирования объектов.

Концепция построения CPS включает обязательную компоненту – мониторинговые средства для непрерывного контроля и корректирования поведения объекта исследования, в части выявления предотказного состояния и своевременного технического обслуживания «по состоянию». Это приводит к тому, что процессы функционирования систем становятся интеллектуальными и автономными.

Отличительными особенностями CPS являются:

- фокусировка на интеллектуальные сервисы. Сервисы CPS являются на базе сервисно интеллектуально ориентированной архитектуры;
- интеллектуальная самоорганизация. CPS позволяет принимать решения автономно с использованием подсистемы СППР;
- интеграция человеческих и CPS ресурсов для решения конкретных проблем взаимодействия «дружественным» интерфейсом;
- этапная визуализация технологического процесса от датчиков до СППР;
- формирование библиотеки решений на основе технологической и интеллектуальной датчиковой информации;
- гибкая адаптации к изменяющейся производственной ситуации или информационной базы за счет априорного алфавита информации первичных датчиков;
- функционирование в реальном времени. Алгоритмы принятия решений, процессы обучения цифровых моделей, осуществляются в реальном времени с глубокой синхронизацией процессов;
- интеграция данных с базы знаний и реальных процессов по жизненному циклу;
- долгосрочное хранение информации о производственном процессе.

На рисунке 1 представлена архитектура киберфизической системы в соответствии с ГОСТ Р71576-2024 «Системы киберфизические. Общие положения», [9] названная 5C (connection, conversion, cyber, cognition, configuration).



Рис. 1. Архитектура CPS

Рассмотрим уровни взаимодействия CPS:

Коммуникационный уровень (интеллектуальный уровень связи с внешними объектами, например, напольными устройствами ЖАТ):

- «Plug&Play» – включи и работай (интеллектуальное соединение);
- свободная коммуникация;
- сеть первичных преобразователей.

Уровень интеллектуальной аналитики, преобразования измеренных первичных признаков, формирование образов состояний:

- состояние компонент устройства;
- селекция и ранжирование признаков;
- первичный прогноз и аналитика мониторинга.

Киберуровень цифровых двойников (интеллектуальный уровень):

- создание множества цифровых двойников объектов ЖАТ;
- «обучение» цифровых двойников на методологии «Time – Machine» – стандартного копирования функций сущности на виртуальном уровне;
- классификация состояний объектов управления или диагностики;
- подготовка результатов, для самоанализа.

Самоанализ на основе критериев качества функционирования (уровень самопознания в соответствии с ГОСТ):

- самоанализ состояний объектов управления и диагностики;
- формирование контекста потенциально проблемной информации;
- формирование приоритетов принятия решений СППР.

Уровень самоконфигурации:

- выработка управленческих решений на основе информации самоанализа;
- «движение» от киберпространства (цифровых двойников) к физическим объектам;
- самонастройка управленческих решений – при технической диагностике разработка новых диагностических функций и самоанализ состояний до достижения требований критериев качеств диагностики.

Искусственный интеллект в CPS. Искусственный интеллект в CPS позволяет информационно-управляющим процессам сомаобучаться, формировать решающие правила, свойственные человеческим действиям. Следовательно, машинное обучение, относящийся к 3-му киберуровню CPS относится к подмножеству искусственного интеллекта, включающее обучающую, тестовую и контрольную выборку образов состояний, позволяющее кибернетическим системам выполнить задачу (принимать решение) на основе обучения [7, 8]. Обучение в CPS может быть осуществлено с «учителем» или самообучиться на основе статистических данных. Одной из подсистем машинного обучения является – глубокое обучение, которое состоит из алгоритмов, позволяющих процессорам обучаться для выполнения сложных, многомерных задач.

Вместе с развитием области ИИ развиваются и киберфизические системы, поскольку качество работы таких систем определяется во многом качеством обработки данных присутствующих в системе. На рисунке 2 представлено схематическое взаимодействие уровней ИИ.



Рис. 2. ИИ и его взаимодействие с подобластями

Развитие CPS и искусственного интеллекта происходит одновременно, т. к. они, дополняя друг друга, формируют комплексную интеллектуальную киберфизическую систему, позволяющую повысить качество и скорость обмена и обработки данных, присутствующих в системе, упростить алгоритм принятия решений СППР, оперативно реагировать на изменение состояния объекта диагностики и своевременно формировать управленческое решение.

Заключение. Интеллектуальные киберфизические системы – современная прогрессивная система выработки информационно-управленческих решений. Дополнение СТДМ системами принятия решений на основе данных машинного обучения и искусственного интеллекта позволит автоматизировать многие процессы контроля и управления на железнодорожном транспорте, особенно в подсистемах СТДМ устройств ЖАТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефанов, Д. В. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ И МОНИТОРИНГ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ / Д. В. Ефанов. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
2. Тарасов Е. М. К вопросу автоматизации технической диагностики и мониторинга / Е. М. Тарасов, А. Е. Тарасова, В. А. Надежкин // Наука и образование транспорту. 2022. № 1. С. 362–364.
3. Надежкин, В. А. Анализ возможности внедрения предиктивной аналитики отказов устройств жат в системы мониторинга и технической диагностики / В. А. Надежкин, А. С. Хохрин // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022) : труды Международной научно-технической конференции, Самара, 18–21 апреля 2022 года / под редакцией С. А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2022. – С. 346–350. – EDN MCWGAZ.
4. Тарасова А. Е., Васин Н. Н. Формирование обобщенных решающих функций при распознавании и классификации состояний ЖАТ // Наука и образование транспорту. 2022. № 1. С. 360–362.
5. R. G. Sanfelice. Analysis and Design of Cyber-Physical Systems. A Hybrid Control Systems Approach // Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice / D. Rawat, J. Rodrigues, I. Stojmenovic. CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4822-6333-6.
6. Cheng Albert M. K. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models / EECS Department, University of California, Berkeley, CA 94720-1770, USA, 2015. 15 p.
7. Тарасов, Е. М. Разработка методики обучения решающих функций в системах железнодорожной автоматики и телемеханики / Е. М. Тарасов, В. А. Астров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск: Проблемы железнодорожного транспорта на современном этапе развития. – 2006. – № 2006. – С. 74–77. – EDN WGPSBR.

8. Тарасов, Е. М. Принципы разделения пространства образов на классы решающими функциями / Е. М. Тарасов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск: Проблемы транспорта. – 2003. – Т. 2003. – С. 78–83. – EDN WGSGMZ.
9. Тарасов, Е. М. Принципы разделения пространства образов на классы решающими функциями / Е. М. Тарасов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск: Проблемы транспорта. – 2003. – Т. 2003. – С. 78–83. – EDN WGSGMZ.
10. ГОСТ Р71576-2024 «Системы киберфизические. Общие положения». – Текст : электронный // docs.cntd.ru : [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1307163295>

УДК 656.259.12

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ К ИЗМЕНЕНИЮ ПРОВОДИМОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Е. М. Тарасов, К. А. Бочков, Н. С. Степнова

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. В настоящее время, с увеличением скоростей поездов и их веса, предъявляются все более высокие требования к безотказному функционированию систем интервального регулирования движения поездов (ИРДП), так как каждая остановка и трогание поездов приводит к лишним экономическим потерям в перевозочном процессе [1].

Обеспечение нормального функционирования рельсовых цепей, являющихся основным элементом и первичным датчиком ИРДП, осуществляется с помощью специального обслуживания на основе технологических карт, подразумевающих выполнение регламентных работ по измерению напряжений на входе рельсовых линий (путевых генераторов) и приведение результатов измерений к нормативным значениям регулировкой [3]. В то же время современные требования к построению цифровых железных дорог требуют исключения человеческого фактора в технологическом процессе функционирования ИРДП.

Решить это противоречие возможно разработкой адаптивных рельсовых цепей, контролирующих уровень напряжения на входе рельсовой линии и поддерживающих напряжение на требуемом уровне [2]. При этом в качестве датчика, реагирующего на изменение напряжения, может использоваться входное сопротивление рельсовой линии, зависящее от изменения первичных параметров РЛ.

Материалы и методы. Автоматическое регулирование напряжения на входе РЦ позволяет расширить диапазон работоспособности рельсовых цепей в области высоких проводимостей (низких сопротивлений) изоляции, при этом наиболее перспективным датчиком сопротивления изоляции является сама РЦ. В качестве основного параметра, который непосредственно связан с сопротивлением изоляции, является входное сопротивление РЦ [4].

Однако датчик, реагирующий на входное сопротивление, не будет различать сигнал, полученный в результате уменьшения сопротивления изоляции от сигнала, полученного в результате наложения шунта, а поэтому при вступлении колесной пары на блок-участок напряжение на входе РЦ будет увеличиваться, а нужно наоборот.

Для использования такого принципа регулирования нужен специальный источник питания, построенный с использованием нелинейных элементов, учитывающему, что по мере

изменения координаты наложения шунта должно изменяться и допустимое напряжение на входе РЦ.

Источник с такой характеристикой технически реализовать довольно трудно, так как одно и то же напряжение (U_1) соответствует двум входным сопротивлениям (Z_1 и Z_3). Задача упрощается, если характеристику сделать такой, когда с приближением поезда к середине рельсовой линии (источник отдает максимальный ток), напряжение скачком снижается до безопасного уровня U_2 или до нуля (срыв). Напряжение $U_{\max}$ соответствует минимальному сопротивлению изоляции в НР, при котором обеспечивается работоспособность РЦ. Следовательно, входное сопротивление РЦ при наложении шунта в середине и максимальном сопротивлении изоляции и входное сопротивление при свободной РЦ и минимальном сопротивлении изоляции должны быть равны. Из этого условия определено предельное значение сопротивления изоляции, при котором обеспечивается работоспособность РЦ.

Таким образом, если выполнить источник питания РЦ с предложенной характеристикой, то появляется возможность расширить область существования РЦ со смещением границы в область меньших сопротивлений изоляции.

Учитывая, что технически трудно создать источник питания, характеристика которого сложна образом зависит от входного сопротивления, разработано ряд РЦ, в которых в ШР напряжение источника питания скачком снижается до величины близкой к нулю, при этом снижение напряжения происходит в зависимости от величины входного тока [5] с вводом в схему источника питания входного сопротивления, а непосредственно сопротивления изоляции.

Такими свойствами являются:

- срыв (скачкообразное изменение) напряжения при достижении определенной величины нагрузки и восстановление генерирования при уменьшении нагрузки;
- независимость напряжения на выходе преобразователя от нагрузки, то есть релейный характер внешней характеристики;
- возможность изменения порога срыва напряжения, что позволяет отказаться от ручных регулировок в широком диапазоне изменения сопротивления изоляции;
- в режиме срыва генерации магнито-транзисторных преобразователей (МТП) практически не потребляет электрическую энергию [5];
- из схемы РЦ исключен ограничивающий резистор, что исключает значительные потери энергии, особенно при низких сопротивлениях изоляции.

На рисунке 1 приведена функциональная схема РЦ с использованием МТП и вводом информации о величине сопротивления изоляции.

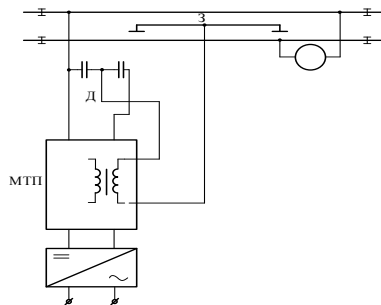


Рис. 1. Функциональная схема РЦ с использованием МТП

В качестве информации о величине сопротивления изоляции используется участок от средней точки емкостного делителя напряжения Д до заземлителя, расположенного посередине

между рельсами. Вследствие того, что рельсовые нити эквипотенциальны благодаря симметричности плеч емкостного делителя Д, это сопротивление, в отличие от входного сопротивления РЦ, пропорционально только сопротивлению изоляции. Такие РЦ могут быть как постоянного, так и переменного тока. Недостатком этих РЦ является наличие заземлителя.

Одним из путей повышения работоспособности по предложенному принципу является использование свойств срыва генерации магнитного делителя частоты (МДЧ) в режиме перегрузки. Авторами рассмотрена методика синтеза РЦ и вопросы повышения их работоспособности. Приведена внешняя характеристика МДЧ типа ПЧ 50/12,5–75, которая отражает зависимость $K_{СНП}$ от K_H , где $K_{СНП}$ – коэффициент снижения выходного напряжения МДЧ, K_H – коэффициент нагрузки, равный отношению мощности, потребляемой РЦ при неизменном выходном напряжении МДЧ, к номинальной мощности делителя при минимально допустимом напряжении питающей сети (198 В) и максимальном расчетном (242 В).

Выводы. Выполненные расчеты на ЭВМ с использованием математического пакета Python показали, что на частотах сигнального тока 12,5 Гц, 25 Гц, 50 Гц, 75 Гц, 125 Гц и 475 Гц с использованием МДЧ со срывом генерации, работоспособность от 40 до 75% больше по сравнению с источниками без срыва генерации на различных частотах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербина А. Е. Способ повышения устойчивости функционирования рельсовых цепей тональной частоты/ дисс. к.т.н. 05.22.08. М.: 2011–165 с.
2. Патент на изобретение RU 2173276 С2 СПОСОБ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ Тарасов Е. М., Белоногов А. С., 10.09.2001. от 31.05.1999.
3. ИНВАРИАНТНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЙ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ Тарасов Е. М. Самара, СамИИТ, 2002, 140 с.
4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНВАРИАНТНОСТИ К ВОЗМУЩАЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ В РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЯХ Тарасов Е. М., Железнов Д. В., Васин Н. Н., Тарасова А. Е. Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 2. С. 152–168.
5. Кравцов Ю. А., Разгонов А. П., Лучинин В. С. Исследование работоспособности РЦ при питании от магнитных делителей частоты // Вестник ВНИИЖТа. – 1983. – № 6. – С. 50–53.

УДК 656.259.12

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНВАРИАНТНОСТИ К СОПРОТИВЛЕНИЮ ИЗОЛЯЦИИ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ДВУХЧАСТОТНЫМ ПИТАНИЕМ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

А. Е. Тарасова, Н. С. Степнова

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. Электрические рельсовые цепи, являясь первичным датчиком информации о состоянии рельсовых линий, подвержены значительным возмущающим воздействиям в виде изменения первичных параметров рельсовых линий и внешним изменяющимся воздействиям. Поэтому возникает вопрос о создании высоконадежного первичного датчика, обеспечивающего достоверной информацией системы управления движением поездов, нечувствительных к внешним и внутренним воздействиям.

Эта проблема компенсации влияния возмущений и проблема инвариантности к возмущениям. Для успешного решения проблемы инвариантности необходимо разработать структуру рельсовой цепи, инвариантной к возмущениям, с использованием принципа многоканальности с частотным формированием компенсационного канала [1].

Необходимым признаком реализуемости квазиинвариантной системы компенсации возмущений является принцип многоканальности, сформулированный отечественными учёными Петровым Б. Н., Щипановым Г. В. и др.: «необходимым (но недостаточным) признаком существования инвариантной системы является наличие в схеме по меньшей мере 2^x каналов передачи возмущающего воздействия между точкой приложения возмущающего воздействия и выходным сигналом системы, для которого достигается инвариантность [2, 3]).

При реализации инвариантности в рельсовых цепях необходимо выполнить противоречивые требования по обеспечению надежной фиксации внешних информационных воздействий (вступление поезда на рельсовую линию, излом рельсов) и полной компенсации возмущений, приводящих к множественным контролируемым параметрам.

Материалы и методы. Одновременная подача на рельсовую линию сигналов различных частот широко используется в железнодорожной автоматике и телемеханике. Как правило, эти сигналы несут различные функции. Например, РЦ наложения, сигналы АБ и АЛСН на различных частотах и другие [4].

Анализ возможности использования обеих частот в системе автоблокировки представляет определенный интерес, так как информативность двухчастотного сигнала выше, и появляются новые возможности определения режима работы РЦ, в первую очередь разделения ШР и НР при понижении сопротивления изоляции R_u .

На рис. 1 приведена функциональная схема РЦ с комбинацией источника питания и путевых приемников на питающем и релейном концах, охватывающая множество возможностей, предоставляемых наличием двухчастотных сигналов. В частных случаях часть блоков может быть исключена.

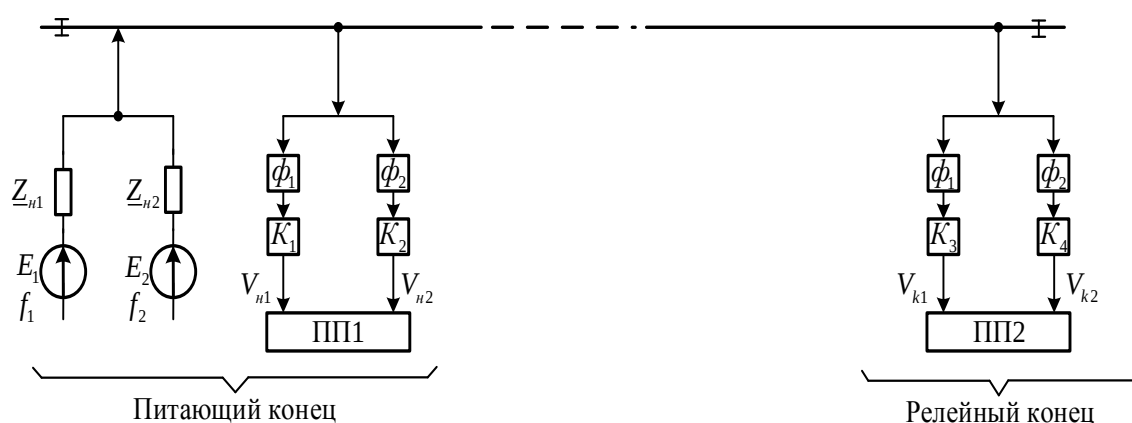


Рис. 1. Функциональная схема РЦ двухчастотного питания

Схема реальной цепи двухчастотного питания предусматривает наличие источника, подающего в рельсовую линию сигналы на частотах f_1 и f_2 от ЭДС, E_1 и E_2 через сопротивления Z_{H1} и Z_{H2} , ограничивающие входной ток рельсовой линии. Источники E_1 и E_2 должны быть снабжены элементами, защищающими их от протекания токов другой частоты.

На обоих концах разъемной линии могут быть установлены фильтры обеих частот и аппаратура выделения сигнала каждой частоты. На рис. 2.1. это фильтры Φ_1 (на частоте f_1) и Φ_2 (f_2) и аппаратура с коэффициентами передачи K_1 , K_2 , K_3 и K_4 .

Основная идея, заложенная при разработке РЦ двухчастотного питания, – облегчение условий нормального режима при понижении сопротивления изоляции за счет отсутствия ограничивающего сопротивления Z_H на одной из частот. Поскольку в ограничивающем сопротивлении на питающем конце в типовых РЦ теряется при низком R_u до половины сигнала, то снижение Z_H до величины сопротивления низковольтных обмоток трансформаторов, и соединительных приводов (менее 0,1 Ом в сухом) приведет к существенному расширению диапазона работоспособности РЦ по условиям изменения R_u на заданной длине рельсовой линии, или увеличению длины рельсовой линии при заданном $R_{u\min}$.

Но отсутствие ограничивающего сопротивления на питающем конце не обеспечивает требуемого снижения сигнала этой части при наложении шунта вблизи питающего конца на приемном конце. Поэтому ШР при наложении шунта на расстоянии $20 \div 30$ % длины линии от питающего конца должен определяться дополнительными средствами на питающем конце.

Основная цель, преследуемая разработкой РЦ двухчастотного питания, – обеспечить максимальное расстояние между источником и приемником при заданном $R_{u\min}$, или минимально возможное сопротивление при заданной длине разъемной линии (минимум – 2,6 км).

Наличие сигналов обеих частот на обоих концах рельсовой линии (рис. 1) позволяет проанализировать различные варианты их сочетаний, то есть определить эффективность разной степени усложнения схем питающего и приемного концов.

Ниже приводится подробный анализ импульсной или входной РЦ по частотам 50 и 25 Гц, реализовать которые наиболее просто.

Варианты использования двухчастотных сигналов. На схеме рис. 1. примем источник E_1 на частоте f_1 , без ограничивающего сопротивления $Z_{H1} \approx 0,1$ Ома, то есть учитываются только сопротивления соединительных проводов, обмоток трансформаторов, сопротивление резонансного контура, который необходим для свободного пропускания тока частоты f_1 и задерживания тока частоты f_2 . Все сопротивления приведем к рельсовой линии (через квадраты коэффициентов трансформации). Величина 0,1 Ома реальна, что подтверждено соответствующими экспериментами. Поскольку при такой низкой величине Z_{H1} комплексный характер сопротивления Z_{H1} значения не имеет, то для дальнейшего анализа примем $Z_{H1} = R_{H1} = 0,1$.

Источник E_2 на частоте f_2 имеет большее ограничивающее сопротивление $Z_{H2} > R_{H1}$. Резонансный контур для задерживания тока частоты f_1 в цепи источника E_2 не обязателен. Такую роль может выполнять Z_{H2} индуктивного характера, если $f_1 > f_2$, или емкостного характера, если $f_1 < f_2$.

Коэффициентами передачи аппаратуры K_1 , K_2 , K_3 и K_4 можно подобрать требуемые уровни напряжений U_{H1} , U_{H2} , U_{K1} и U_{K2} . Здесь первый индекс относится к определению

контура реальной линии (H – питающий конец, K – приемный), второй индекс соответствует индексу частоты.

С учетом этого, на каждом конце путевые приемники можно построить как с использованием уровня сигналов, так и их соотношения (или разности), т. е. 4 варианта путевых приемников РЦ (ПП1 на питающем конце, ПП2 – на приемном): первый – оба приемника срабатывают от напряжения одной частоты, ПП1 от U_{H2} (на частоте f_2), ПП2 от U_{K1} (на частоте f_1); второй и третий – один приемник срабатывает как в первом варианте, а второй срабатывает от разности напряжений обеих частот, причем определенной полярности;

Расчет напряжений питающего и релейного концов согласно принципу суперпозиции можно вести раздельно для каждой частоты. Математическая модель [20] на каждой частоте базируется на наихудших условиях расчета ШР т. е. при $R_u = \infty$, НР – путем представления рельсовой линии в виде четырехполюсника при R_u от ∞ до $R_{u\min}$ (задано программой исследования для $l = 2,6$ км, $R_{u\min} = 0,4$ Ом·км). Отличие от известных методик анализа заключается в совмещении величин питающего и релейного концов на одном графике и определение по нему напряжений срабатывания путевых приемников.

Обсуждение результатов. Исследование компенсации возмущений двухчастотным питанием рельсовых цепей с использованием в качестве основного канала физическую рельсовую цепь частотой 25 Гц, а компенсационный с частотой 50 Гц проведенные с помощью математического пакета Python показали следующие результаты:

При длине рельсовой линии 2,5 км:

$$K_d \leq 1,25 \text{ (или 25\%)} \quad \forall 3,3 \geq g \geq 0,02 \text{ см / км},$$

а) $K_p = 1,93 | g = 3,3 \text{ см / км}.$

б) $g_{\max} = 5,5 \text{ см / км} | K_p = 1,2, \text{ при этом } K_d \leq 1,9.$

При длине рельсовой линии 2,0 км:

$$K_d \leq 1,10 \text{ (или 10\%)} \quad \forall 3,3 \geq g \geq 0,02 \text{ см / км},$$

а) $K_p = 1,33 | g = 3,3 \text{ см / км}.$

б) $g_{\max} = 1,65 \text{ см / км} | K_p = 1,2, \text{ при этом } K_d \leq 1,25.$

При длине рельсовой линии 1,5 км:

$$K_d \leq 1,07 \text{ (или 7\%)} \quad \forall 5,0 \geq g \geq 0,02 \text{ см / км},$$

а) $K_p = 1,78 | g = 5 \text{ см / км}.$

б) $g_{\max} = 10 \text{ см / км} | K_p = 1,2, \text{ при этом } K_d \leq 1,53.$

При длине рельсовой линии 1,0 км:

$$K_d \leq 1,09 \text{ (или 9\%)} \quad \forall 10,0 \geq g \geq 0,02 \text{ см / км},$$

а) $K_p = 1,2 | g = 10 \text{ см / км}.$

б) $g_{\max} = 10 \text{ см / км} | K_p = 1,2, \text{ при этом } K_d \leq 1,09.$

Заключение. Проведенные исследования компенсации распределенных возмущений показали, что предложенный двухчастотный принцип компенсации возмущений позволяет: добиться относительной инвариантности внутренним возмущениям; расширить диапазон

правильного функционирования рельсовых линий в условиях воздействия возмущений; уменьшить динамический диапазон изменения выходного сигнала K_d и повысить качество распознавания состояний рельсовых линий K_p .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов, Е. М. Принцип инвариантности в системах контроля состояний рельсовых линий / Е. М. Тарасов, Д. В. Железнов, А. С. Белоногов. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. – 213 с. – ISBN 978-5-89035-917-9. – EDN WGDVVB.
2. Петров, Б. Н. К вопросу о построении инвариантных информационных и измерительных устройств / Б. Н. Петров, В. А. Викторов, В. И. Мишенин. // Докл. АН СССР. – 1967. – № 177:1. – С. 52–55.
3. Сазонов, В. В. Принцип инвариантности в преобразовательной технике / В. В. Сазонов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 166 с.
4. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, С. В. Казеев, Ю. В. Ободовский. – М. : ООО «Миссия-М», 2006. – 496 с. – Текст : непосредственный.

УДК 004.8

ИОТ-ПЛАТФОРМА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ЖД-ИНФРАСТРУКТУРЫ: АРХИТЕКТУРА И УПРАВЛЕНИЕ ДАННЫМИ

С. А. Федосов

Самарский государственный технический университет

Введение. IoT-платформа для мониторинга объектов ЖД-инфраструктуры: архитектура и управление данными.

Введение. Сеть железных дорог России превышает 85 600 км путей и включает более 500 000 объектов инфраструктуры. Незапланированные отказы оборудования приводят к затратам на их техническое обслуживание и ремонт. Переход от планово-предупредительного к предиктивному обслуживанию требует непрерывного сбора, передачи и анализа данных с объектов инфраструктуры в режиме реального времени. Решением является построение масштабируемой IoT-платформы, объединяющей полевые датчики, edge-вычисления и облачное хранилище временных рядов.

Архитектура платформы. Платформа построена по трёхуровневой модели, представленной на рисунке 1.

Ключевым элементом архитектуры является edge-шлюз, выполняющий локальную фильтрацию, агрегацию и первичный ML-анализ (например, обнаружение аномальных вибраций буксовых узлов при пороге > 15 g на скорости > 80 км/ч).

Обеспечение кибербезопасности строится на требованиях IEC 62443-3-3 (промышленные сети): сегментация OT/IT сетей, шифрование TLS 1.3 на транспортном уровне, аутентификация устройств по X.509. Значение предложенной IoT-платформы для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры определяется её способностью кардинально изменить подход к техническому обслуживанию и управлению надёжностью объектов транспортной сети.

Нормативные сроки замены и осмотра оборудования не учитывают фактическое техническое состояние конкретного объекта, что приводит либо к преждевременным заменам исправных узлов, либо, напротив, к эксплуатации уже деградировавшего оборудования сверх

допустимого ресурса. Именно здесь платформа на базе MQTT, Apache Kafka и TimescaleDB с edge-обработкой обеспечивает переход к предиктивному обслуживанию, при котором решение о ремонте или замене принимается не по календарному плану, а по фактическому состоянию оборудования, непрерывно отражаемому в потоке телеметрических данных.

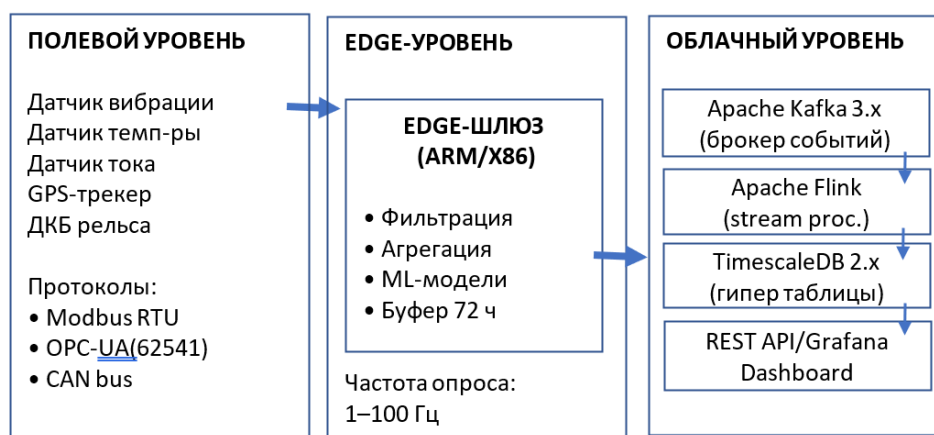


Рис. 1. Трёхуровневая архитектура IoT-платформы мониторинга ЖД

Немаловажным практическим аспектом является интеграционный потенциал платформы. Архитектура, основанная на открытых протоколах и стандартных API, позволяет встраивать её в существующий цифровой ландшафт ОАО «РЖД» без замены действующих систем. Данные, собираемые платформой, могут автоматически поступать в АСУТП, систему АСКОПВ, единую корпоративную систему управления инфраструктурой ЕК АСУИ и систему управления техническим обслуживанием СМЕТ, обогащая их актуальной телеметрией и обеспечивая автоматическое формирование дефектных ведомостей и заявок на ремонт. Это устраняет ручной ввод данных как источник ошибок и задержек, переводя документооборот в полностью автоматический режим.

Отдельного внимания заслуживает практическая значимость платформы в контексте технологического суверенитета. Весь программный стек – брокер MQTT на базе EMQX, Apache Kafka, TimescaleDB, построенная на PostgreSQL, и система визуализации Grafana – реализован на открытом программном обеспечении без лицензионных отчислений зарубежным вендорам. Компоненты стека совместимы с отечественными операционными системами Astra Linux и РЕД ОС, а СУБД PostgreSQL включена в реестр отечественного программного обеспечения Министерства цифрового развития Российской Федерации. Это означает, что платформа не только решает оперативные задачи мониторинга, но и формирует устойчивую, импортонезависимую технологическую основу для цифровой трансформации железнодорожной инфраструктуры страны в долгосрочной перспективе.

Закключение. Предложенная архитектура IoT-платформы на базе MQTT → Kafka → TimescaleDB с edge-обработкой позволяет обеспечивать сквозной мониторинг объектов ЖД-инфраструктуры с задержкой обработки критических событий менее 30 мс и снижением нагрузки на каналы связи до 85%. Применение гипертаблиц TimescaleDB и нативного сжатия позволяет сократить объём хранимых данных на 90–95% без потери аналитической ценности. Масштабируемость решения подтверждается горизонтальным масштабированием Kafka-кластера и независимостью edge-узлов. Направлениями дальнейших исследований являются интеграция с системами ETCS/ERTMS, развёртывание федеративного обучения на edge-шлюзах и сертификация компонентов по EN 50128 (SIL 2+).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ методов эмерджентного искусственного интеллекта / К. В. Портнов, Б. Э. Забержинский, Р. Р. Габбасов, К. А. Агафонов // Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов : сборник материалов XX Международной научно-практической конференции, Москва, 17 мая 2023 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Печатный цех, 2023. – С. 30–36. – EDN GVVLER.
2. Евсеева, А. К. Облачные технологии и вопросы безопасности / А. К. Евсеева, А. А. Пожарнова, К. В. Портнов // Тренды развития современного общества: управленческие, правовые, экономические и социальные аспекты : Сборник научных статей 11-й Всероссийской научно-практической конференции, Курск, 23–24 сентября 2021 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 71–73. – EDN QRFKQI.
3. Каримов, Б. Ф. Проблемы адаптации генетических алгоритмов к решению задач структурно-параметрической оптимизации / Б. Ф. Каримов, К. В. Портнов // Современные исследования: теория, практика, результаты : Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Москва, 29 декабря 2023 года. – Москва: Центр развития образования и науки, ООО "Издательство АЛЕФ", 2023. – С. 443–448. – DOI 10.26118/1590.2023.63.10.010. – EDN PUGPKI.
4. Портнов, К. В. Актуализация использования интеллектуальных методов поиска оптимальных маршрутов в логистике / К. В. Портнов, А. А. Ларкина, А. А. Шестаков // Вестник Института дружбы народов Кавказа (Теория экономики и управления народным хозяйством). Экономические науки. – 2024. – № 4(72). – С. 178–186. – EDN SPRJMU.
5. Смагина, З. А. Технология интернет вещей и её влияние на современную экономику / З. А. Смагина, К. В. Портнов // Теоретические и прикладные вопросы экономики, управления и образования : Сборник статей II Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Пенза, 15–16 июня 2021 года. Том II. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 182–186. – EDN AJTHBC.
6. Тимофеев, А. В. Верификация решений агентов с искусственным интеллектом в децентрализованных системах / А. В. Тимофеев, Р. А. Олин, В. В. Бондаренко // Экономика и предпринимательство. – 2026. – № 6(191). – С. 930–936. – EDN BBQRTI.
7. Якимов, В. Н. Использование Wi-Fi 7 на железнодорожном транспорте / В. Н. Якимов, И. Г. Максимов, О. А. Танаев // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте : МАТЕРИАЛЫ VII ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Самара, 04 апреля 2025 года. – Самара: Приволжский государственный университет путей сообщения, 2025. – С. 31–35. – EDN TGQUJO.
8. Якимов, В. Н. Цифровой анализ спектрального состава на основе вычисления оценки периодограммы равномерно дискретизированного сигнала с применением бинарно-знакового аналого-стохастического квантования / В. Н. Якимов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 5. – С. 8–16. – EDN JFRVPN.

УДК 621.391.82

АНАЛИЗ ДОПУСТИМЫХ УРОВНЕЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ ПОМЕХ В КАНАЛЕ АЛС-ЕН ПРИ ИХ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРИЁМНИК СО СХЕМОЙ ШОУ

Р. Р. Юсупов¹, А. Азизов², А. С. Хохрин¹

¹ Приволжский государственный университет путей сообщения

² Ташкентский государственный транспортный университет

Введение. Система автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа единого ряда АЛС-ЕН, применяемая на скоростных участках железных дорог России, использует кодовые сигналы, передаваемые на локомотив по индуктивно-рельсовой линии связи на частоте несущего колебания 174,38 Гц. Формирование сигналов осуществляется посредством двукратной фазоразностной модуляции несущего колебания (ФРМ-2) [1]. ФРМ-

2 позволяет организовать в канале АЛС-ЕН два независимых фазовых подканала, в каждом из которых передаются восьмиразрядные комбинации самосинхронизирующегося кода Бауэра с кодовым расстоянием $d = 4$, что даёт 256 разрешённых кодовых комбинаций [2]. Использование частотного диапазона с более низким (в сравнении с частотными диапазонами канала АЛСН) уровнем помех позволило уменьшить номинальное напряжение сигнала АЛС-ЕН на входе блока электроники БЭЛ2М2 от приёмных катушек (ПК) с 100–300 мВ (в зависимости от рода тяги и частоты несущего колебания) до 80 мВ среднеквадратического значения.

С внедрением в эксплуатацию подвижного состава с асинхронным тяговым приводом и тиристорным регулированием расширяется спектральный состав и интенсивность помех в каналах АЛС [3]. Эти помехи могут приводить к нарушениям нормальной работы локомотивных приёмников каналов АЛС и, как следствие, к сбоям в работе системы АЛС-ЕН. Ранее авторами для снижения влияния помех на функционирование системы АЛС-ЕН было предложено использовать в структуре локомотивного приёмника канала АЛС-ЕН схему ШОУ (широкая полоса – ограничитель – узкая полоса), позволяющую комплексно бороться с флуктуационными и импульсными помехами. Особенность функционирования схемы ШОУ такова, что наличие гармонической помехи в полосе пропускания широкополосного фильтра (либо помехи высокой интенсивности вне полосы пропускания) может привести к подавлению полезного сигнала в результате его амплитудного ограничения. В связи с этим представляет практический интерес исследование влияния гармонических помех на устойчивость функционирования приёмника сигналов АЛС-ЕН со схемой ШОУ. Целью настоящей работы являются:

анализ действующих норм электромагнитной совместимости тягового электроподвижного состава и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) и определение на их основе допустимых уровней (значений напряжения на входе локомотивного приёмника) гармонической помехи в различных частотных диапазонах;

планирование экспериментального исследования для оценки влияния гармонической помехи с допустимыми уровнями на устойчивость функционирования приёмника сигналов АЛС-ЕН со схемой ШОУ.

Основная часть

Для обеспечения надёжной работы систем ЖАТ при наличии мешающих электромагнитных воздействий со стороны железнодорожного подвижного состава установлены нормы мешающих влияний [4]. В таблице 1 приведены сводные данные из данного стандарта, отображающие максимальные допустимые значения величины гармонических помех длительностью более 0,3 с от тягового тока в различных частотных диапазонах.

Как видно из данных таблицы 1, наибольший уровень гармонических помех допускается в диапазонах частот 19–21 и 29–31 Гц. В диапазоне частот сигнала АЛС-ЕН (167–184 Гц) допустимый уровень гармонических помех минимален и по величине в 2,5–10,25 раза меньше, чем в диапазонах частот сигнала АЛСН. В связи с этим, без экспериментального исследования нельзя исключить вероятность того, что гармоническая помеха, имеющая допустимый уровень в диапазоне частот канала АЛСН, будет оказывать негативное влияние на работу приёмника канала АЛС-ЕН со схемой ШОУ.

Допустимые значения величины гармонических составляющих тока электровоза или электропоезда

Полоса частот гармонических составляющих тока электропоезда, Гц	Центральная частота полосы (номинальная частота сигнального тока устройств СЦБ и АЛС), Гц	Действующее значение гармонических составляющих тока электровоза/электропоезда в полосе частот, А, не более
19–21	25	11,6
21–29		1,0
29–31		11,6
40–46	50	5,0
46–54		1,3
54–60		5,0
65–85	75	4,1
167–184	175	0,4

Для проведения такого экспериментального исследования целесообразно использовать виртуальную экспериментальную установку, содержащую имитационные модели формирователя сигналов АЛС-ЕН и приёмника сигналов АЛС-ЕН со схемой ШОУ, описанные в [5].

В эксперименте необходимо получить сведения о работоспособности приёмника в условиях воздействия гармонических помех с допустимым уровнем в различных частотных диапазонах. При этом на входе приёмника обеспечивается наличие сигнала АЛС-ЕН с уровнем, соответствующем номинальному напряжению на входе блока электроники локомотивного типа БЭЛ2М2 от ПК. Номинальное (действующее) напряжение на входе приёмника определим по справочнику [6]: оно составляет 80 мВ действующего значения переменного напряжения частотой 174,38 Гц. Таким образом, на входе приёмника будет сигнал АЛС-ЕН с амплитудным значением 113 мВ.

В качестве входной величины в эксперименте будет аддитивная смесь сигнала АЛС-ЕН амплитудой 56,6 мВ и гармонической помехи. В качестве гармонических помех будет использоваться непрерывное переменное напряжение синусоидальной формы в областях частот 25, 50, 75 и 175 Гц.

В качестве выходных величин будем использовать сигналы с выхода приёмника, соответствующие принимаемым синхрогруппе и кодовой комбинации АЛС-ЕН, по осциллограммам которых будем определять собственно работоспособность приёмника.

Для адекватного моделирования воздействия гармонических помех с допустимыми уровнями необходимо пересчитать приведённые в таблице 1 действующие значения гармонических составляющих тока в действующие значения напряжения гармонической помехи на входе локомотивного приёмника.

Известно [7], что суммарная ЭДС $E_{\text{пк}}$ сигнала АЛС, наведённая в ПК током $i(t)$ в рельсовых нитях под ПК, определяется выражением

$$\dot{E}_{\text{пк}} = -2[i'(t)M(t) + i(t)M'(t)],$$

где $i(t) = \dot{I} \sin \omega t$;

M – взаимная индуктивность между ПК и рельсовой нитью.

$\omega = 2\pi f$; f – частота тока, Гц.

Для упрощения примем величину M постоянной во времени, тогда

$$\dot{E}_{\text{пк}} = -2\omega \dot{I} M.$$

Из последнего выражения следует, что величина ЭДС пропорциональна амплитуде тока в рельсовой нити, а также пропорционально изменяется с изменением частоты этого тока. Учтём эти обстоятельства при определении допустимых действующих значений напряжения гармонической помехи на входе локомотивного приёмника.

При электротяге постоянного тока на частоте сигнального тока 50 Гц при величине сигнального тока АЛСН в рельсах под ПК 2 А в катушках наводится суммарная ЭДС величиной 280 мВ [6]. Следовательно, при величине мешающего тока 1,3 А и его допустимой асимметрии в рельсовых нитях 6 % [8] на этой же частоте 50 Гц действующее значение мешающего напряжения на входе приёмника составит 11 мВ, а при величине мешающего тока 11,6 А на частоте 31 Гц – 60 мВ. Аналогичным образом определены действующие значения напряжения гармонической помехи в ПК на частотах, приведённых в таблице 1. Результаты представлены в таблице 2.

Анализ данных, представленных в таблице 2, позволяет сделать следующие выводы.

Наименьшее допустимое значение напряжения гармонической помехи на входе локомотивного приёмника имеет место частоте 25 Гц. Это объясняется тем, что на данной частоте сигнал АЛСН имеет наименьшее значение в сравнении с другими частотами (50 и 75 Гц).

Наибольшие уровни гармонических помех допускаются на частотах 29–31 и 85 Гц. На данных частотах помеха не попадает в полосы пропускания полосовых фильтров каналов АЛСН на несущих частотах 25 и 75 Гц и, соответственно, эффективно ими подавляется.

В области частоты 175 Гц, практически совпадающей с частотой несущего колебания сигнала АЛС-ЕН, допустимый уровень гармонической помехи близок к минимальному в канала АЛС: всего 11–12 мВ действующего значения.

Таблица 2

Допустимые уровни гармонических помех в канале АЛС-ЕН

Частоты гармонических составляющих тока электровоза/электropоезда, Гц	Действующее значение гармонических составляющих тока электровоза/электropоезда в полосе частот, А, не более	Действующее значение гармонической помехи от составляющих тока электровоза/электropоезда, мВ
19	11,6	37
21	11,6	41
25	1,0	4,2
29	11,6	57
31	11,6	60
40	5,0	34

Частоты гармонических составляющих тока электровоза/электropоезда, Гц	Действующее значение гармонических составляющих тока электровоза/электropоезда в полосе частот, А, не более	Действующее значение гармонической помехи от составляющих тока электровоза/электropоезда, мВ
46	5,0	39
50	1,3	11
54	5,0	45
60	5,0	50
65	4,1	45
85	4,1	59
167	0,4	11
175	0,4	12
184	0,4	12

Заключение. Проведённый анализ действующих норм электромагнитной совместимости тягового электropодвижного состава и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) позволил определить на их основе допустимые уровни (действующие значения напряжения на входе локомотивного приёмника) гармонической помехи в различных частотных диапазонах.

Полученные данные позволили осуществить планирование экспериментального исследования для оценки влияния гармонической помехи с допустимыми уровнями на устойчивость функционирования приёмника сигналов АЛС-ЕН со схемой ШОУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гумаров А. Р., Авсиевич А. В. Обзор систем автоматической локомотивной сигнализации // Мировая наука. – 2019. – № 12 (33). – С. 462–471.
2. Юсупов, Р. Р. Разработка функциональной схемы и имитационной модели приемника сигналов АЛС-ЕН со схемой ШОУ / Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин // Вестник СамГУПС. – 2023. – № 1(59). – С. 119–125.
3. Леушин В. Б., Юсупов Р. Р. Особенности каналов автоматической локомотивной сигнализации магистральных железных дорог : учебное пособие для студентов специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. Самара: СамГУПС, 2007. – 115 с.
4. ГОСТ 33436.3-1-2015 Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3–1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2019. 32 с.
5. Юсупов, Р. Р. Разработка функциональной схемы и имитационной модели приемника сигналов АЛС-ЕН со схемой Шоу / Р. Р. Юсупов, А. С. Хохрин // Вестник СамГУПС. – 2023. – № 1(59). – С. 119–125. – EDN XJTCNA.
6. Сороко В. И., Фоткина Ж. В., «Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики» [Текст] : Справочник: в 5 кн. Кн. 4. – 5-е изд. – М.: ООО НПФ «Планета», 2020. – 1020 с.
7. Лисенков В. М. Индуктивная связь с поездами. – М.: Транспорт, 1976. – 112 с.
8. Техничко-нормировочная карта № ТНК ЦШ 0156–2016. Электрические рельсовые цепи. Измерение асимметрии обратного тягового тока в двухниточных рельсовых цепях, по которым осуществляется пропуск обратного тягового тока и предусмотрено задание поездных маршрутов / Утв. Управлением автоматики и телемеханики ЦДИ – филиала ОАО «РЖД» 28.10.2016 г.

Повышение эффективности электротехнических систем и комплексов

УДК 621.331

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ГИБРИДНОЙ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. Р. Алан¹, А. И. Зотова², А. В. Кацай³, Э. А. Чамагуа¹, В. М. Шевлюгин²

¹ МУП «Троллейбусное управление» Администрации, Республика Абхазия

² Российский университет транспорта (МИИТ)

³ ООО «Кинемак-Энерго»

Система тягового электроснабжения (СТЭ) городского наземного транспорта (троллейбусы и трамваи) в значительной степени отличается от метрополитенов и магистральных железных дорог в плане малой загруженности электротехнического оборудования и малой мощности первичных электросетей. Это связано традиционно с меньшими весами транспортных средств (ТС), размерами движения и топологией тяговых сетей. При даже незначительных изменениях размеров движения серьезной реконструкции подлежит вся система внешнего электроснабжения 10 кВ (особенно если электроэнергетическая система не менялась со времен СССР) и подводящих линий постоянного тока 600 В.

Недостаток мощности подводящих к тяговым подстанциям (ТП) высоковольтных линий приводит к глубоким просадкам напряжения в контактной сети при разгонах электроподвижного состава на участках сети этой подстанции. В качестве иллюстрации приведем фрагмент графика фактического замера напряжения в контактной сети троллейбуса МУП «Троллейбусное управление» Администрации г. Сухум (рис. 1) [6]. Скважность измерений составила 2 секунды. Провал до 0 В в центре графика вызван необходимостью отключить провода прибора от контактной сети чтобы пропустить идущий по линии троллейбус и был продолжительностью порядка полуминуты. Среднее значение напряжения составило 554 В. Размах колебаний напряжения – от максимума в 630 В до минимума 395 В. Просадки до уровня ~400 В означают прохождение подвижного состава на тяге по данному участку КС.

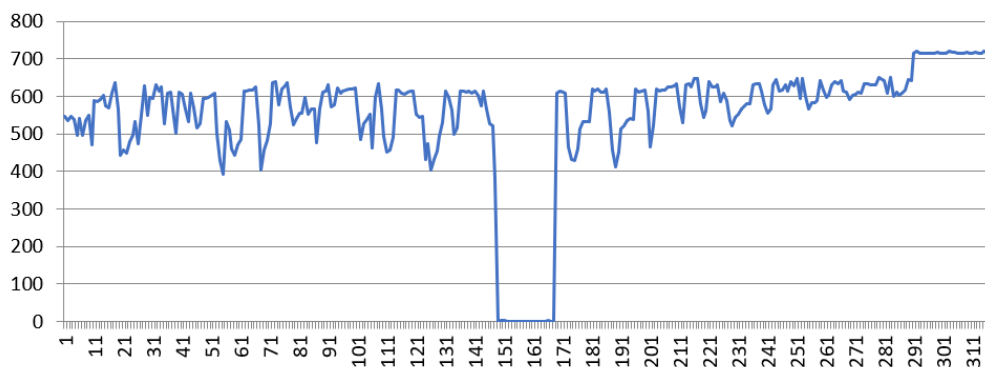


Рис. 1. График измерений напряжения (В) на участке движения «Рынок», питаемом от ТП-1.
Скважность 2 сек.

Данный фрагмент графика напряжения свидетельствует о существенном недостатке мощности питания тяговой подстанции. При движении даже одного троллейбуса с номинальной мощностью тягового двигателя не более 150 кВт просадки напряжения достигали 400 В и ниже, что негативно влияет на электропотребляющие устройства, подключенные к этой контактной сети, снижает скорость движения транспортных средств и, следовательно, может негативно влиять на график пассажироперевозок. Для недопущения таких ситуаций требуется подвести дополнительную мощность к питающей тяговой подстанции. Этого можно достичь несколькими способами. Один из них – строительство новых ЛЭП, позволяющих передать большую мощность для тяговой подстанции. Однако такой способ ликвидации энергодефицита не всегда эффективен или возможен.

Для снижения капитальных затрат на ЛЭП и распределительные устройства при реконструкции энергосетей, для регионов с высокой солнечной активностью, предлагается в СТЭ городского наземного транспорта использование гибридных тяговых подстанций (ГТП) с солнечными электростанциями (СЭС) и накопителями энергии (НЭ). Учитывая неравномерное потребление тяговой нагрузки в СТЭ по времени, в дневное время суток, в моменты отсутствия тяговой нагрузки, посредством постоянной генерации СЭС, энергия накапливается в НЭ. При пусках транспортных средств (при максимальных размерах движения), пики тяговых токов будут обеспечиваться параллельной работой системы первичного электроснабжения, СЭС и НЭ. Предлагаемое техническое решение значительно разгрузит «слабые» ЛЭП системы первичного электроснабжения и сэкономит затраты на электроэнергию за счет солнечной генерации.

В качестве НЭ можно использовать весь ряд известных типов накопителей энергии, а именно: емкостные, кинетические, индуктивные сверхпроводниковые, гидроаккумулирующие электростанции, пневматические, электрохимические и пр. В данном случае, учитывая электротехнические показатели работы СТЭ, предполагается использование накопителей кинетической энергии (НКЭ) и аккумуляторных батарей (АБ) различной электрохимии.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема интеграции СЭС и НКЭ в СТЭ городского транспорта. Здесь показана ТП троллейбусной линии, которая, с одной стороны, запитывается от высоковольтной ЛЭП 6(10, 20) кВ, а с другой стороны, имеет ввод постоянного тока 600 В от СЭС. От сборной шины постоянного тока ТП 600 В питание через фидерные кабели передается в тяговую сеть транспортным средствам. Также показан НКЭ, который может быть установлен в любой точке СТЭ на стороне постоянного тока 600 В (на данной схеме он показан в тяговой сети недалеко от ТП).

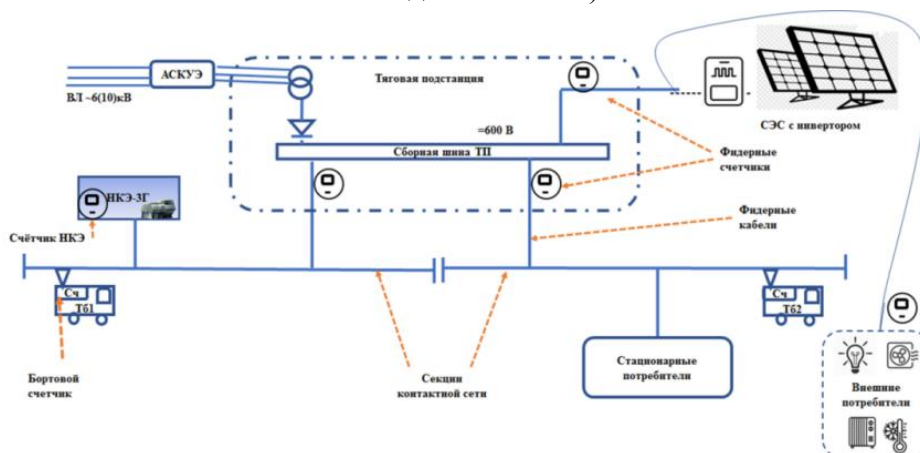


Рис. 2. Принципиальная схема интеграции СЭС и НКЭ в СТЭ городского транспорта

В предложенной конфигурации НКЭ при разряде обеспечивает стабилизацию напряжения в тяговой сети при пусках транспортных средств в часы пик. Заряд НКЭ может осуществляться следующими способами:

- от СЭС (в часы солнечной активности);
- от системы первичного электроснабжения (в часы интенсивного движения или недостаточной солнечной активности);
- от рекуперированных транспортных средств во время торможения.

Предварительная оценка эффективности предлагаемого технического решения [4], в качестве примера, была предпринята для районов черноморского побережья Краснодарского края и Абхазии. Как правило, на ТП СТЭ троллейбусных линий используется 2–3 тяговых агрегата в каждый из которых входят тяговый трансформатор типа ТЛСПУ-1000/6 УХЛ-3 (мощность – 692 кВА, $U_{кз}$ – 6 %, схема соединения обмоток – треугольник/звезда) и выпрямительный агрегат типа ВТПЕД-600М-УХЛ-4 (мощность – 600 кВт). В качестве транспортного средства рассмотрен современный низковольтный троллейбус БТЗ-52763 Башкирского троллейбусного завода. Основные технические характеристики троллейбуса:

- полная масса – 18000 кг;
- максимальная скорость – 60 км/ч;
- мощность двигателя – 180 кВт.

Исходя из кинетической энергии, для покрытия энергодефицита при пуске и разгоне дополнительно двух транспортных средств до 60 км/ч необходимы:

- мощность $P_{эд} = 2 \cdot P_{тр} = 2 \cdot 180 = 360$ кВт;
- энергия $A_{эд} = 2 \cdot A_{тр} / \eta_{пр} = 2 \cdot (m \cdot V^2 / 2) / \eta_{пр} = 2 \cdot 18000 \cdot 16,67^2 / 2 / 0,8 = 6,3$ МДж (1,75 кВт·ч);

где: $P_{эд}$ – мощность энергодефицита, $P_{тр}$ – мощность одного троллейбуса, $A_{эд}$ – энергия энергодефицита, $A_{тр}$ – энергия, необходимая для пуска и разгона одного троллейбуса, $\eta_{пр}$ – КПД пуска и разгона троллейбуса (80%), m и V – масса и скорость троллейбуса.

Также в расчетах следует учитывать потребление собственных нужд подвижного состава, мощность которого можно считать условно постоянной и по значению – существенно (в 5–10 раз, в зависимости от энерговооруженности вагона и от климатического фактора [5]) ниже пиковой тяговой нагрузки.

Необходимую энергию для пиковых режимов потребления на участках питания одной тяговой подстанции может обеспечить один накопитель энергии типа НКЭ-3Г мощностью 180 кВт и энергоемкостью 2 кВт·ч. Данный тип накопителя уже рассматривался для использования городской СТЭ трамвайной линии [1, 2, 7].

Мощность СЭС для заряда НКЭ можно оценить исходя из размеров движения (минимального межтранспортного интервала) и необходимой энергии разгона. Для благоприятных графиков движения транспортных средств в режиме тяговых пусков на линии с размерами движения (интервалами между троллейбусами) порядка 8-ми минут, мощность СЭС должна составлять:

$$P_{сэс} = A_{эд} \cdot t_m / t_i = 1,75 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)} \cdot 60 \text{ (мин)} / 8 \text{ (мин)} = 13,13 \text{ кВт};$$

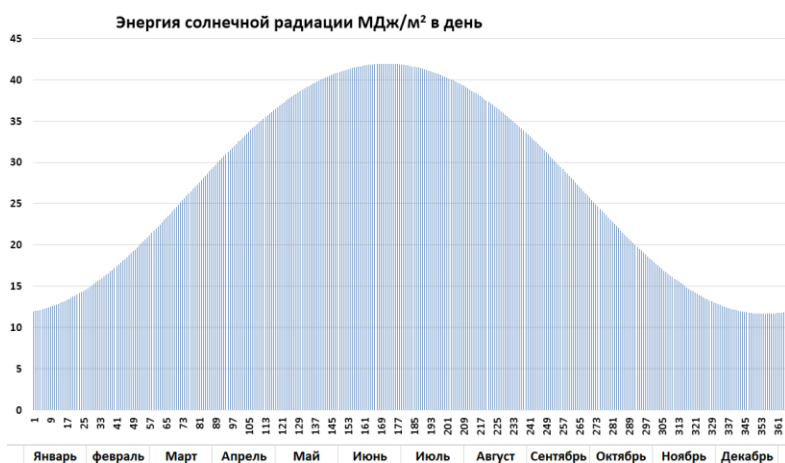
где: t_m – коэффициент перевода из часов в минуты (60), t_i – время между троллейбусами, за которое должен зарядиться НКЭ.

С учетом указанных потерь выдаваемая мощность СЭС для описанных условий может составлять в чистом виде до 20 кВт. Если принять во внимание суточные и сезонные изменения уровня солнечной радиации, напрямую влияющей на выработки электроэнергии

солнечными панелями, а также потери на преобразование в солнечном инверторе, то следует мощность электростанции брать с некоторым запасом с коэффициентом 2–3.

Таким образом, для обеспечения двукратного увеличения пропускной способности СТЭ троллейбусной линии г. Сухум будет достаточно для каждой ГТП СЭС номинальной мощностью порядка 40–60 кВт и НКЭ мощностью 180 кВт и энергией запаса до 2-х кВт*ч. При локальном избытке мощности СЭС невостребованная часть выработки энергии может направляться на потребление стационарных объектов транспортной инфраструктуры (электрооборудование остановочных пунктов, собственные нужды тяговой подстанции и др.), подключенных по питанию к контактной сети, либо к сторонней локальной нагрузке (см. рис. 2).

Климатический анализ в исследуемом районе г. Сухум показал высокую солнечную активность [3]. На рисунке 3 показана зависимость энергии солнечной радиации на 1 м² за сутки в функции времени в течение года. На рисунке 4 показана аналогичная зависимость уже средней за сутки мощности солнечной генерации пересчитанная для солнечных панелей конкретного производителя [8].



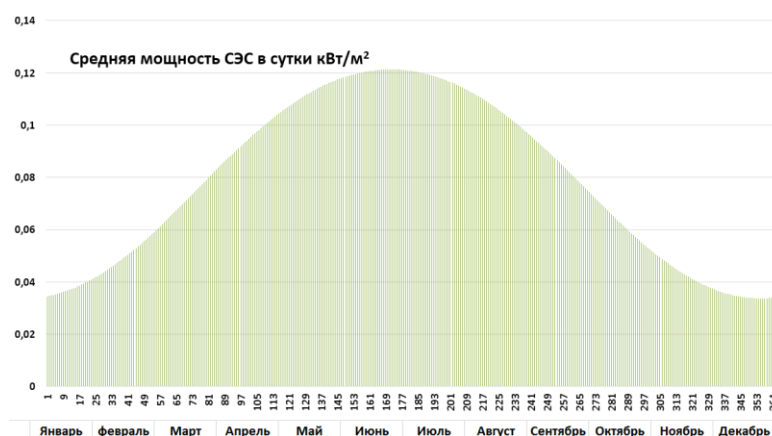


Рис. 4. Годовая зависимость средней за сутки мощности солнечной генерации в г. Сухум, пересчитанная для солнечных панелей конкретного производителя [8]

Выводы. В ситуациях с энергодефицитными тяговыми подстанциями и высокой стоимостью подвода дополнительных ЛЭП добавку пиковой мощности для питания движения транспортных средств (ТС) могут производить возобновляемые источники энергии (например, солнечные электростанции) в комплексе с соответствующими накопителями энергии. При умеренной интенсивности движения на маршруте мощность СЭС может быть небольшой, достаточной для восполнения заряда маховичного накопителя энергии за интервал между двумя последовательно идущими ТС. Как показали испытания накопителей энергии в контактной сети электротранспорта, мощность накопителя энергии должна быть сопоставима с мощностью тягового привода одной единицы подвижного состава. При этом его энергоемкость должна быть достаточна для питания тяговой нагрузки двух последовательно разгоняющихся троллейбусов без интервала между разгонами. Снижение цен на оборудование солнечных электростанций в последние годы уже позволяет обоснованно рассматривать применение комплексов СЭС-НЭ в составе гибридной тяговой подстанции для питания контактной сети СТЭ городского транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. Т. 30. – № 4 (76). – С. 127–141.
2. Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. – № 1 (58). – С. 10–20.
3. Экба Я. А., Дбар Р. С. Экологическая климатология и природные ландшафты Абхазии. – Сочи: «Папирус-М-Дизайн». 2007. – 324 с.
4. Жуматова А. А. Экономические предпосылки использования ветровых электроустановок в системе тягового электроснабжения Казахстана // Сборник трудов научно-практической конференции «Неделя науки МИИТа» – 2009 г. – С. II-39.
5. Кацай А. В. Влияние осадков и температуры воздуха на энергопотребление городского рельсового транспорта // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2024. – № 615. – С. 91–107.
6. Кецаба Н. В., Чамагуа Э. С., Алан А. Р., Козаревич В. А. Исследование режимов тягового электроснабжения в контактной сети сухумского троллейбуса // Вестник АНА, серия «Естественные науки», № 11, 2020. С. 166–179.
7. Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Экономия энергии в контактной сети электротранспорта при работе стационарного накопителя // Практическая силовая электроника. – 2023. – № 1 (89). – С. 42–52.
8. Unigreen Energy <https://unigreen-energy.com>

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРЕВА ДРОССЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЫЧЕК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

М. В. Башаркин¹, А. И. Гурьянов², Н. А. Исайчева¹

¹*Приволжский государственный университет путей сообщения*

²*Муниципальное предприятие городского округа Самара
«Самарский метрополитен им. А.А. Росовского»*

Введение. В условиях эксплуатации дроссельные перемычки, применяемые для соединения дроссель-трансформаторов с рельсовыми нитями, относятся к хозяйству автоматики и телемеханики, так как их техническое состояние влияет на устойчивую работу рельсовых цепей. При этом функция обеспечения непрерывности цепи по канализации тяговых токов относится к хозяйству электроснабжения и конструктивные элементы дроссельных перемычек (ДП) зависят от их значений в тяговой рельсовой сети. Содержание в исправном состоянии элементов тяговой рельсовой сети, в том числе ДП непосредственно влияет как на пропускную способность линий для поездов повышенной массы так и при организации скоростного и высокоскоростного движения на железных дорогах России [1, 2].

В настоящее время износ ДП фиксируется по совершившемуся факту, определяемому обслуживающим персоналом только визуально: излом, пережог, ослабление крепления, кража. В настоящее время применение сквозных цифровых технологии на железнодорожном транспорте открывает новые возможности диагностирования сложных объектов, к которым относится протяжённые рельсовые нити и их элементы [3, 4].

Авторами предлагается автоматизировать технологический процесс контроля напольных устройств с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях интеграции с мобильным диагностическим комплексом. Применение БПЛА позволит повысить уровень цифровизации технического обслуживания на железнодорожном транспорте как стратегически важного сектора экономики [5], так как результаты диагностирования предусматривают интеграцию цифровых платформ управления движением поездов и автоматизированных системы учёта отказов в работе технических средств.

Методы решения. На первом этапе нами предлагается при комплексном диагностировании с помощью БПЛА апробировать тепловизионный контроль состояния элементов тяговой рельсовой сети. Цель работы обоснование применения тепловизионного контроля элементов тяговой рельсовой сети по нагреву дроссельных перемычек, как элемента ТРС. Задачи: обосновать выбор диагностических параметров дроссельных перемычек; разработать методику исследования перегрева дроссельных перемычек с использованием беспилотного летательного аппарата. На сети железных дорог применяются медные, стальные, сталемедные дроссельные перемычки. Конструктивно ДП состоят из втулки, шины и троса (рис. 1), возможно двухпроводное и трехпроводное исполнение троса.

ДП из медных проводов допустимая температура нагрева перемычек на протяжении всего срока эксплуатации не должна превышать 95° С; из биметаллических сталемедных – 115° С, стального каната 120° С. Величины переходного электрического сопротивления в местах крепления «провод – втулка штепселя» и «втулка – шина» зависят от поперечного сечения троса. Допускаемое отклонение переходного сопротивления в местах креплений в сторону

увеличения возможно не более 20% [6]. Для локализации тепловизионного контроля необходимо определить диагностические параметры и место фиксации их на дроссельной перемычке. На рис. 1 приведен эскиз двухпроводной дроссельной перемычки со сталемедным тросом, вид сверху. Для исследования нагрева ДП с использованием БПЛА производится фотофиксация гистограммы по зонам и определяются величины диагностических параметров. Превышение предельно-допустимых значений величин диагностических параметров фиксируется в память БПЛА.

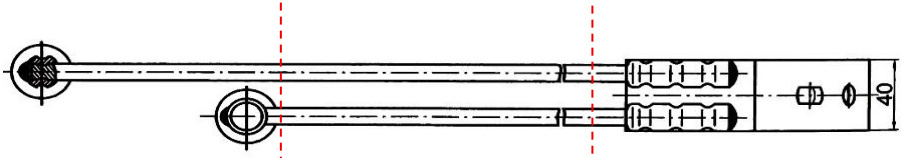
Эскиз двухпроводной дроссельной перемычки (вид сверху)			
Детали	Втулка штепселя	Трос	Втулка шины
Диагностический параметр	Переходное сопротивление, мкОм	Площадь поперечного сечения, мм ²	Переходное сопротивление, мкОм
Нормативное значение	40	70	40
	32	95	32
	30	120	30
Предельно допустимое значение диагностического параметра	48	49	48
	39	67	39
	36	84	36

Рис. 1. Определение локальных зон при тепловизионном контроле ДП

Расчёты показали, что при допустимом износе многожильной ДП 30% сопротивление увеличивается на 4,8%. Это подтверждает возможность применения тепловизионных методов контроля для раннего обнаружения процессов деградации элементов ТРС.

Заключение. Организация тепловизионного контроля средствами БПЛА обеспечивает выявление накопительных процессов износа и предотказных состояний элементов тяговой рельсовой сети до момента возникновения отказов устройств автоматики и телемеханики и потерь электроэнергии на тягу поездов. Вероятность отказа ДП из-за термического разрушения возможно определить при организации технического обслуживания рельсовой линии МДК-ТРС, так это позволит фиксировать накопительные процессы старения и деградации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаранин М. А., Бошкарёва Т. В., Фроленков С. А. Моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока для пропуска поездов повышенной массы // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 5 (59). С. 22–27.
2. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Анализ основных проблем в области энергообеспечения, возникающих при организации скоростного и высокоскоростного движения на железных дорогах России, и пути их решения // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 4 (70). С. 14–19.
3. Дмитриев В. В., Гаранин М. А. Сквозные цифровые технологии на железнодорожном транспорте // Автоматика, связь, информатика. 2025. № 8. С. 2–6.
4. Исайчева, А. Г. Обоснование применения мультимедийного комплекса диагностирования тяговой рельсовой сети / А. Г. Исайчева, М. В. Башаркин, В. А. Воронин // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 3(111). – С. 145–150. – EDN LOUYNI.
5. Гаранин М. А. Влияние цифровых двойников на экономику общественного сектора // Креативная экономика. 2018. Т. 12. № 11.
6. Сороко В. И., Фоткина Ж. В. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник: в 5 кн. Кн. 1. – 5-е изд. – М.: ООО «НПФ «ПЛАНЕТА», 2020. – 968 с.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ОТ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С. В. Белецкий¹, В. А. Гречишников², С. В. Оганов¹, М. В. Шевлюгин², Р. В. Щеглов³

¹ ООО «ЭнергоАльянс»

² Российский университет транспорта (МИИТ)

³ ООО «ТрансЭнергоСнаб»

Электроэнергетическая инфраструктура железных дорог и метрополитенов включает две функционально обособленные подсистемы: систему тягового электроснабжения (СТЭ), предназначенную для питания поездов, и разветвленную систему электроснабжения собственных нужд (СН), обслуживающую нетяговые потребители. Передача энергии к поездам осуществляется через тяговую сеть (ТС) и тяговые подстанции (ТП) на постоянном токе, тогда как электроснабжение нетяговых объектов обеспечивается понизительными подстанциями (ПП) посредством многочисленных кабельных линий переменного тока напряжением 0,4 кВ для метрополитенов и линиями продольного электроснабжения 10 кВ в случае железных дорог.

В случае СТЭ железных дорог, линия продольного электроснабжения, в отличие от контактной сети, которая питает поезда, питается отпайками от тяговых подстанций через специальные понижающие трансформаторы. Она относится к потребителям первой (особой) категории, так как отказ в её работе грозит безопасности движения поездов. К потребителям линии продольного электроснабжения железных дорог относятся следующие системы и устройства:

1. Устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ).

Светофоры (проходные, входные, выходные), рельсовые цепи (датчики свободы/занятости путей на перегонах и станциях), электрическая централизация стрелок и сигналов (ЭЦ) на станциях, аппаратура диспетчерской централизации, устройства ограждения переездов (автоматические шлагбаумы, светофоры и звуковая сигнализация).

2. Связь и телекоммуникации.

Усилительные и регенерационные пункты магистральных линий связи (оптоволоконных или медных), базовая аппаратура технологической радиосвязи (поездная радиосвязь, ремонтно-оперативная связь), оборудование диспетчерского контроля (системы СЦБ-АСК, позволяющие видеть на табло у диспетчера все поезда).

3. Освещение и инфраструктура на отдельных пунктах.

Наружное освещение станций, платформ и междупутий, электрообогрев стрелочных переводов, обогрев устройств СЦБ в релейных шкафах (поддержание тепла для надежной работы реле и микропроцессоров), компрессорные установки для пневматической очистки стрелок от снега.

4. Линейно-путевые потребители.

Пункты обогрева монтеров пути (небольшие бытовки-обогревалки вдоль путей), инструмент путевых машинных станций при проведении плановых ремонтов (часто используют как резервную или рабочую сеть), питание зарядных станций для аккумуляторного путевого инструмента.

5. Устройства контроля подвижного состава.

Посты аппаратуры обнаружения перегретых букс (напольные камеры и датчики, питаются от продольной линии, чтобы вовремя сообщить машинисту или диспетчеру о неисправности ходовой части).

6. Системы безопасности и вспомогательные системы.

Системы видеонаблюдения и охранной сигнализации на перегонах (тоннели, мосты и пр.), питание оборудования пассажирских платформ (табло прибытия, билетные автоматы, громкоговорящая связь) на остановках, где нет отдельного мощного ввода.

В случае метрополитенов потребители собственных нужд – это все электроприёмники, которые обеспечивают безопасную, бесперебойную и комфортную работу подземного транспортного комплекса, но не относятся напрямую к тяге поездов. Иными словами, это инженерная инфраструктура метро, без которой движение поездов и пребывание пассажиров стало бы невозможным. К потребителям собственных нужд метрополитенов относятся:

1. Системы обеспечения безопасности движения.

Устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) – управление стрелками, светофорами, маршрутами.

Аппаратура диспетчерской централизации и автоведения.

Радиосвязь (поездная, тоннельная, станционная) и технологическая телефонная связь.

Системы интервального регулирования движения (включая современные радиоблок-центры).

2. Санитарно-технические системы и системы жизнеобеспечения.

Тоннельная вентиляция (вентиляторы главного проветривания, шахтные агрегаты) – в обычном режиме создаёт воздухообмен; в аварийном – удаляет дым и подаёт свежий воздух для эвакуации.

Станционная приточная и вытяжная вентиляция.

Системы дымоудаления и подпора воздуха в защищаемые объёмы (лифтовые шахты, лестничные клетки).

Водоотливные и канализационные насосные установки (дренаж тоннелей, перекачка хозяйственных стоков).

Тепловые завесы, калориферы, системы отопления вестибюлей и служебных помещений.

Установки кондиционирования воздуха (в основном диспетчерские, аппаратные, кассовые залы).

3. Вертикальный транспорт и пассажиропоток.

Эскалаторы всех типов (в том числе машинные залы с гидроприводами, аварийные тормоза).

Пассажирские лифты и подъёмники для маломобильных групп населения.

Автоматические платформенные ворота и скользящие двери (станции закрытого типа).

4. Освещение.

Рабочее освещение вестибюлей, платформ, переходов, служебных помещений.

Эвакуационное и аварийное освещение (указатели выходов, светильники на путях эвакуации).

Тоннельное освещение (включаемое при обходе путей или эвакуации).

Охранное освещение (депо, парковые пути).

5. Инженерно-технические системы станций и перегонов.

Автоматические противопожарные системы: насосные станции водяного, пенного или газового пожаротушения; системы оповещения и управления эвакуацией.

Системы охранной и технологической сигнализации, контроля доступа, видеонаблюдения.

Автоматика инженерных систем (контроль загазованности, температуры, уровня воды).

Кассовое оборудование, автоматы по продаже билетов, турникеты.

6. Потребители депо, мастерских и административных зданий.

Станочное оборудование, подъёмно-транспортные механизмы (краны, домкраты).

Моечные установки, компрессоры, сварочные посты.

Зарядные станции для аккумуляторного электротранспорта (тяговые батареи хозяйственных поездов).

Освещение и отопление производственных корпусов. Для всех перечисленных систем выделяются отдельные источники и линии электроснабжения. Однако режимы работы подсистем электроэнергетической системы (СТЭ и СН) существенно различаются. СТЭ функционирует с резко переменным графиком электропотребления. Особенно ярко выражено это в метрополитене, где максимальная нагрузка исключительно в утренние и вечерние часы пик продолжительностью по 2–3 часа в сутки, в остальное время её пропускная способность недоиспользуется. Данное обстоятельство позволяет рассматривать тяговую сеть в качестве дополнительного источника для питания нетяговых потребителей [2], особенно в случае с метрополитеном, многие из которых (водоотливные установки; вентиляционные камеры тоннельного, станционного и технического назначения; эскалаторы; системы освещения и отопления станций, тоннелей, вестибюлей и технических помещений) территориально значительно удалены от ПП. Значительная удалённость требует прокладки протяжённых кабельных трасс большого сечения, что сопряжено с высокой стоимостью, сложностью выполнения работ в подземном пространстве метрополитенов и сопровождается ощутимыми потерями напряжения и энергии в сети 0,4 кВ.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема распределенного электроснабжения собственных нужд (вентиляционных двигателей). В данном случае питание вентиляторов осуществляется двумя способами – традиционным (через кабельные линии 0,4кВ) и предлагаемым новым (от тяговой сети 825В через инверторы [1]).

Следует отметить, что питание СН может осуществляться от тяговой сети, в том числе, и от рекупирующих поездов при торможении. На схеме (рис. 1) показаны токи электроподвижных составов (ЭПС) – ЭПС2 находится в режиме рекуперации, ЭПС1 – в режиме тяги. Часть тока рекуперации (I_p) от ЭПС2, посредством межпоездного обмена через тяговую сеть, передается ЭПС1, который его потребляет как тяговой (I_t). Оставшаяся часть тока рекуперации (избыточная энергия рекуперации) утилизируется распределенными нагрузками СН, что значительно повышает экономию энергии. Таким образом, применение распределённого питания нетяговых потребителей непосредственно от тяговой сети в зонах их расположения в тоннелях метрополитена обеспечивает ряд технико-экономических эффектов:

Утилизация избыточной энергии рекуперации, которая при отсутствии потребителя рассеивается в тормозных реостатах. Согласно опубликованным данным, её доля может достигать 8–22 % от общего объёма энергии, расходуемой на тягу поездов. Распределённое подключение нагрузки вдоль ТС позволяет существенно повысить эффективность использования рекуперированной электроэнергии.

Питание от ТС осуществляется через контактный и ходовой рельсы, обладающие значительно бóльшим поперечным сечением по сравнению с кабельными линиями 0,4 кВ, и при трёхкратно более высоком напряжении (825 В против 0,4 кВ), что ведёт к радикальному снижению энергетических потерь в токоведущих частях.

Применение управляемого преобразователя энергии (DC/AC-инвертора) позволяет стабилизировать уровень напряжения у конечного потребителя, повышая качество электроснабжения. Надёжность электроснабжения нетяговых потребителей повышается вдвое, поскольку тяговая сеть имеет двустороннее питание от двух ТП с независимыми вводами.

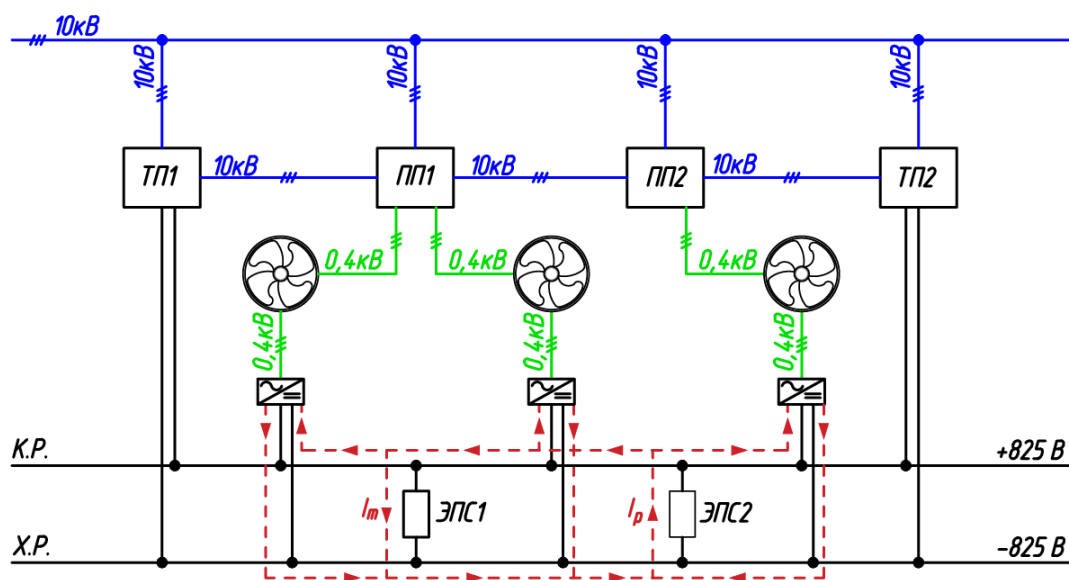


Рис. 1. Принципиальная схема распределенного электроснабжения собственных нужд (вентиляционных двигателей) метрополитена (традиционное – через кабельные линии 0,4кВ и новое – от тяговой сети 825В через инверторы)

Выводы. Предложенная распределенная система электроснабжения СН в случае с метрополитеном позволяет, дополнительно к межпоездному обмену, утилизировать 3–7 % от общего объёма энергии тяги, расходуемой на тягу поездов, значительно снизить потери энергии в кабельных линиях (в некоторых случаях на 87,5 %), стабилизировать уровень напряжения и повысить качество электроснабжения, значительно повысить надёжность электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бестемьянов П. Ф., Белов М. Н. DC-DC преобразователь в составе управляемого стационарного накопителя энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена // Электротехника. – 2024. – № 9. – С. 2–8.
2. Белецкий С. В., Гречишников В. А., Ермоленко Д. В., Шевлюгин М. В. Система распределенного электроснабжения моторных приводов собственных нужд метрополитена от тяговой сети // Электротехника. 2025. № 9. С. 53–57.

ТЕПЛОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ

С. В. Белецкий¹, В. А. Гречишников², С. В. Оганов¹, М. В. Шевлюгин², Р. В. Щеглов³

¹ ООО «ЭнергоАльянс»

² Российский университет транспорта (МИИТ)

³ ООО «ТрансЭнергоСнаб»

Система тягового электроснабжения (СТЭ) железных дорог является, как потребителем электроэнергии, так и ее генератором при рекуперативном торможении поездов. Энергия рекуперации при торможении может полезно расходоваться на питание других поездов (межпоездной обмен), идущих в режиме тяги, и на собственные нужды всех поездов в зоне действия уровня напряжения рекуперирующего поезда. Не принятая другими поездами энергия рекуперации называется избыточной и бесполезно рассеивается в виде тепла в тормозных реостатах.

По разным источникам на железных дорогах постоянного тока возврат энергии рекуперации обратно в сеть в среднем оценивается в 10–12% от энергии тяги, при возможном потенциале в 35–42%. На железных дорогах переменного тока этот процент выше за счет более высокого напряжения в тяговой сети и возможности передачи энергии рекуперации через подстанции обратно в систему первичного электроснабжения. Однако в случае с переменным током, во-первых, за возвращенную энергию в сеть никто не заплатит, а во-вторых, передаваемая в сеть избыточная энергия рекуперации крайне плохого качества, за что могут наложить штрафные санкции. Таким образом, на полигонах железных дорог РФ существует огромный потенциал возврата избыточной энергии рекуперации.

Наиболее комплексно данную проблему возможно решить с помощью накопителей энергии. На данный момент имеется несколько технических решений по аккумулированию избыточной энергии рекуперации в СТЭ. А именно: использование следующих типов накопителей энергии стационарного исполнения: емкостные накопители, кинетические накопители, аккумуляторные батареи различных электрохимий, сверхпроводниковые накопители, гидроаккумулирующие электростанции. Однако далеко не все типы накопителей могут быть применимы для магистральных железных дорог, особенно при грузовом движении. К примеру, грузовой поезд массой 6000 т и скоростью 60 км/ч обладает кинетической энергией порядка 800 кВт·ч. С учетом КПД рекуперации и сопротивления движению поезда, при торможении перевести в электрическую энергию можно порядка 700 кВт·ч. При этом мощность передачи энергии рекуперации будет составлять несколько мегаватт. Под данные условия работы теоретически могут подойти сверхпроводниковые накопители энергии (мало применимы в СТЭ ввиду отсутствия даже экспериментальных образцов), кинетические (использование затруднено ввиду отсутствия технологий изготовления сверхэнергоёмких маховиков), гидроаккумулирующие электростанции (использование затруднено из-за отсутствия подходящих высотных водных бассейнов вблизи конкретной железной дороги).

Для решения поставленной задачи предлагается использовать тепловые накопители энергии (ТНЭ) [2]. В данном случае это нестандартный, но перспективный подход, который решает проблему не столько накопления самой избыточной энергии рекуперации с последующим возвратом в СТЭ, сколько аккумулирования тепла и сглаживания пиковых тепловых нагрузок. Таким образом, вместо сжигания энергии рекуперации на тормозных резисторах с рассеиванием тепла, предлагается направлять её на нагрев теплоаккумулирующего материала. Накопленное тепло в последствии можно использовать для отопления зданий или технологических нужд.

В данный момент для нужд теплоснабжения на российских железных дорогах используются котельные, которые являются критически важным элементом инфраструктуры, обеспечивающим теплом и технологическим паром объекты, часто находящиеся далеко от централизованных сетей теплоснабжения. Их работа имеет выраженную специфику, связанную с требованиями безопасности и суровыми климатическими условиями.

Котельные на железной дороге можно разделить по следующему типу потребителей:

Отопление инфраструктуры: Здания вокзалов, депо, посты электрической централизации (посты ЭЦ), дома связи, административные и жилые здания на станциях.

Технологические нужды: Разогрев мазута, масел и битума перед сливом или заправкой, отопление цехов ремонта подвижного состава (особенно актуально для тепловозных и вагонных депо), горячее водоснабжение для персонала локомотивных бригад, обогрев стрелочных переводов (в некоторых случаях), обеспечение теплом пунктов обогрева для работников пути (обогревательные вагоны или модули) и технологические процессы промывочно-пропарочных станций.

По типу топлива котельные РЖД можно разделить следующим образом:

Твердое топливо (уголь): Исторически основной вид топлива, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке, где расположены угольные разрезы. Используется каменный и бурый уголь. Многие старые котельные спроектированы именно под уголь, что требует наличия складов, дробилок и систем шлакоудаления; жидкое топливо (дизельное топливо, мазут, отработанное масло): дизель и мазут распространен там, где нет газа; отработанное масло (отработка) – уникальная черта железнодорожных котельных. В депо скапливаются тысячи тонн отработанного дизельного топлива, промышленного и моторного масла. Использование его как топлива решает проблему утилизации отходов 2–3 класса опасности; газовое топливо: Магистральный природный газ активно внедряется в газифицированных регионах, так как это чище и экономичнее. Перевод котельных на газ кардинально меняет автоматизированного управления и древнюю профессию кочегара; электричество: Электрокотлы используются редко из-за высокой стоимости энергии, в основном как резервные или в зонах жестких экологических норм (например, на Байкальской природной территории).

Тепловая мощность котельных на РЖД варьируется в колоссальном диапазоне: от крошечных автоматизированных установок, обогревающих один пост ЭЦ, до гигантских теплоцентралей, питающих крупные узловые станции, локомотивные депо и жилые поселки при них. По уровню мощности котельные можно разделить на:

1. Сверхмалая мощность (до 0,5 МВт / 0,43 Гкал/ч)

Потребители: Отдельные посты ЭЦ на малых перегонах, линейные пункты обогрева, дома связи, небольшие модульные здания.

Оборудование: Настенные газовые котлы или электрические котлы в блочно-модульном исполнении.

Мощность: Мощность часто составляет 30–100 кВт. Этого достаточно, чтобы поддерживать плюсовую температуру в здании площадью 100–300 м² и обеспечивать работу дизель-генератора в зимнем режиме.

Особенность РЖД: Раньше такие объекты отапливались печками или буржуйками, теперь их массово заменяют на автоматизированные электрокотельные без постоянного присутствия персонала.

2. Малая мощность (0,5 – 3 МВт / 0,43 – 2,5 Гкал/ч)

Потребители: Вокзалы малых станций, совмещенные здания (пост ЭЦ + товарная контора + компрессорная), небольшие пункты технического обслуживания вагонов.

Оборудование: Чаще всего 2–3 водогрейных котла в капитальном здании или блочно-модульная котельная (БМК).

Мощность: Типичная БМК для такой станции имеет мощность 1,0–2,5 МВт. Например, стандартная газовая БМК-2,5 МВт способна отопить административно-бытовой корпус площадью до 3000 м².

3. Средняя мощность (3 – 15 МВт / 2,5 – 13 Гкал/ч)

Потребители: Крупные ремонтные цеха в локомотивных депо, вагонные депо, большие вокзалы областных центров, прилегающие жилые массивы (дома отдыха бригад, общежития).

Особенности технологии: Здесь уже часто присутствует не только отопление, но и технологический пар для моечных машин (обмывка колесных пар и тележек) и калориферов сушильных камер.

Мощность: типовое оборотное депо может обслуживаться котельной на 6–9 МВт, крупное ремонтное депо с мойкой узлов – 10–14 МВт (включая паровую нагрузку 2–4 т/ч пара).

4. Крупная мощность (20 МВт и выше / 17 Гкал/ч и выше)

Потребители: Городские крупные узловые вокзалы, крупнейшие сортировочные станции, локомотиворемонтные заводы и веерные депо с большим количеством стоек.

Мощность: Во времена СССР котельная на станции Тайшет или в узлах вроде Бекасово-Сортировочное исторически могла иметь мощность 50–100 МВт, так как отапливала не только производство, но и поселок железнодорожников на несколько тысяч человек.

В таблицах 1 и 2 приведены данные по объемам потребления энергоресурсов теплогенерирующими установками структурных подразделений ОАО «РЖД» в 2023–2024 годах [1]. Как видно из отчетов ОАО «РЖД» потребность в теплогенерирующих ресурсах на железных дорогах значительна.

Таблица 1

Объемы потребления энергоресурсов теплогенерирующими установками структурных подразделений ОАО «РЖД» в 2023–2024 годах.

Вид энергоресурса	Ед. измерения	2023	2024
Уголь	тыс. т	453,0	441,2
Газ природный	млн м³	372,3	379,9
Мазут	тыс. т	188,5	165,3
Дизельное топливо	тыс. т	5,0	6,9
Электрическая энергия	млн кВт • ч	817,1	832,1
Другое	тыс. т	2,2	2,3

**Объемы потребления энергоресурсов
теплогенерирующими установками в 2023–2024 годах, ГДж**

Вид энергоресурса	2023	2024
Уголь	9 131 848	8 893 057
Газ природный	12 586 621	12 843 818
Мазут	7 566 084	6 636 859
Дизельное топливо	212 831	293 116
Электрическая энергия	2 941 444	2 995 492
Другое	31 387	32 829

Утилизация избыточной энергии рекуперации в виде тепла в отдельных регионах страны может полностью снять зависимость от углеродного топлива и повысить эффективность ТЭК РЖД. В общем виде работа ТНЭ представляется следующим образом: избыточная энергия рекуперации из СТЭ железных дорог постоянного или переменного тока через систему управления поступает на ТЭНы (нагревательные элементы) или индукционные нагреватели, которые преобразуют электроэнергию в тепло [3, 4, 5]. Тепло запасается в материалах с высокой теплоемкостью (твердотельные, жидкостные или фазопереходные аккумулирующие элементы). В последствии тепло распределяется по теплотрассам потребителям (в холодное время года) или тепло преобразуется обратно в электроэнергию посредством тепловых турбин.

Эффективность ТНЭ будет зависеть от формата потребления накопленной энергии: в случае обогрева помещений инфраструктуры РЖД КПД будет составлять 95–98%; в случае преобразования тепла обратно в электроэнергию КПД может составлять до 64% (при сочетании газотурбинного цикла «Брайтона» (верхний уровень) и паросилового цикла «Ренкина» (нижний уровень)).

Выводы. Использование ТНЭ в СТЭ железных дорог «холодных» регионов РФ позволит более эффективно утилизировать избыточную энергию рекуперации и повторно ее использовать для нужд теплоснабжения инфраструктуры РЖД. При этом сооружение ТНЭ и их эксплуатация значительно дешевле, чем традиционные котельные на газовом, жидком или твердом углеродном топливе, а отказ от самого углеродного топлива дает дополнительную значительную экономию по его закупке и доставке к месту использования. В функции теплоснабжения ТНЭ по сравнению с остальными накопителями отличаются простой конструкцией, малыми капитальными и эксплуатационными затратами, а также самым высоким КПД – 95–98%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годовые отчёты ОАО «РЖД» (разделы «Энергосбережение» и «Техническое развитие»), <https://sr2024.rzd.ru/ru/annexes/energy-efficiency>.
2. Оганов С. В., Фадеева А. Л. Использование теплового накопителя энергии на тяговой подстанции железной дороги постоянного тока Наукосфера. 2024. № 5–1. С. 345–349.
3. Белецкий С. В., Оганов С. В., Щеглов Р. В. Накопитель тепловой энергии для отопления помещений метрополитена // В сборнике: Перспективы развития рельсового транспорта в условиях интенсивного внедрения новых технологий, импортозамещения и параллельного импорта. Материалы V Международной выставки-конференции «ИНТЕРМЕТРО». – Москва. – 2023. – С. 7–11.

4. Oganov S. V., Kovalev K. L., Shevlyugin M. V. Experimental measurements for evaluating the efficiency of the thermal energy storage unit used at a subway traction substation to receive excessive regeneration energy // Russian Electrical Engineering. – 2024. – Т. 95. № 9. – С. 742–747.
5. Шевлюгин М. В., Оганов С. В., Ермоленко Д. В. Оценка энергоемкости теплового накопителя энергии на тяговой подстанции метрополитена для приема избыточной энергии рекуперации // Электротехника. 2025. № 9. С. 48–53.

УДК 621.311, 621.331

ПЕРЕХОД К ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ИЗОЛЯТОРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА

С. А. Блинкова, А. В. Скольский

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. Железнодорожный транспорт является незаменимым в вопросе перевозки грузов внутри страны, невозможно представить развитие крупного промышленного предприятия без участия железнодорожного транспорта [1]. Для стабильной работы транспорта необходимо поддерживать прилегающую инфраструктуру в рабочем состоянии [2]. На данный момент осмотр и диагностика состояния оборудования проводятся в соответствии с графиком. В связи с таким подходом оборудование проверяется раз в месяц или еще реже. Изоляторы контактной сети, часть которых еще была установлена при электрификации путей, выработали свой ресурс, на данный момент проводить осмотр изоляторов один раз в год недопустимо. Из-за удаленного расположения от земли и огромной протяженности электрифицированных путей осмотр изоляторов – это крайне трудоемкий процесс. Проводить осмотр из кабины машиниста или вагона лаборатории невозможно из-за высокой скорости движения.

Данную проблему предлагается решить путём модернизации средств диагностики [3–7]. Переход к стационарным средствам диагностики или замена всех изоляторов на новые, с контрольными маркерами, сигнализирующими о целостности изоляторов, являются крайне дорогостоящими вариантами. Помимо этого, такие варианты не имеют дальнейшего развития и не смогут перерасти в систему контроля всей контактной сети. Создание такой системы является одним из направлений стратегии развития железнодорожного транспорта [8, 9].

Идеальным вариантом является предиктивная диагностика с расчетом остаточного ресурса изоляторов. На данный момент очень широкое распространение получил искусственный интеллект или составляющие его нейросети. Проблемой, не позволяющей обучить и включить в работу нейросети, является отсутствие базы с повреждениями для обучения нейросети и отсутствие средств автоматизированной передачи информации о состоянии изоляторов.

Предлагается решить две проблемы разом при помощи применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для проведения осмотра изоляторов контактной сети. При осмотре проверяют число и типы изоляторов в элементах контактной сети и воздушных линий. Обращают внимание на отсутствие сколов, трещин, механических повреждений, а также следов ожогов на поверхности фарфора. Изолятор, имеющий скол или повреждение глазури площадью свыше 3 см, считается дефектным. Трещины в шапке изолятора не допускаются. Проверяют состояние стержня, степень его коррозии. Выползание или

проворачивание стержня тарельчатого изолятора не допускается. На стержневых изоляторах несовпадение продольной оси изолирующего элемента с осью шапки изолятора не допускается. На участках постоянного тока особое внимание обращают на состояние стержня тарельчатого изолятора и степень его коррозии, особенно в местностях с загрязнением атмосферы и на участках со смешанной тягой. Налет продуктов коррозии вокруг стержня изолятора в месте выхода его из цементной заделки скрывает фактический диаметр стержня. На основании этих данных принимается решение о замене изолятора или продлении срока его службы.

Функционал современных БПЛА позволяет пролететь вокруг изолятора контактной сети и осуществить видеосъемку со всех сторон изолятора. Остается незакрытым вопрос создания полетного задания или возможности внедрения машинного зрения для корректировки полета БПЛА в зоне проведения работ.

Первоначально отснятые видео станут основой обучения нейросети. Необходимо будет выделить из фрагментов начальные стадии повреждения изоляторов, собрать базу фотографий вышедших из строя изоляторов. Первый шаг потребует большого объема ручного труда и формирования базы для обучения. После обучения нейросети и накопления большой базы данных об изоляторах контактной сети, включающей, например, сведения о площади загрязнения, размере сколов и целостности покрытия, а также привязки этих данных к датам проведения измерений, показателям температуры окружающей среды, размерам грузооборота, картам осадков и т. д., появится возможность проводить анализ и выявлять закономерности в состоянии изолятора перед выходом из строя. Данный объем информации невозможно проанализировать человеку, что снова приводит к актуальности применения искусственного интеллекта в диагностировании изоляторов [10]. Предварительный алгоритм применения БПЛА представлен на рисунке 1.

Алгоритм описывает применение группы БПЛА для одновременной работы по нескольким железнодорожным путям, а также для исключения вероятности попадания БПЛА в электровагон при его приближении с помощью БПЛА «Сигналистов». Первоначально предусмотрена возможность задания на карте зоны работы БПЛА и автоматизированный просчет маршрута к месту проведения работ и маршрут каждого дрона во время проведения внешнего осмотра.

На данном этапе невозможно предсказать все проблемы, которые могут возникнуть при работе данной системы. Также остаются незакрытые вопросы, связанные с получением разрешения полетов БПЛА над железнодорожными путями, выбором оптимального типа БПЛА, информационной безопасности, психологическим влиянием шума от БПЛА на граждан, запретом на полеты дронов в городском секторе.

В перспективе данная система мониторинга сможет стать основой для перехода к предиктивной диагностике. Следует учитывать, что на данный момент БПЛА может выполнять измерение показателей, связанных с внешним осмотром, тогда как внедрение измерительных устройств на БПЛА требует следующего этапа развития беспилотных авиационных систем и в настоящее время невозможно. Таким образом, изучение данной темы остаётся перспективным направлением исследования.

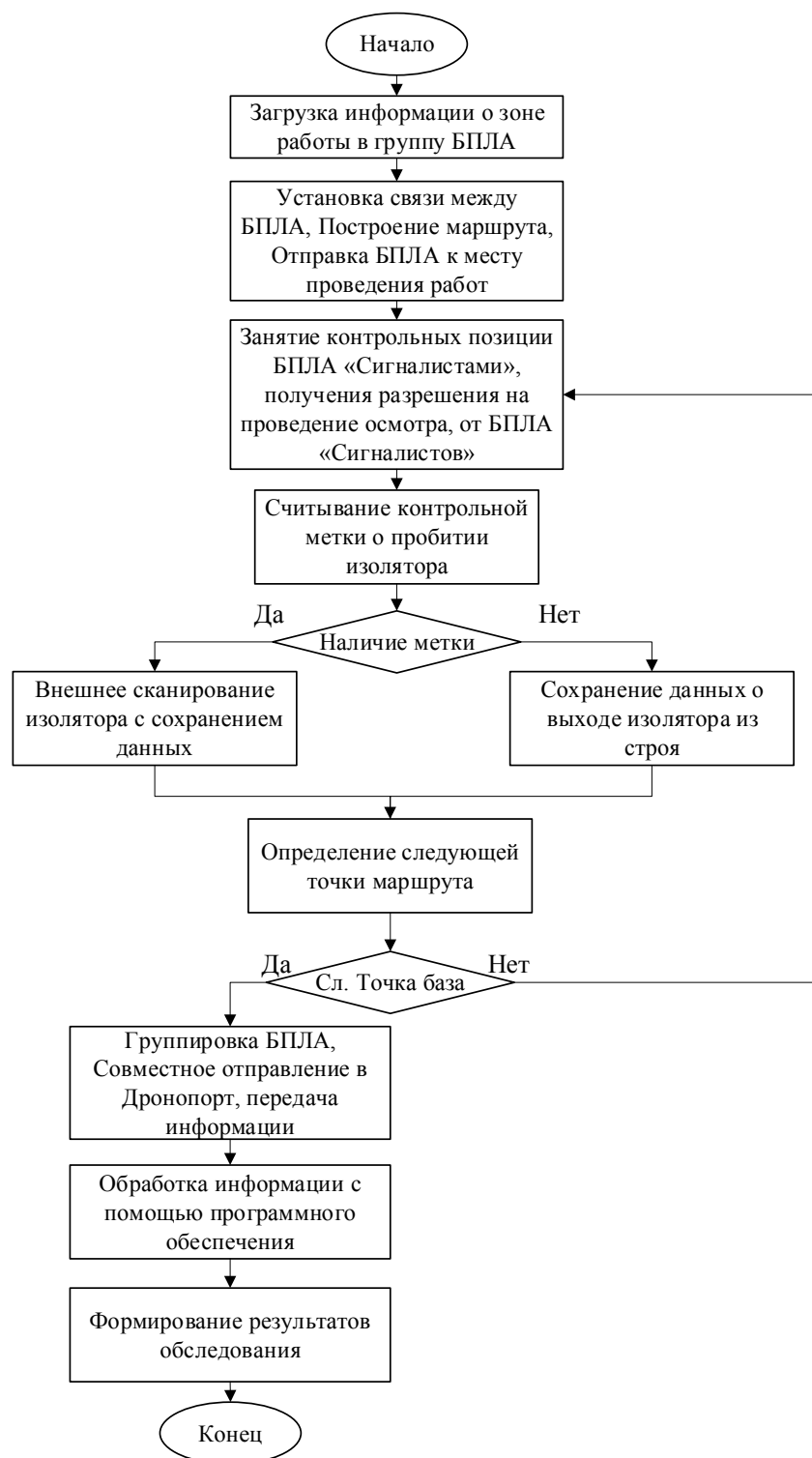


Рис. 1. Алгоритм применения БПЛА для проведения диагностики изоляторов контактной сети

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаранин, М. А. Ограничения пропускной способности железных дорог по условиям электроснабжения и их снятие / М. А. Гаранин, Е. В. Добрынин, А. Н. Потейко // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2024. – № 5(114). – С. 37–42. – EDN ZQDABL.
2. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. президентом ОАО «РЖД» 14 декабря 2016 г. № 2537р. – 77 с. – Режим доступа: <https://company.rzd.ru>.
3. Блинкова, С. А. Эволюция диагностики контактной сети / С. А. Блинкова, А. В. Скольский // Наука и образование транспорту. – 2023. – № 1. – С. 262–264. – EDN KDLTZK.

4. Блинкова, С. А. Единое информационное пространство в системе электроснабжения / С. А. Блинкова, М. А. Гаранин, А. В. Скольский // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3(99). – С. 7–12. – EDN DUTFVY.
5. Гаранин, М. А. Управление ресурсами, рисками и надежностью на объектах электроснабжения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Проблемы безопасности на транспорте : Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. В 2-х частях, Гомель, 24–25 ноября 2022 года / Под общей редакцией Ю. И. Кулаженко. Том Часть 1. – Гомель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2022. – С. 95–96. – EDN OPWGAI.
6. Гаранин, М. А. Разработка цифровой модели для управления энергетическим комплексом / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 3(75). – С. 22–27. – EDN JSYDYX.
7. Гаранин, М. А. Использование методологии управления ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла в хозяйстве электрификации и электроснабжения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Инновации в системах обеспечения движения поездов : Материалы I Международной научно-практической конференции, Самара, 19–20 мая 2016 года / Министерство транспорта Российской Федерации; Федеральное агентство железнодорожного транспорта; Самарское региональное отделение Российской академии транспорта; ФГБОУ ВО "Самарский государственный университет путей сообщения" (СамГУПС); Куйбышевская железная дорога – филиал ОАО "Российские железные дороги". – Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2016. – С. 63–67. – EDN XSUPCL.
8. Гаранин, М. А. Обновление устройств электроснабжения для организации скоростного и тяжеловесного движения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Наука и образование транспорту. – 2017. – № 1. – С. 224–226. – EDN YMHSUU.
9. Добрынин, Е. В. Цифровая линия электропередач / Е. В. Добрынин, С. А. Блинкова, А. М. Батищев, М. А. Гузитаева // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 9(250). – С. 84–88. – EDN SFYUNT.
10. Гаранин, М. А. Анализ потенциала применения сквозных цифровых технологий в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков, Т. С. Максимова // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 1(97). – С. 19–27. – EDN EHDVJT.

УДК 621.331

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ МОДЕЛИ ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО УСТРОЙСТВА ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В SimInTech

А. С. Борисенко, В. Л. Незевак

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

Одним из важнейших показателей нагрузочной способности систем тягового электроснабжения постоянного тока является уровень напряжения на токоприемнике подвижного состава. В свою очередь уровень напряжения в контактной сети определяется режимами работы и параметрами электроэнергетической системы, тяговых подстанций, контактной сети, а также схемами питания и секционирования и электротяговой нагрузкой, зависящей от множества других факторов (в частности, графика движения поездов, массы состава и др.) и формирующейся в границах межподстанционных зон [1–4]. Обеспечение напряжения в контактной сети при заданных параметрах графика движения поездов на электрифицированных участках относится к одной из актуальных задач, требующих решения в условиях роста скоростей и масс поездов.

Уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава зависит от напряжения на шинах тяговых подстанций, режимов питания межподстанционных зон, а

также применяемых устройств регулирования напряжения различного типа, располагаемых на тяговых подстанциях и постах секционирования.

При регулировании напряжения на шинах тяговых подстанций в качестве одного из мероприятий применяется установка вольтодобавочных устройств (ВДУ). Задачей ВДУ является повышение напряжения на шинах подстанции при его отклонении от заданного (опорного) уровня. ВДУ могут быть реализованы на базе шести- или двенадцатипульсовых схем выпрямления, например, как это показано на рис. 1.

В работе рассматривается разработанная имитационная модель, предназначенная для оценки эффективности работы ВДУ в границах межподстанционных зон в зависимости от параметров системы тягового электроснабжения и электротяговой нагрузки. Результаты имитационного моделирования предназначены для оценки алгоритмов регулирования ВДУ в условиях изменения режимов питания и уровня электротяговой нагрузки.

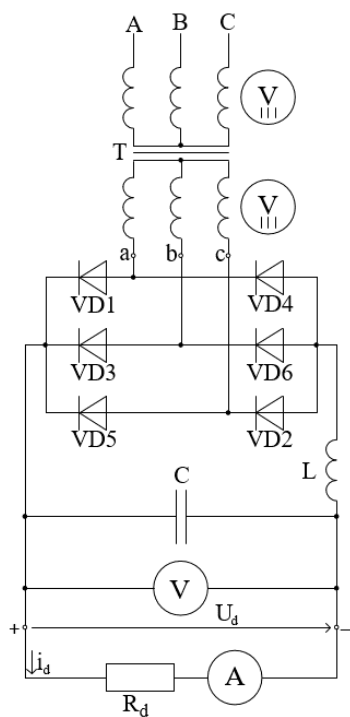
Регулирование ВДУ осуществляется с учетом согласованной работы с основным оборудованием – неуправляемыми выпрямителями подстанций. Для управления уровнем напряжения на шинах в блоке ВДУ предусмотрено тиристорное регулирование. Алгоритмы регулирования напряжения выбираются из следующих: стабилизация напряжения по опорному уровню; встречное регулирование напряжения; повышение напряжения со стабилизацией по току; стабилизация по уровню токовой нагрузки и др. Выбор алгоритмов и их настроек связан с их эффективностью в рассматриваемых условиях и проводится на основе имитационного моделирования и экспериментов. Решение задачи по выбору и оценке эффективности алгоритмов регулирования ВДУ на тяговых подстанциях относится к актуальным, направленным на повышение эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения [5, 6].

В имитационную модель ВДУ входят неуправляемые и управляемые тиристорные выпрямители на основе шести- и двенадцатипульсовых схем выпрямления в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 1. Для формирования модели ВДУ требуется включение элементов регулируемых и нерегулируемых выпрямителей.

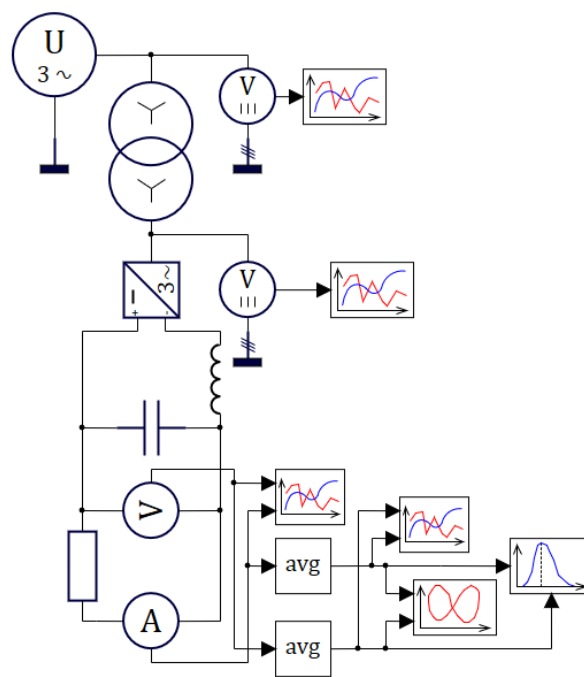
Моделирование источника питающего напряжения в программной среде SimInTech выполняется с помощью трех однофазных источников и задающего синусоидального сигнала. В силовых трансформаторах шестипульсовых мостовых преобразователей в модели преобразовательных трансформаторов используются схемы соединения обмоток «звезда – звезда» нулевой группы, двенадцатипульсовых преобразователей – «звезда – треугольник – звезда» одиннадцатой и нулевой групп (рис. 2. Векторные диаграмма для схем соединения обмоток трансформатора Y/Y-0 (а) и Y/D-Y-11-0 (б))

Аналогичным образом выполнено построение схем для шестипульсового управляемого выпрямителя и двенадцатипульсового неуправляемого и управляемого выпрямителей, схемы и модели для которых приведены на рис. 4 – 6 соответственно.

Имитационное моделирование для рассмотренных схем выпрямления позволяет получить основные энергетические характеристики, в том числе регулировочную характеристику для шести- и двенадцатипульсового управляемого выпрямителя (рис. 7).

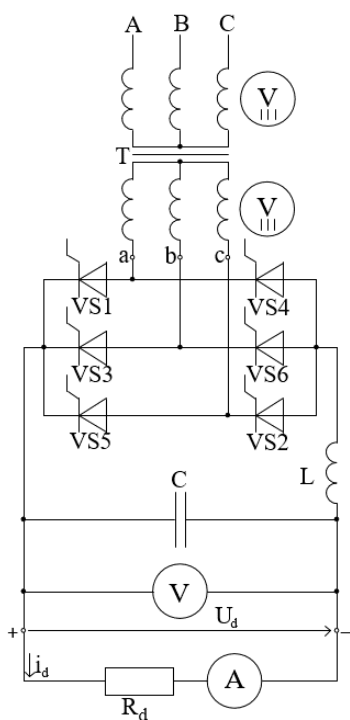


а

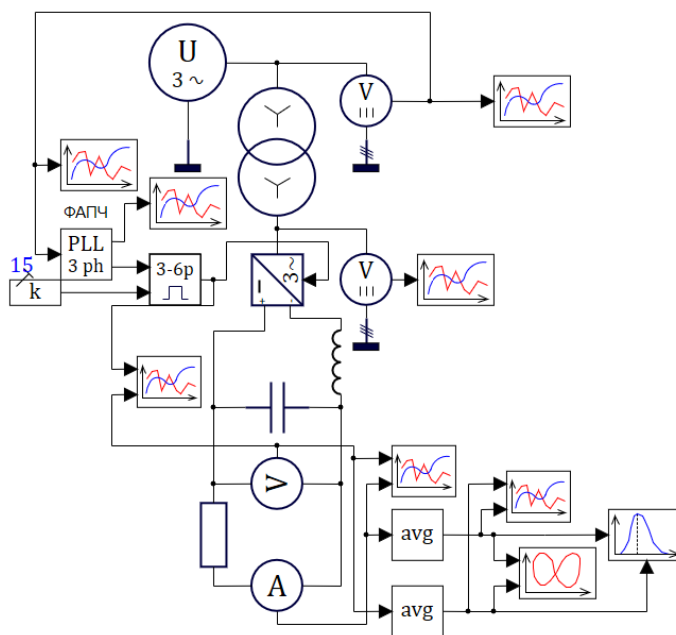


б

Рис. 3. Схема шестипульсового мостового выпрямителя (а), модель выпрямителя в среде SimInTech (б)



а



б

Рис. 4. Принципиальная шестипульсовая мостовая схема управляемого выпрямителя (а), модель выпрямителя в SimInTech (б)

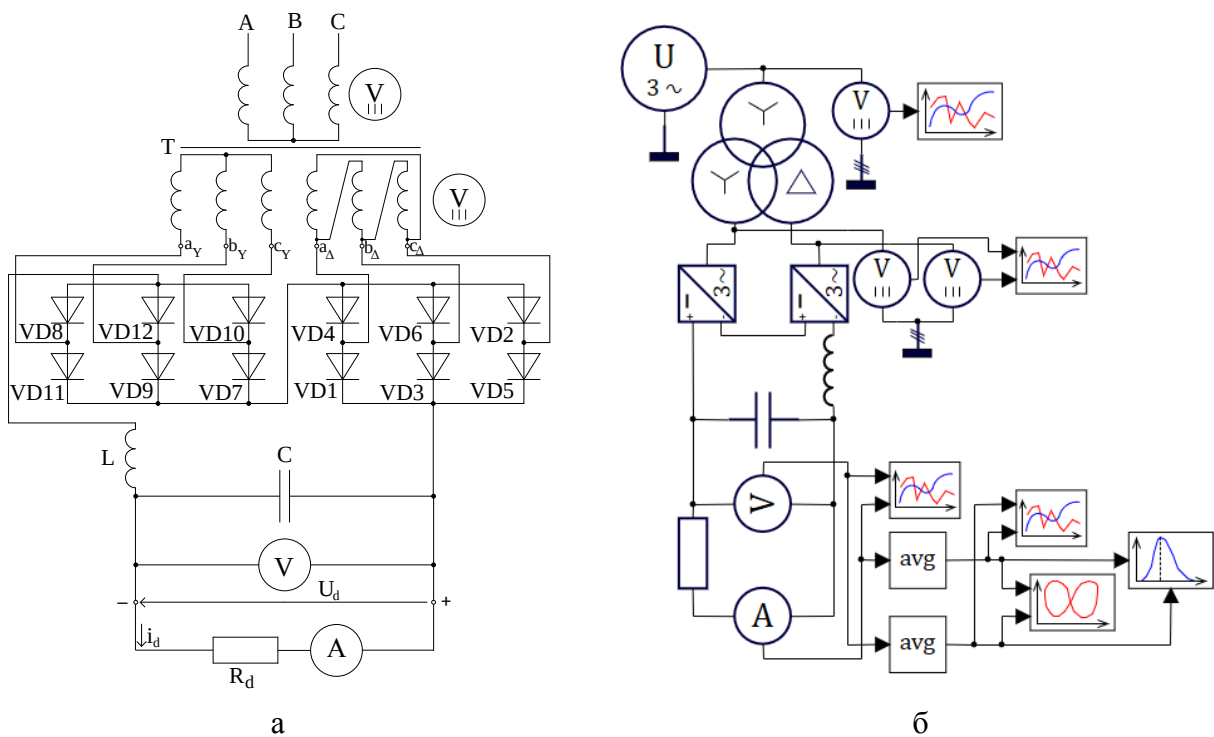


Рис. 5. Принципиальная двенадцатипульсовая мостовая схема неуправляемого двенадцатипульсового выпрямителя (а), модель выпрямителя в SimInTech (б)

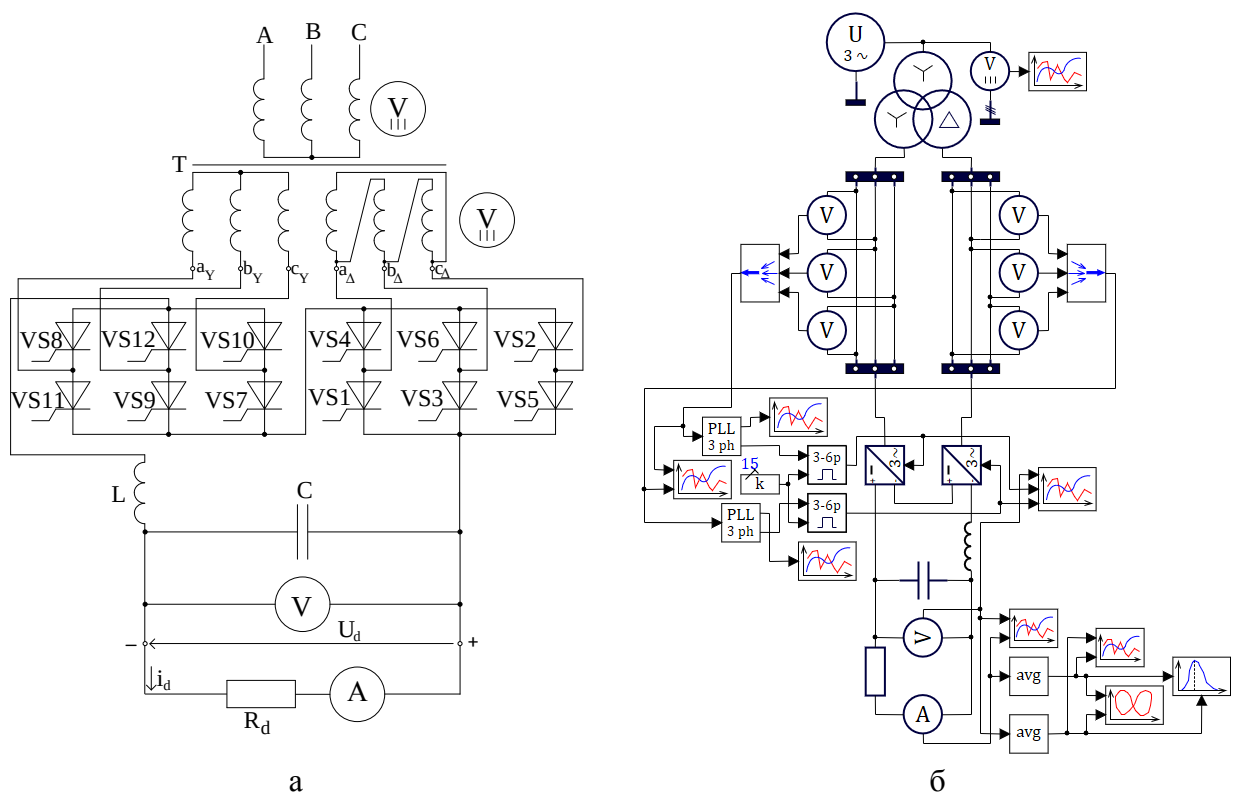


Рис. 6. Принципиальная двенадцатипульсовая мостовая схема управляемого выпрямителя (а), модель выпрямителя в SimInTech (б)

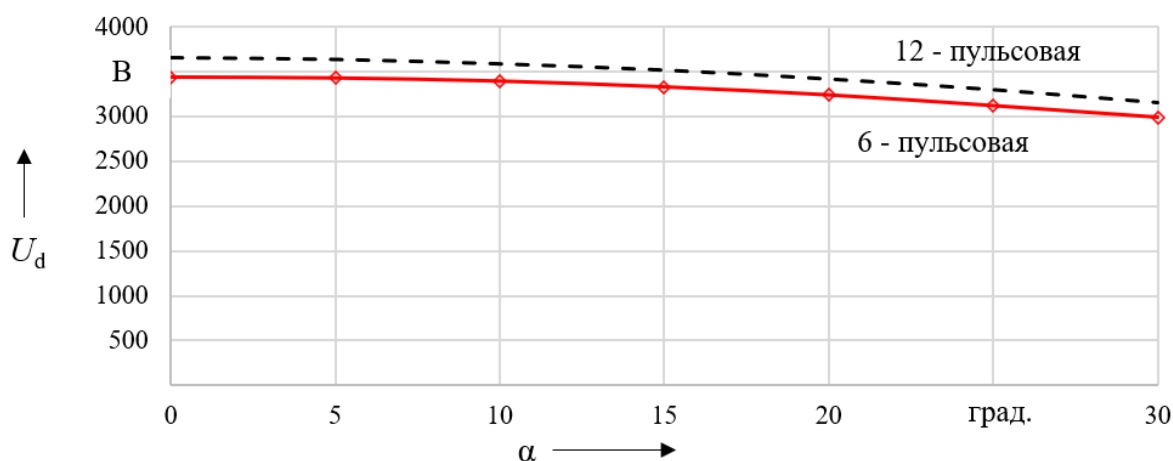


Рис. 7. Регулировочные характеристики управляемых выпрямителей

Результаты имитационного моделирования процессов в приведенных схемах выпрямления позволяют перейти к формированию модели вольтодобавочного устройства, предусматривающего последовательное включение управляемого и неуправляемого шести- и двенадцатипульсового выпрямителя соответственно.

Перспектива дальнейших исследований связана с выбором и реализацией алгоритмов регулирования для управляемых выпрямителей, оценкой их эффективности с учетом процессов коммутации в режимах выпрямления и инвертирования, качества электроэнергии, в том числе в условиях согласования работы с другими устройствами регулирования напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов, С. П. Вольтодобавочный трансформатор: компенсация недостатков в тяговой сети / С. П. Власов // Мир транспорта. – 2013. – Т. 11, № 4(48). – С. 64–70.
2. Процессы коммутации вентильных токов полупроводникового вольтодобавочного устройства / А. Н. Штин, К. Г. Шумаков, Д. В. Лесников, Л. А. Фролов // Транспорт Урала. – 2023. – № 1(76). – С. 110–115. – doi: 10.20291/1815-9400-2023-1-110-115.
3. Незевак, В. Л. Повышение качества электроэнергии на шинах собственных нужд тяговых подстанций на основе применения пассивных фильтров / В. Л. Незевак, Р. В. Павлова // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 4(112). – С. 47–56.
4. Незевак, В. Л. Моделирование процессов электропотребления на тягу при изменении параметров графика движения поездов на электрифицированных участках с III-м и IV-м типом профиля пути / В. Л. Незевак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 1(61). – С. 156–166. – doi: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).156-166.
5. Герман, Л. А. Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // Электричество. – 2014. – № 9. – С. 23–33.
6. Незевак, В. Л. Совершенствование методов и алгоритмов расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения с регулирующими устройствами / В. Л. Незевак, А. Д. Дмитриев // Известия Транссиба. – 2022. – № 3(51). – С. 19–34.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ ПО УСЛОВИЯМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

М. А. Гаранин¹, А. Н. Митрофанов¹, А. Н. Потейко²

¹ Приволжский государственный университет путей сообщения

² Молодёжная общероссийская общественная организация «Российские студенческие отряды»

В «Транспортной стратегии РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» особое внимание уделено вопросам повышения пропускной способности (ПС) на полигонах железных дорог и устранения «узких» мест ПС по условиям электроснабжения [1].

Решением вопросов по повышению пропускной и нагрузочной способности систем тягового электроснабжения в России на железных дорогах общего пользования [2] занимаются ведущие коллективы и кафедры отраслевых институтов: ВНИИЖТ НИИАС, ИЭРТ и государственных университетов путей сообщения (ГУПС) с центрами в городах Москва (РУТ – МИИТ), Санкт-Петербург (ПГУПС), Самара (ПривГУПС), Ростов-на-Дону (РГУПС), Екатеринбург (УрГУПС), Омск (ОмГУПС), Хабаровск (ДВГУПС), Иркутск (ИрГУПС) и в городах на филиалах данных вузов [3–8].

Однако оценка показателей ПС по условиям электроснабжения, как правило, была основана на проведении трудоемких процедур имитационного моделирования по выявлению на межподстанционных участках зон уровня нарушений показателей нагрузочной способности элементов СТЭ. К настоящему времени в ПривГУПС на «Электротехническом факультете» кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» сформированы научные направления, связанные с идентификацией показателей ПС и по устранению барьерных мест ПС по условиям электроснабжения [9–11]. В качестве методов при идентификации показателей ПС используются:

– новые информативные критерии по идентификации «узких мест» ПС и ликвидности энергообеспечения на участках СТЭ;

– методы предиктивной оценки ПС, основанные на построении цифровых двойников на базе идентификации с тягово-энергетическими характеристиками и процессами перевозок.

Отличительными особенностями в кафедральных исследованиях являются работа с широкой номенклатурой структур компании ОАО «РЖД», их бизнес-процессов и ключевых показателей деятельности (КПЭ), влияющих на энергообеспечение тяги поездов и пропускную способность на полигонах железных дорог (рис 1 а) [12].

В ходе исследований по данным направлениям, начиная с 2000 года сотрудниками кафедры опубликовано более десятка монографий, свыше двух сотен публикаций в российских и иностранных изданиях, получено более пятидесяти патентов и свидетельств на программные продукты. За период решения проблем направления на кафедре было задействовано пять докторов наук и более двух десятков кандидатов наук.

Структура математической цифровой модели наличной пропускной способности (НПС) по условиям электроснабжения [13] в операторной форме представляется в виде:

$$X_{\text{НС СТЭ}}^* = F_{\text{НС СТЭ}}(X_{\text{ТЦФО}}, X_{\text{ТДУД}}, X_{\text{ДТИ}}, \dots, X_{\text{ТДТ}}, X_{\text{НТЭ}}) + \xi_{\text{НС СТЭ}}, \quad (1)$$

где $X_{\text{НС СТЭ}}^*$ – модельная оценка вектора выходных показателей цифрового двойника НС СТЭ;
 $X_{\text{ТЦФО}}, X_{\text{ТДУД}}, X_{\text{ДТИ}}, \dots, X_{\text{ТДТ}}, X_{\text{НТЭ}}$ – векторы фактических выходных показателей, характеризующих деятельность структурных подразделений на филиале ОАО «РЖД», влияющих на показатели поездной работы и энергетическую нагрузку на СТЭ;
 $F_{\text{НС СТЭ}}$ – функционал взаимосвязи между выходными показателями цифрового двойника НС СТЭ и выходными показателями структурных подразделений;
 $\xi_{\text{НС СТЭ}}$ – векторы значений стохастической составляющей цифрового двойника НС СТЭ из-за неучтенных факторов.

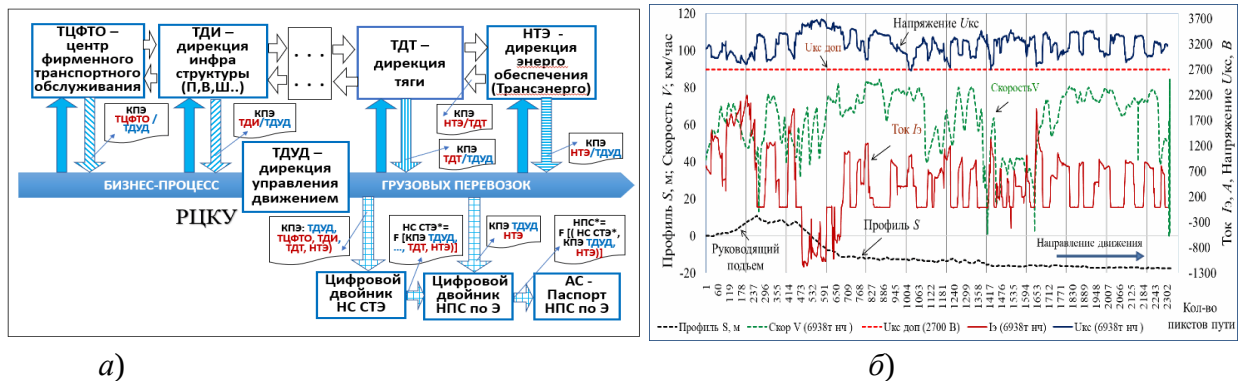


Рис. 1. Источники данных для построения цифровых двойников ПС а) структура подразделений на филиале ОАО «РЖД», б) реализации режимов работы электровоза

К критериальным показателям нарушений НС СТЭ, приводящим к ограничениям НПС, относятся уровень напряжения на токоприемниках ЭПС $U_{\text{кв}} \leq 2700 \text{ В}$; токи и мощность понижающих трансформаторов на ТП $R_{\text{ПТР}} \geq R_{\text{ПТР доп}}$; преобразовательных трансформаторов $R_{\text{ПрТР}} \geq R_{\text{ПрТР доп}}$; выпрямительных преобразователей $R_{\text{ВПр}} \geq R_{\text{ВПр доп}}$; температура нагрева токоведущих элементов контактной сети (КС) и других устройств СТЭ.

Показатели нарушений НС СТЭ формируются на основании мониторинга динамических процессов элементов СТЭ [14], например, в режимах работы электровозов – напряжения $U_{\text{кв}}$ на токоприемнике ЭПС при проследовании ими исследуемого участка с поездами дифференцированной массы (рис. 1 б) и методов их обработки (рис 2 а, б).

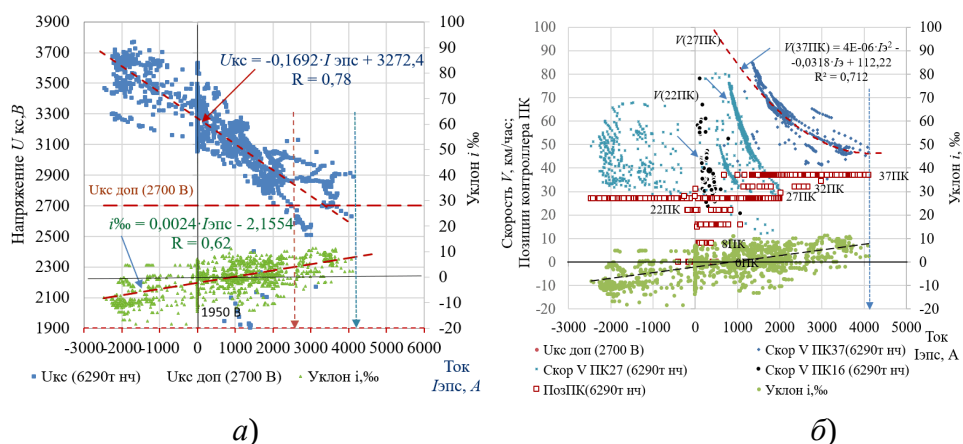


Рис. 2. Пример критериев оценки состояния энергообеспечения на участках СТЭ на базе регрессионных зависимостей характеристик: а) вольт-амперной зависимости б) скоростной характеристики электровоза

По совокупности оценки величины подъемов i , ‰ профиля пути, динамики значений реализаций ЭПС, например, токов $I_{элс}$; скорости движения V , км/час; силы тяги F_m , кН электровоза; позиции контроллера машиниста ПК, ослабление позиций ОП, используемые при управлении электровозом формируются модели нарушений движения ЭПС и ПС на участке. В качестве критериев экспресс-оценки состояния энергообеспечения на участках СТЭ предложено и используется динамический критерий ликвидности энергообеспечения Клэ расчетных участков и в общем виде определен как дифференциал $Клэ = \frac{d(U_{кс})}{d(I_{элс})}$, В/А (рис 2 а).

Критерий Клэ характеризует уровень падения напряжения ($-\Delta U_{кс}$) при приращении тока потребления ($+\Delta I_{элс}$) или степень достаточности ресурса СТЭ для пропуска поездов по критерию напряжения в КС. Так при бесконечно большом ресурсе СТЭ тренд $U_{кс} = FUI(I_{элс}) + \xi$ будет горизонтальным, начиная с уровня $U_{хх}$ и не будет зависеть от величины $I_{элс}$, коэффициент ликвидности определен как $Клэ = 0$, В/А. Наибольшее значение Клэ, определено при токах короткого замыкания и при наиболее быстром падении напряжения $U_{кс}$. При фактическом ресурсе СТЭ на кругах обращения ЭПС, значение коэффициента ликвидности Клэ, колеблется от $-0,171$ при массе поезда 6300 тонн до $Клэ = -0,083$ В/А при массе поезда 5000 тонн. Наименее энергообеспеченные участки «узкие места» характеризуются снижением $U_{кс}$ до уровня $U_{кс\text{ орг}} = 2700$ В и коэффициентом ликвидности $Кэо = -0,300$ В/А, то есть, при приращении тока $I_{элс}$ на каждые 1000А следует ожидать падение напряжения в КС на 300 В.

Дополнительную информацию о характере энергообеспечения участка получают из анализа взаимосвязи тока ЭПС и уклона пути i , ‰ при построении функционала вида $I_{элс} = FUi(i\text{ ‰}) + \xi$ ($R = 0,40 \div 0,62$), а также построения скоростной характеристики электровоза вида $V = FVI(I_{элс}) + \xi$ в функции тока электровоза $I_{элс}$ и позиций контроллера машиниста ПК.

Данная информация используется для формирования цифровых двойников $U_{кс}$, мест ограничений $U_{кс}$ и показателей ПС на базе многофакторных уравнений с включением рассмотренных эксплуатационных показателей.

В результате предварительной обработки КПЭ и эксплуатационных показателей формируется комплекс уравнений модели цифрового двойника ПС, включающий уравнения для показателей: наличная пропускная способность $N_{гр}$; потребная пропускная способность $N_{гр\text{ пот}}$; провозная способность Γ ; коэффициент заполнения пропускной способности $k_{зап\text{ гр}}$, методами, либо идентификации, либо нейросетевого моделирования. В результате исследований на базе нейросетевого моделирования, был получен комплекс моделей показателей ПС, пригодных для получения оценок ПС исключая процедуры имитационного моделирования.

В каждом из уравнений комплекса используются характеристики расчетного участка пути, СТЭ при вариации типов электровозов, секций электровозов и 15-ти других эксплуатационных показателей. Пример формата одного из уравнений цифрового двойника для электровоза типа ЭС6 «Синара» с составом из 15 переменных, совместно с коэффициентами уравнения для ПС в грузовом движении $N_{гр}$ имеет вид выражения (6):

Структура уравнения пропускной способности для грузового движения имеет вид:

$$\begin{aligned} N_{гр} = & 136,20 - 6,64 \cdot M + 1,95 \cdot S + 0,15 \cdot V - 1,06 \cdot L_{ТП} - 2,52 \cdot i - 0,13 \cdot L_{укл} - \\ & - 1 \cdot N_{ПС} + 3,25 \cdot PPS + 0,014 \cdot (S_{кс\text{ нч}} + S_{кс\text{ чт}}) + 0,0023 \cdot (S_{ф1} + S_{ф2}) + 0,16 \cdot (S_{тп1} + \\ & + S_{тп2}) + 0,26 \cdot (N_{отс2} + N_{отс2}) + 2,48 \cdot (B_{тп1} + B_{тп2}) + 12,80 \cdot U_{хх} + 4,80 \cdot U_{кс} \end{aligned} \quad (2)$$

На рисунке 3 представлена таблица с расшифровкой состава переменных уравнения (2) и коэффициенты многофакторных уравнений для показателей $N_{гр}$ и коэффициента заполнения пропускной способности $k_{зап\ гр}$ в грузовом движении для электровозов семейства ВЛ10У, ЭС6 «Синара», ЭС10 «Гранит».

Виды характеристик пропуска поездов			Наличная пропускная способность $N_{гр}$				Коэффициент заполнения пропускной способности $k_{зап гр}$			
№	Переменные цифровых двойников	Обозначение	Коэффициенты	ВЛ10 У	ЭС6 «Синара»	ЭС10 «Гранит»	Коэффициенты	ВЛ10У «Синара»	ЭС6 «Гранит»	ЭС10 «Гранит»
0	Исходная пропускная способность	$N_{гр 0}$	a_0	142,5	136,2	126	b_0	0,6	0,63	0,66
1	Масса грузового поезда, тыс тонн. Диапазон (4-10)	M	a_1	-5,82	-6,64	-8,24	b_1	0,021	0,024	0,031
2	Количество секций электровоза, ед. Диапазон (1-6)	S	a_2	1,62	1,95	2,58	b_2	-0,005	-0,007	-0,01
3	Скорость движения (начальный разгон), км/ч. Диапазон (5-100)	V	a_3	0,12	0,15	0,22	b_3	-4E-05	-0,0005	-0,0008
4	Длина межподстанционной зоны, км. Диапазон (5-25)	$L_{пз}$	a_4	-0,88	-1,06	-1,45	b_4	0,0028	0,0035	0,0051
5	Руководящий подъем (уклон), ‰. Диапазон (10-20)	i	a_5	-2,04	-2,52	-3,48	b_5	0,008	0,01	0,014
6	Длина руководящего подъема (уклона), км. Диапазон (1-15)	$L_{укл}$	a_6	-0,1	-0,13	-0,19	b_6	0,0004	0,0005	0,0008
7	Количество пассажирских поездов, ед. Диапазон (0-40)	$N_{пс}$	a_7	-1	-1	-1	b_7	0,002	0,002	0,002
8	Количество пунктов параллельного соединения, ед. Диапазон (0-3)	PPS	a_8	2,84	3,25	4,22	b_8	-0,01	-0,012	-0,017
9	Сечение подвески неч. и четн. путей, мм². Диапазон (320-875) + (320-875)	$S_{кв}$	a_9	0,012	0,014	0,019	b_9	-4E-05	-0,00005	-0,00007
10	Сечение питающих фидеров нечетного/четного путей, мм²	$S_{ф}$	a_{10}	0,002	0,0023	0,0032	b_{10}	-1E-05	-0,00002	-0,00002
11	Мощность тяговых трансформаторов ТП1/ТП2, МВА. Диапазон (6-64)	$S_{ТП}$	a_{11}	0,14	0,16	0,22	b_{11}	-5E-04	-0,0006	-0,0008
12	Эквивалентное число отсасывающих фидеров А185, ед. Диапазон (4-12)	$N_{отс}$	a_{12}	0,22	0,26	0,35	b_{12}	-8E-04	-0,0009	-0,0013
13	Тип выпрямителя ТП1 / ТП2, бинарный код (0) - 6-пульс, (1) - 12-пульс	$B_{тп}$	a_{13}	2,15	2,48	3,42	b_{13}	-0,008	-0,009	-0,013
14	Напряжение холостого хода ТП Диапазон (3,0 – 3,8)	$U_{хх}$	a_{14}	11,2	12,8	16,5	b_{14}	-0,04	-0,046	-0,062
15	Напряжение на токоприемнике ЭПС, кВ Диапазон (1,0 - 3,8),	$U_{кв}$	a_{15}	4,15	4,8	6,3	b_{15}	-0,015	-0,018	-0,024

Рис. 3. Пример таблицы параметров и коэффициентов моделей цифровых двойников для оценки значений $N_{гр}$ и коэффициента заполнения пропускной способности грузовых поездов

Произведен и представлен на рис. 4 а, б анализ динамики показателей ПС: наличной ПС, ПС в грузовом движении, потребной ПС, коэффициентов заполнения пропускной способности $k_{зап\ гр}$, в функции массы поездов. Подобные графики могут оцениваться в условиях вариации и в функции всех 15-ти эксплуатационных показателей.

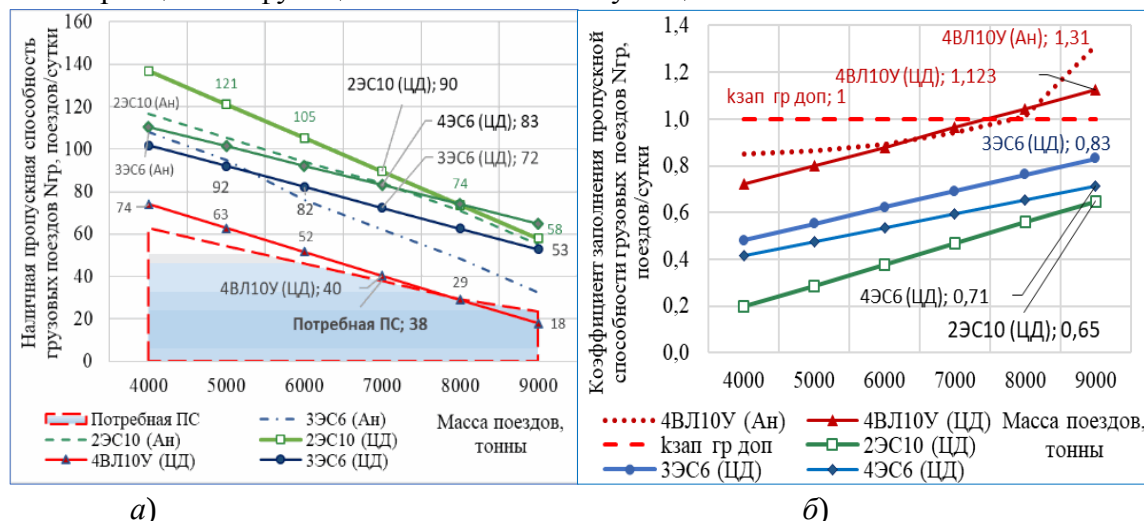


Рис. 4. Пример построения результатов показателей ПС для электровозов различных типов в функции массы поездов: а) аналитическая и цифровая ПС в грузовом движении; б) коэффициенты заполнения ПС $k_{зап\ гр}$; в) коэффициенты использования нагрузочной способности СТЭ

Выводы. Результаты разработанного способа идентификации показателей ПС имеют большое практическое значение. Так, из результатов оценки ПС (рис 4 а) на исследуемом участке с руководящим уклоном 9,5‰ вытекает, что использование электровоза типа 4ВЛ10 У, при унифицированной массе поездов 7100 т (40 поезда/сут) находится на пределе потребной ПС (38 поезда/сут) и становится невозможным при массе поездов выше 7500 т. Вождение поездов на данном участке возможно посредством ЭПС других типов: ЭС6

«Синара» в трёхсекционном исполнении (72 поезда/сут) и в четырёхсекционном исполнении (83 поезда/сут). Лидером в обеспечении пропускной способности является двухсекционный электровоз 2ЭС10 «Гранит» (90 поезда/сут).

Установлена ранее мало отмечаемая необходимость в сбалансированности мощностных характеристик СТЭ и ЭПС при формировании и оценке ПС. Так, в связи с недостаточным ресурсом СТЭ на участке для сверхтяжелых поездов (9000 т) для мощного электровоза 2ЭС10 «Гранит» может наблюдаться снижение ПС до 55 поезда/сут и становиться сопоставимой с ПС, обеспечиваемой менее мощными электровозами 3ЭС6 «Синара» (53 поезда/сут), 4ЭС6 «Синара» (58 поезда/сут) [15].

Расчетами установлено, что при рассматриваемом уровне сбалансированности характеристик СТЭ и ЭПС коэффициент заполнения пропускной способности $k_{\text{зап гр}}$ выходит за границу допустимых значений $k_{\text{зап гр доп}} = 1$ только для электровоза типа 4ВЛ10 У. Для электровозов типа 3ЭС6 «Синара», 4ЭС6 «Синара», 2ЭС10 «Гранит» значения $k_{\text{зап гр}}$ не превышают рекомендуемый уровень $k_{\text{зап гр}} = 0,85$ (рис. 46).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.
2. Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» утвержденная Распоряжением ОАО «РЖД» 4 марта 2022 г. № 545/р.
3. Марский, В. Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения / В. Е. Марский // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 1. – С. 40–46. – EDN TOLGXL.
4. Марский, В. Е. Расчет пропускной способности электрифицированных железных дорог / В. Е. Марский // Свидетельство Роспатента РФ № 2008615261 от 31.10.2008 г. о государственной регистрации программы для ЭВМ. с. 1.
5. Косарев, А. Б. Определение пропускной способности и моделирование режимов работы систем тягового электроснабжения / А. Б. Косарев, Р. А. Рудашевский, А. В. Рудашевская [и др.] // Наука и образование транспорта. – 2021. – № 2. – С. 21–26.
6. Митрофанов, А. Н. Усиление системы тягового электроснабжения при проведении поездов повышенной массы и длины: [монография] / А. Н. Митрофанов, М. А. Гаранин, Е. В. Добрынин, И. А. Крестовников. – Самара: СамГАПС, 2006. – 156 с.
7. Гаранин М. А., Потейко А. Н., Митрофанов А. Н. Анализ показателей пропускной способности на полигонах железных дорог по условиям электроснабжения. Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 3 (111). С. 113–122.
8. Гаранин М. А., Потейко А. Н., Митрофанов А. Н. Анализ качества мониторинга показателей пропускной способности железных дорог. Наука и образование транспорту. 2025. № 1. С. 333–336.
9. Гаранин, М. А. Совершенствование расчета наличной пропускной способности железных дорог постоянного тока по условиям электроснабжения : специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гаранин Максим Алексеевич. – Самара, 2004. – 24 с. – EDN NHVBFH.
10. Митрофанов, А. Н. Динамическая оценка пропускной способности участков железных дорог по условиям электроснабжения / А. Н. Митрофанов, М. А. Гаранин // Актуальные проблемы развития транспортных систем Российской Федерации : Сборник научных трудов с международным участием / Самарский региональный центр Российской академии транспорта; Самарская государственная академия путей сообщения. Том Часть 2. – Самара : Самарский государственный университет путей сообщения, 2004. – С. 89–95. – EDN ZJVCME.
11. Гаранин, М. А. Методика и программный комплекс для расчета наличной пропускной способности участков железных дорог постоянного тока по условиям электроснабжения / М. А. Гаранин, А. Н. Митрофанов // Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте : Тезисы докладов Третьего Международного симпозиума Eltrans'2005, Санкт-Петербург, 15–17 ноября 2005 года / Редакционная коллегия: д.т.н. В. В. Сапожников,

- д.т.н. А. Т. Бурков, д.т.н. А. В. Плакс, начальник службы технической политики Октябрьской ж.д. В. Н. Егоров. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2005. – С. 45–46. – EDN WHQAAJ.
12. Блинкова, С. А. Повышение эффективности тягового электроснабжения за счет применения высокотехнологичных накопителей энергии / С. А. Блинкова, О. Н. Козменков // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 2(98). – С. 7–10. – EDN FMFNQZ.
13. Блинкова, С. А. Единое информационное пространство в системе электроснабжения / С. А. Блинкова, М. А. Гаранин, А. В. Скольский // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 3(99). – С. 7–12. – EDN DUTFVY.
14. Гаранин, М. А. Использование данных о токовых нагрузках фидеров контактной сети для проверки адекватности модели системы тягового электроснабжения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2(50). – С. 7–12. – EDN QAGBGZ.
15. Загорский, В. А. Оценка расчетных моделей системы тягового электроснабжения / В. А. Загорский, Е. В. Добрынин, О. В. Табаков // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 1(55). – С. 34–38. – EDN VRCMAH.

УДК 621.311

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕГАЗА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В ЭЛЕГАЗОВОМ ОБОРУДОВАНИИ

А. Д. Зарубин, Д. В. Игнатко, К. Р. Зеленский, Р. О. Черемных, Л. Л. Буитрон Карпио
Иркутский государственный университет путей сообщения

Введение. В настоящее время элегазовое оборудование в зарубежных электрических сетях отдельных стран применяется более чем активно. Например, во Франции элегазовая техника составляет практически 90% высоковольтного оборудования, в Германии – до 50%. В энергосистемах России также высок процент использования элегазовых выключателей, трансформаторов тока и напряжения и даже элегазовых распределительных устройств – от 20 до 40%. Такая ситуация объясняется высокой надежностью данного вида оборудования, низкими эксплуатационными затратами, его пожаро- и взрывобезопасностью [1–2].

Однако в процессе эксплуатации, особенно в элегазовых выключателях, в силу процесса горения дуги, возникающей при отключениях, когда температура нагрева элегаза явно превышает +500 °С (температура, при которой происходит частичное разложение элегаза), в элегазе образуются примеси, наличие которых ухудшает его электроизоляционные и дугогасящие свойства [3–6]. Кроме того, с течением длительного времени эксплуатации неизбежно происходит втягивание влаги из окружающего воздуха, что также отрицательно влияет на свойства элегаза. К таким негативным примесям относятся: фтороводород, диоксид серы, низшие фториды серы, тетрафторметан, фториды металлов, азот, кислород, вода. Также следует отметить, что из-за образования фторидов металлов появляется риск травмирования обслуживающего персонала при разборе оборудования.

Согласно ГОСТ Р 54426-2011 [4] допускается следующее содержание примесей в элегазе:

- воздух и/или CF₄ (тетрафторметан): до 3 % объема;
- вода (влажность): не более 25–95 мг/кг (зависит от номинального рабочего давления аппарата);

- минеральное масло: не более 20 мг/кг;
- кислотосодержащие продукты разложения (в пересчете на $\text{SO}_2 + \text{SOF}_2$: не более 12 мл/л, или общий объем продуктов распада – не более 50 мл/л;
- фтороводород HF: не более 25 мл/л.

При дуговых разрядах в элегазе образуются токсичные газы. Их содержание жестко регламентируется:

- $\text{SO}_2 + \text{SOF}_2$ (суммарно): ≤ 12 мл/л;
- HF (фтористый водород): ≤ 25 мл/л.

Превышение этих значений указывает на серьезную аварию и требует дегазации оборудования.

В настоящее время операции проверки чистоты элегаза, наличия и концентрации примесей, влагосодержания осуществляются отдельными приборами диагностики. Например, концентрация примесей выявляется приборами DILO 3-027-R002, WIKA GA10; влагосодержание – WIKA GA20, GA40, DILO 3-037; продукты распада – портативным DILO 3-032-R. Использование данных приборов диагностики по отдельности требует увеличенного времени на ее осуществление, дополнительной квалификации обслуживающего персонала по освоению технологии пользования данными приборами и по достоверному анализу полученных результатов. Актуальным является поиск комплексных приборов диагностики элегаза.

Методы решения задачи. Анализ информации по выпускаемым отечественной и зарубежной промышленностью диагностическим приборам для контроля состояния элегаза позволил рекомендовать к использованию такие марки приборов, как:

- АКЭ-3102 (Россия, "Феррома") – измеряет чистоту SF_6 , влажность и продукты распада (SO_2 , H_2S , CO, HF). Работает с чистыми смесями и SF_6/CF_4 ;
- DILO 3-038R-R... (Германия, DILO) – в зависимости от модификации (R201, R302, R602 и др.) определяет до 6 параметров. Главная особенность – система рециркуляции, не выпускающая газ в атмосферу;
- мультигазоанализатор Rapidox SF6 6100 Pump Back (Великобритания, Cambridge Sensotec Limited) – способен за одну пробу проводить сразу 3 испытания, такие как влагосодержание, концентрации и наличие примесей, а после полученного результата возвращает пробу обратно в бак, с помощью рециркуляции.

Наиболее полный набор функций по контролю состояния элегаза позволяет выполнить прибор Rapidox SF6 6100 Pump Back (рис. 1). Он внесен в Росреестр, имеется в свободном доступе на российском рынке. Поэтому может быть рекомендован к применению при диагностическом обследовании элегазовых аппаратов, имеющих в российских электрических сетях с целью существенного сокращения времени, затрачиваемого на диагностику, и наиболее полноценного контроля состояния элегаза [7].



Рис. 1. Прибор Rapidox SF6 6100 Pump Back

Разработка программного обеспечения для анализа состояния элегаза. Для автоматизации обработки результатов диагностики элегазового оборудования и повышения достоверности оценки его технического состояния авторами разработано специализированное программное обеспечение «Oracle». Приложение предназначено, в частности, для оперативного анализа параметров элегаза в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54426-2011. ПО реализовано на языке Python с использованием библиотеки Tkinter для графического интерфейса. Приложение содержит модуль «Элегаз» – модуль проверки качества элегаза по нормируемым показателям (рис. 2).

Рис. 2. Модуль «Элегаз»

В этом модуле пользователь вводит измеренные значения таких параметров, как:

- чистота SF_6 , %;
- влажностное содержание H_2O , ppm;
- абсолютное давление, кПа;
- содержание минерального масла, мг/кг;
- концентрация SO_2 , ppm;
- концентрация SOF_2 , ppm;
- концентрация CF_4 , ppm.

Программа после ввода значений автоматически анализирует следующее:

- проверяет чистоту элегаза (норма $\geq 97\%$);
- вычисляет допустимый уровень влажности с пересчётом из мг/кг в ppm (коэффициент 8,1) в зависимости от давления (≤ 200 кПа – 95 мг/кг, > 200 кПа – 25 мг/кг);
- сравнивает содержание масла с нормативом (≤ 10 мг/кг);
- оценивает концентрации продуктов разложения ($\text{SO}_2 \leq 10$ ppm, $\text{SOF}_2 \leq 10$ ppm, $\text{CF}_4 \leq 3$ ppm).

По каждому параметру выводится заключение («Ок» или «ПРЕВЫШЕН»), а в итоге формируется общий вердикт о соответствии или несоответствии элегаза нормам. Результаты отображаются в текстовом поле и могут быть сохранены для формирования протокола.

Выводы. Предложения по применению мультигазоанализатора в процессе диагностического обследования элегазового оборудования позволяют сократить

эксплуатационные расходы, повысить качество диагностики, предотвратить возможный выход из строя данного вида дорогостоящего оборудования. Программное обеспечение по обработке результатов контроля состояния элегаза исключает ручные расчёты и автоматизирует сравнение с нормативами; минимизирует ошибки при интерпретации данных; позволяет представить результаты в структурированном виде, пригодном для включения в техническую документацию.

Таким образом, приведенные технические решения обеспечивают при их внедрении повышение эффективности проведения диагностического обследования элегазового оборудования, что соответствует требованиям энергетического менеджмента [8], который нацелен, в частности, на сокращение всех видов эксплуатационных расходов на энергетических предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацаринная, Ю. Н. Элегаз и его применение в электроэнергетике / Ю. Н. Зацаринная, М. Ф. Габбасов, А. П. Зорин // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 6. – С. 137–139. – EDN: SBNGQP.
2. Пузина Е. Ю. Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровой тяговой подстанции / Е. Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 92–104. – EDN: RIXUQT.
3. Манаенков, А. А. Методы диагностирования электрооборудования / А. А. Манаенков, Д. В. Гурьянов, А. В. Чувилкин, А. А. Найденов // Наука и образование. – 2021. – Т. 4. – № 2. – С. 106–112. – EDN: ZRRREM.
4. ГОСТ Р 54426-2011 (МЭК 60480:2004). Руководство по проверке и обработке элегаза, взятого из электрооборудования, и технические требования к его повторному использованию.
5. СТО 34.01-23-005-2019. Методические указания по диагностированию элегазового оборудования.
6. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытания электрооборудования. Утверждён распоряжением ПАО «Россети» от 29.05.2017 № 280р.
7. Игнатко, Д. В. Предложения по сокращению времени на диагностику элегазового оборудования / Д. В. Игнатко, К. Р. Зеленский, Л. Л. Буитрон Карпио // Образование – наука – производство: материалы IX Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции. Чита. 2025. С. 206–210. – EDN: CEPMM.
8. Горбунова, В. С. Эффективность внедрения энергетического менеджмента в промышленных компаниях России / В. С. Горбунова, Е. Ю. Пузина // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 119–137. – EDN: XNZJUL.

УДК 620.92

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГИБРИДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ РФ

Н. С. Козлова, К. А. Филиппов, Н. А. Понырко

Приволжский государственный университет путей сообщения

В современном мире наблюдается тенденция перехода от классической генерации электроэнергии к так называемой зелёной энергии. Инфраструктура российских железных дорог аналогично подвержена данному направлению развития. Переход к низкоуглеродной энергетике, а также необходимость повышения автономности удалённых объектов, ставят перед ОАО «РЖД» задачу поиска альтернатив, в первую очередь, для не электрифицированных и мало обслуживаемых участков. Классические солнечные панели,

применяемые в данный момент на вокзалах и административных зданиях [1], не решают проблему электроснабжения в ночные часы и в пасмурные дни.

Одним из наиболее перспективных способов решения данной проблемы может стать использование так называемых гибридных солнечных модулей, а также высокотемпературных гибридных солнечных модулей, совмещающих выработку электроэнергии с нагревом теплового аккумулятора (например, на основе сплавов Fe-Si-B или расплавленных солей) [2].

Как было отмечено выше развитие солнечных модулей происходит в различных направлениях. Поэтому немаловажно показать различия между направлениями исследований и отметить, на какой стадии развития они находятся [3–5]. Информация по солнечным модулям представлена в таблице 1.

Исходя из представленной информации можно сделать несколько выводов:

В краткосрочной перспективе целесообразно использование гибридных PVT-панелей в связи с их доступностью для коммерческого рынка. Однако такие панели лишь позволят снизить траты электроэнергии на отопление и горячее водоснабжение, оставив проблему инфраструктуры, которая может быть размещена на удалении от ближайших кабельных линий и линий электропередач.

В долгосрочной перспективе наиболее эффективным и технологичным решением будет применение высокотемпературных интегральных батарей. Такие батареи позволят не только вырабатывать чистую электроэнергию в ясные дни, но и запасать её в виде тепла для дальнейшей переработки тепловой энергии в электрическую.

Однако, понимая масштабы страны и погодные условия, можно сделать вывод о недостаточности применения только солнечных панелей. Требуется также система запаса электроэнергии в условиях длительного дефицита солнечной энергии.

Таблица 1

Сравнение различных технологий гибридных панелей

Технология	Принцип работы	Основные показатели	Стадия развития
Гибридные PVT-панели	Одновременная генерация электроэнергии и нагрев теплоносителя для теплоснабжения	Электрическая мощность: до 580 Вт; Тепловая мощность: до 1180 Вт; КПД ячеек: до 22,5%	Коммерчески доступные решения (выпускаются серийно)
Системы с РСМ-накопителями	Концентрация солнечного света для плавления теплового аккумулятора; энергия отдается в виде тепла или электроэнергии	Термальный КПД: до 97%; Электрический КПД ТЕГ: до 4,3%; Емкость хранения: 2–7,2 кВт·ч/м ² в сутки	На стадии пилотных проектов и прототипов
Высокотемпературные интегральные батареи	Нагрев расплава (Fe-Si-B) до 1157 °C; преобразование теплового излучения в электричество через TPV-элементы	Плотность хранения: >1000 кВт·ч/м ³ ; Время хранения: >24 часов; Круговой КПД: 23–25%	На стадии пилотных проектов и прототипов

Наиболее уязвимыми в этом отношении являются объекты железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, расположенные на малообслуживаемых перегонах в

регионах с низкой среднегодовой инсоляцией и продолжительными периодами полярной ночи или затяжной облачности. Расчёты показывают, что для постов секционирования, шкафов СЦБ и базовых станций технологической радиосвязи длительность автономной работы при полном отсутствии солнечного притока должна достигать 5–10 суток, а в условиях Крайнего Севера – до нескольких недель. Гибридные PVT-панели и высокотемпературные интегральные батареи сами по себе способны перекрыть суточный и, в случае расплавов, до 24–48 часов дисбаланса, однако для более продолжительных интервалов требуется комбинирование с другими возобновляемыми источниками либо с дополнительными накопителями [6].

В качестве первой ступени резервирования целесообразно использовать аккумуляторные батареи на основе литий-железо-фосфатных (LiFePO_4) элементов. Они отличаются высокой циклической стойкостью (более 6000 циклов при глубине разряда 80 %) и приемлемыми удельными показателями стоимости хранения – до 250–300 \$/кВт·ч [7]. Для типового объекта с суточным потреблением 8–15 кВт·ч ёмкость накопителя в 50–80 кВт·ч позволяет обеспечить работу в течение трёх-пяти пасмурных дней без критического снижения надёжности.

Пилотное внедрение описанных гибридных систем требует разработки типовых схемных решений, адаптированных к климатическому районированию ОАО «РЖД». Для южных и центральных регионов достаточным может быть сочетание PVT-панелей и литиевых накопителей. Для Урала, Сибири и Дальнего Востока следует предусматривать модули высокотемпературного хранения на основе сплавов Fe-Si-B с возможностью отбора тепла на обогрев стрелочных переводов и помещений, а также установку резервного ветрогенератора. Для зоны БАМа и арктических участков концепция должна дополняться водородными накопителями либо термоэлектрическими генераторами, утилизирующими сбросное тепло расплавов в безветренные и бессолнечные периоды.

Экономическая эффективность подобных решений оценивается через снижение совокупной стоимости владения (ТСО) за жизненный цикл 20–25 лет. Предварительные расчёты показывают, что при текущих тарифах на технологическое присоединение и дизельное топливо гибридный солнечно-ветровой комплекс с тепловым аккумулятором окупается за 7–10 лет на объектах мощностью до 10 кВт, расположенных далее 15 км от ближайшей ЛЭП. С учётом планируемого роста платы за выбросы парниковых газов и введения «углеродного налога» в трансграничных перевозках, переход на автономные гибридные системы становится не только технической, но и стратегической необходимостью для устойчивого развития железнодорожной инфраструктуры Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибридная солнечная электростанция на ж/д вокзале Анапы // HEVEL ENRGY GROUP –URL: <https://www.hevelsolar.com/kz/projects/gibridnaya-solnechnaya-elektrostantsiya-na-zh-d-vokzale-anapy/>
2. Ferro-alloys as high temperature phase change materials // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials – 2025 – URL: <https://journal.hep.com.cn/ijommam/EN/10.1007/s12613-025-3187-6>
3. BTESolar запускает революционные гибридные фотоэлектрические панели // BTE Solar – 2026 – 8 мая – URL: <https://ru.btesolar.com/blog/btesolar-launches.html>
4. High-Performance solar energy conversion and storage system // ScienceDirect – 2026 – январь – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X25009351?via%3Dihub>
5. Новая солнечная батарея обеспечит круглосуточную генерацию и длительное хранение энергии // Глобальная энергия – 2025 – 4 декабря – URL: <https://globalenergyprize.org/ru/2025/12/04/novaja-solnechnaja-batareja-obespechit-kruglosutochnuju-generaciju-i-dlitelnoe-hranenie-jenerгии/>

6. Обзор применения солнечной энергетики на железнодорожном транспорте // СЦБИСТ – 2023 – январь – URL: <https://scbist.com/xx2/55696-01-2023-obzor-primeneniya-solnechnoi-energetiki-na-zheleznodorozhnom-transporte.html>
7. Turning extreme heat into large-scale energy storage // Climate Portal – 2026 – 18 марта – URL: <https://climate.mit.edu/posts/turning-extreme-heat-large-scale-energy-storage>

УДК 331.45:004.9

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА, СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ И СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ В ХОЗЯЙСТВЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ RFID-ТЕХНОЛОГИЙ

О. Н. Козменков, Ю. Н. Фёдорова

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. С 1 января 2025 года предприятия и организации обязаны выдавать СИЗ в соответствии с Едиными типовыми нормами, утверждёнными Приказом Минтруда России от 29.10.2021 № 767н [4]. Новый порядок требует не формального выполнения нормативных требований, а системного подхода к контролю на каждом этапе – от анализа профессиональных рисков до своевременной замены изношенных изделий. В хозяйстве электрификации и электроснабжения железнодорожного транспорта учёт спецодежды и СИЗ ведётся вручную, а отсутствие или ненадлежащее состояние СИЗ оказывает значительное влияние на уровень производственного травматизма [9].

Существующие программные продукты (1С:ЗУП КОРП, БИТ.СИЗ) автоматизируют планирование, но не имеют аппаратной составляющей для контроля фактического состояния спецодежды [5, 7]. Цель работы – разработка алгоритма автоматизированной системы контроля жизненного цикла (АС КЖЦОС) на базе RFID-технологий и экономическое обоснование применения программно-аппаратного комплекса для сквозного контроля жизненного цикла СИЗ на железнодорожном транспорте [11].

1. Анализ текущего состояния обеспечения СИЗ в Куйбышевской железной дороге

В ходе работы проведён анализ затрат на спецодежду и СИЗ в хозяйстве электрификации и электроснабжения. Анализ комплектации для лета и зимы показывает, что годовые затраты на одного сотрудника могут достигать 100 000 руб. При этом одежда и СИЗ не имеют уникальных идентификаторов, после выдачи контроль за их использованием практически отсутствует. До 30 % комплектов списываются досрочно из-за утери или нецелевого использования. Отсутствие достаточного резервного запаса на складах влечёт задержки обеспечения новых работников и, как следствие, риски производственного травматизма и административной ответственности [1, 2, 3].

2. Архитектура и алгоритм функционирования системы АС КЖЦОС

Для совершенствования контроля жизненного цикла специальной одежды и СИЗ в хозяйстве электрификации и электроснабжения железнодорожного транспорта на базе RFID-технологий разработан алгоритм работы программно-аппаратного комплекса (АС КЖЦОС) [7, 8]. Для обеспечения эффективного и безопасного управления форменной, специальной одеждой и средствами индивидуальной защиты на предприятиях железнодорожного транспорта необходимо внедрение алгоритмически строгой, отказоустойчивой системы, работающей в режиме реального времени. Такой алгоритм должен быть детерминированным,

обязан поддерживать интеграцию с корпоративными учётными системами и обеспечивать полное логирование всех операций для последующего аудита [10].

В основе алгоритма лежит статусная модель жизненного цикла изделия, которая включает конечный набор состояний: «на складе», «выдано», «в стирке», «в ремонте», «списано», а также «просрочено» или «подлежит замене» при приближении к предельным срокам. Переходы между статусами жёстко привязаны к событиям, регистрируемым стационарными и мобильными RFID-считывателями. Такой подход позволяет однозначно идентифицировать каждый экземпляр спецодежды на всём протяжении его службы – от ввода в эксплуатацию до утилизации и исключает разночтения при инвентаризации [5, 8].

Ключевым фактором, который алгоритм обязан учитывать, является нормативно-правовая база, прежде всего Единые типовые нормы выдачи СИЗ (Приказ Минтруда № 767н) и локальные нормы предприятия. Алгоритм должен хранить для каждой профессии перечень обязательных изделий, предельные календарные сроки эксплуатации, допустимое количество стирок и ремонтов. При выдаче нового комплекта система автоматически должна сверять эти данные с личной карточкой сотрудника, включая антропометрические параметры, и блокировать выдачу при несоответствии размеров – так как выдача СИЗ неподходящего размера юридически приравнивается к их отсутствию [2]. При прохождении сотрудника через проходную алгоритм инициирует проверку наличия всех обязательных позиций, если хотя бы одно средство отсутствует или его срок истёк, система в реальном времени направляет уведомление начальнику смены и самому работнику, что позволяет предотвратить допуск к опасным работам без надлежащей защиты [9].

Важным элементом является учёт временных параметров и пороговых значений. По истечении установленного срока или при превышении допустимого числа стирок (например, более 90% от нормы) изделие переводится в категорию «подлежит списанию» и не может быть выдано повторно. Автоматическая ежемесячная инвентаризация сравнивает последнее сканирование каждой выданной метки с текущей датой, если изделие не фиксировалось более 60 дней и не находится в ремонте или стирке, система инициирует расследование на предмет утери.

Кроме этого, алгоритм должен вычислять фактический срок службы каждого экземпляра как разность между датой списания и датой первой выдачи, а также накапливать статистику по количеству стирок и ремонтов. Эти данные передаются в модуль прогнозирования на основе искусственного интеллекта, который корректирует нормативы выдачи и формирует обоснованные заявки на закупку, указывая не только количество, но и востребованные размеры [6]. Кроме того, алгоритм должен поддерживать приоритет при дефиците (сначала обеспечиваются сотрудники с истекающими сроками эксплуатации, затем вновь принятые, и только потом остальные). Такой подход минимизирует риск простоя персонала из-за отсутствия СИЗ и исключает нецелевое расходование средств на избыточные закупки.

Алгоритм должен быть устойчивым к исключительным ситуациям, к которым относятся потеря метки при сохранности самой одежды, порча изделия в стирке не по вине сотрудника, увольнение работника, временный выход из строя считывателя или потеря связи с сервером.

Предложенный алгоритм учитывает вышеуказанные требования, реализован в виде бесконечного цикла с обработкой событий от считывателей и работает на базе серверной платформе.

Этап 1. Инициализация системы (выполняется однократно при запуске) (рис. 1).

1.1. Подача питания на все стационарные считыватели.

1.2. Запуск сервера БД и облачной платформы.

1.3. Самодиагностика: тестовое считывание контрольной метки, проверка задержки связи, проверка свободного места на дисках.

1.4. Загрузка в оперативную память справочника сотрудников, нормативов выдачи, текущих остатков.

1.5. Установка временных параметров: интервал сканирования, пороги тревоги и т. п.

1.6. Запуск основного цикла (переход к этапу 2).

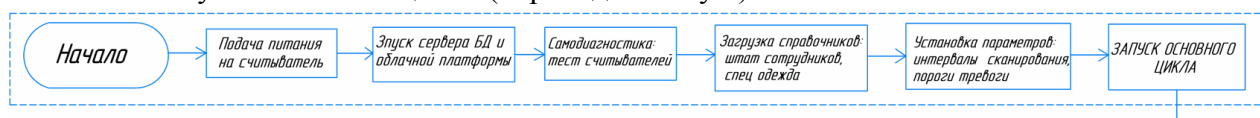


Рис. 1. Запуск и инициализация программно-аппаратного комплекса АС КЖЦОС

Этап 2. Основной цикл (опрос и идентификация оборудования) (рис. 2).

2.1. Сброс флага события.

2.2. Последовательный опрос всех активных считывателей:

для стационарных – чтение зоны на наличие меток;

для мобильных – если пользователь активировал сканирование, обработка буфера.

2.3. Если метка не обнаружена, то возврат к п. 2.2.

2.4. При обнаружении метки извлекается уникальный идентификатор, фиксируются идентификатор считывателя и время, запись в журнал «Обнаружена метка».

2.5. Передача значения уникального идентификатора в модуль идентификации (переход к этапу 3).

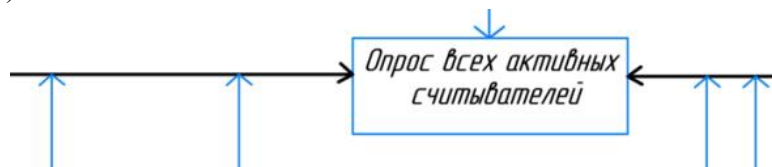


Рис. 2. Основной цикл (опрос и идентификация оборудования) программно-аппаратного комплекса АС КЖЦОС

Этап 3. Идентификация изделия (спецодежда, СИЗ) и определение типа операции (рис. 3).

3.1. По уникальному идентификатору выполняется запрос к базе данных (БД) цифровых паспортов:

если запись найдена – получен цифровой паспорт (переход к 3.4);

если не найдена – переход в режим регистрации новой метки (этап 4);

при ошибке соединения с БД – три попытки с таймаутом; при неудаче – аварийный режим (только чтение, уведомление администратора).

3.2. Из цифрового паспорта извлекаются: текущий статус (на складе, выдано, в стирке, в ремонте, списано), владелец (табельный номер), количество стирок и ремонтов, дата последней выдачи, плановая дата замены, срок службы.

3.3. Определение типа операции по таблице соответствия считывателя и статуса:

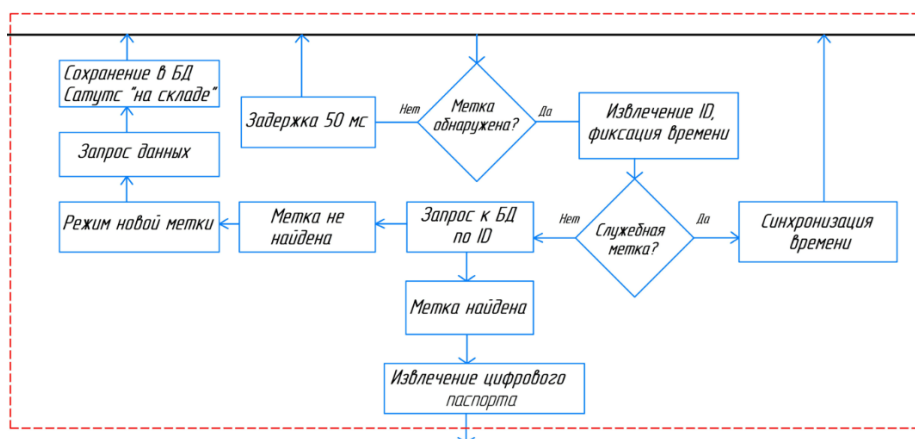


Рис. 3. Идентификация изделия и определение типа операции программно-аппаратного комплекса АС КЖЦОС

Таблица 1

Определение типа операции

Считыватель / ситуация	Статус метки	Определяемая операция
Склад стационарный	«На складе»	Учёт наличия (ничего не делать)
Пункт выдачи	«На складе»	Выдача (при идентификации сотрудника)
Проходная	«Выдано»	Контроль ношения, проверка наличия обязательных СИЗ
Прачечная	«Выдано»	Приём в стирку
Прачечная	«В стирке»	Возврат из стирки (увеличение счётчика)
Ремонтная мастерская	«Выдано» / «В ремонте»	Ремонт

3.4. Если тип операции не определён однозначно – запрос ручного выбора через интерфейс оператора.

Этап 4. Регистрация новой метки (приём на склад).

4.1. Запрос у оператора артикула, размера, даты производства, производителя.

4.2. Проверка дублирования (по штрихкоду на бирке).

4.3. Создание записи в БД (уникальный идентификатор, артикул, размер, статус и т.п).

4.4. Запись в лог, переход в основной цикл.

Этап 5. Выдача спецодежды и СИЗ.

5.1. Идентификация сотрудника.

5.2. Загрузка личной карточки (перечень выданных СИЗ, антропометрические данные).

5.3. Формирование списка изделий к выдаче по ЕТН и профессии (для нового сотрудника – полный комплект; при истечении срока – замена).

5.4. Проверка наличия на складе свободных меток нужного размера. При дефиците – уведомление кладовщику и (при подтверждении) выдача альтернативного размера.

5.5. Считывание меток выдаваемых изделий.

5.6. Для каждой метки (проверка размера, обновление полей).

5.7. Формирование записи в журнале выдачи, обновление личной карточки, экспорт в соответствующую БД (рис. 4).

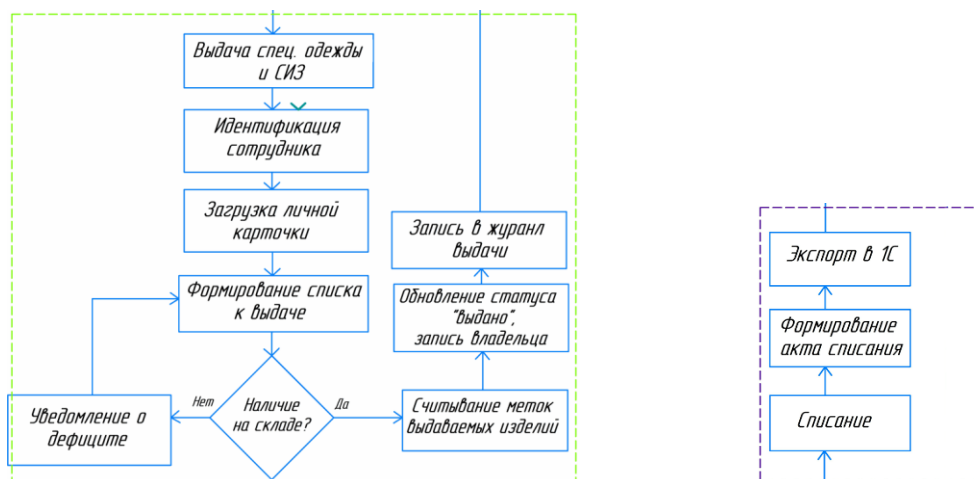


Рис. 4. Регистрация новой метки и выдача спецодежды и СИЗ

Этап 6. Операции «Стирка» и «Возврат из стирки» (рис. 5).

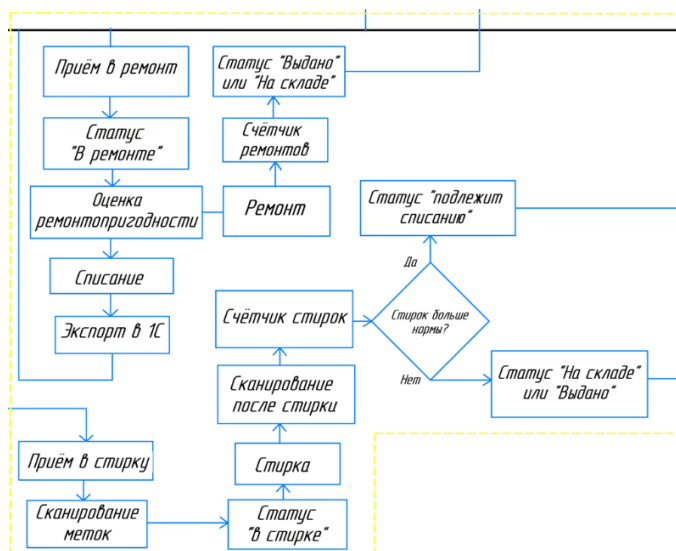


Рис. 5. Операции «Стирка» и «Ремонт» спецодежды и СИЗ

6.1. Сотрудник сдаёт грязную одежду – оператор сканирует метки, статус меняется на «В стирке».

6.2. После стирки оператор сканирует чистую одежду: счётчик стирок увеличивается на 1.

6.3. Если новое количество стирок > максимально допустимого (например, 50), тогда статус меняется на «Подлежит списанию», если нет, то статус меняется на «На складе» или «Выдано» (по усмотрению).

Этап 7. Операция «Ремонт».

7.1. При приёме в ремонт – статус меняется на «В ремонте», фиксируется тип повреждения.

7.2. Анализ ремонтпригодности: если ремонтов уже ≥ 3 или повреждение критическое – рекомендация списания.

7.3. После ремонта – статус = «Выдано» (или «На складе»), счётчик ремонтов увеличивается.

Этап 8. Контроль использования и оповещения.

8.1. При проходе через проходную считываются все метки спецодежды и СИЗ, которые использует сотрудник. Система проверяет наличие всех обязательных СИЗ по нормам. При отсутствии хотя бы одной позиции поступает мгновенное уведомление начальнику смены и сотруднику.

8.2. Ежемесячная автоматическая инвентаризация (сравнение выданных изделий с записями в БД, расхождения >30 дней помечаются как «Возможная утеря»).

8.3. Контроль приближения даты замены (за 30 дней – напоминание, за 7 дней – повторное уведомление).

8.4. Контроль лимита стирок ($>90\%$ от нормы – рекомендация замены).

Этап 9. Прогнозирование и управление запасами (ИИ-модуль, фоновый процесс).

9.1. Сбор данных за месяц (количество выданных и списанных изделий, фактический срок службы с учётом стирок).

9.2. Обучение модели регрессии для прогнозирования среднего срока службы партии спецодежды и СИЗ.

9.3. Расчёт потребностей на следующий квартал (плановые выдачи, ожидаемые утери, новые сотрудники (из кадровой системы)).

9.4. Формирование заявки на закупку (количество, размеры) и передача в ЕК-АСУФР.

9.5. При значительном отклонении фактического срока службы от нормативного – предложение пересмотреть локальные нормы.

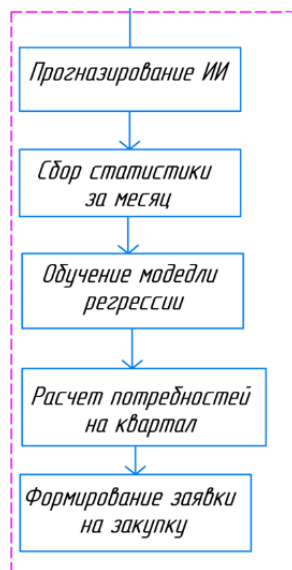


Рис. 6. Прогнозирование и управление запасами спецодежды и СИЗ

Этап 10. Завершение работы и архивация.

10.1. При штатном выключении – остановка опроса, сохранение незавершённых транзакций, резервное копирование БД.

10.2. Автоматическая архивация (ежесуточное сжатое копирование журнала событий, ежемесячное перемещение данных старше 3 лет в долговременное хранилище).

10.3. Отправка отчётов руководителю (экономия от продления сроков, количество списаний, соблюдение норм).

Представленный алгоритм реализован в виде многопоточного приложения на сервере.

3. Оценка экономической эффективности внедрения АС КЖЦОС

Разработанный алгоритм функционирования АС КЖЦОС определяет не только логику управления жизненным циклом СИЗ, но и состав необходимого оборудования, а также режимы его использования, что напрямую влияет на капитальные и эксплуатационные затраты. Для корректной оценки экономической эффективности проекта необходимо последовательно рассчитать стоимость внедрения, годовые эксплуатационные расходы, экономии от продления сроков носки спецодежды и, наконец, интегральные показатели – чистый дисконтированный доход, срок окупаемости и индекс доходности.

Сводная смета на 11 структурных подразделений представлена в таблице 2.

Таблица 2

Смета затрат на закупку оборудования и разработку программного обеспечения

Наименование	Количество	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
RFID-метка промышленная (стойкость >200 стирок)	42 412	150	6 361 800
Стационарный UHF-считыватель	11	98 500	1 083 500
Настольный кодировщик RFID-меток	11	30 000	330 000
Ручной промышленный считыватель	11	50 000	550 000
Сервер сбора и обработки данных	1	300 000	300 000
Платформа учёта СИЗ с ИИ-модулем	1	1 600 000	1 600 000
Интеграция с ЕК-АСУФР	1 компл.	500 000	500 000
Обучение персонала (11 структурных подразделений)	11	50 000	550 000
Строительно-монтажные работы	11	150 000	1 650 000
Системный блок с ОС	11	50 000	550 000
Пакет офиса MS	11	9 999	109 989
Антивирусное ПО	11	1 530	16 830
Итого			13 602 119

Таким образом, единовременные капитальные вложения в проект составляют 13 602 119 рублей. Эти затраты относятся к нулевому году расчётного периода.

Точный учёт фактического износа каждого экземпляра СИЗ (количество стирок, ремонтов, реальное состояние) позволяет пересмотреть нормативные сроки выдачи без снижения уровня безопасности. В традиционной системе одежда выдаётся строго по календарным нормам (например, раз в два года), даже если она сохранила свои защитные свойства. Благодаря RFID-мониторингу предприятие получает достоверные данные о реальной эксплуатационной нагрузке, что даёт право применить коэффициенты продления сроков носки в соответствии с отраслевыми рекомендациями. Для летнего и зимнего комплектов, выдававшихся раз в два года, становится возможным переход на выдачу раз в три года. Для позиций ежегодной выдачи – переход на выдачу раз в два года. При этом алгоритм

автоматически фиксирует момент превышения лимита стирок или появления критических повреждений, что исключает использование изношенной одежды.

На основе анализа типовых норм и цен были рассчитаны базовые годовые затраты на одного сотрудника. Летний комплект стоимостью 53 502 рубля, выдаваемый раз в два года, даёт среднегодовые затраты 26 751 рубль. Зимний комплект стоимостью 29 277 рублей – 14 639 рублей в год. Позиции ежегодной выдачи общей стоимостью 59 778 рублей формируют годовую нагрузку в том же размере. Суммарные годовые затраты на одного работника составляют 101 161 рубль.

Применение продлённых сроков (2/3 для двухгодичных позиций и 1/2 для ежегодных) снижает годовую стоимость обеспечения до 57 482 рублей на человека. Экономия на одного сотрудника достигает 43 686 рублей в год. Умножая эту величину на общую численность персонала (например 2 305 человек), получаем полную годовую экономию в стационарном режиме – 100 697 230 рублей.

Однако следует учитывать переходный период. В первый год после внедрения системы большая часть сотрудников донашивает одежду, выданную ранее по старым нормам. Поскольку максимальный срок носки старой одежды составляет два года, полный переход на новые нормы происходит только на третий год. Принимается следующая динамика: первый год – 0% от полной экономии (фактически экономия отсутствует), второй год – 50% (50 348 615 рублей), третий и последующие годы – 100% (100 697 230 рублей).

Экономический расчёт предусматривает ежегодную замену RFID-меток, вышедших из строя (норма износа принята 5% от общего количества), а также оснащение метками всей вновь закупаемой одежды. Количество новых единиц одежды, закупаемых в год, определено исходя из целевых годовых затрат на весь штат (132 466 010 рублей) и средней цены одной единицы (6 321 рубль) – примерно 20 950 штук. Расходы на метки для новой одежды составляют 3 142 500 рублей, на замену изношенных – 318 150 рублей. Сопровождение программной платформы (20% от её цены) – 320 000 рублей в год, техническая поддержка оборудования – 150 000 рублей. Суммарные ежегодные эксплуатационные затраты равны 3 930 650 рублей.

Для оценки эффективности использован метод дисконтирования денежных потоков. Норма дисконта принята на уровне 15%, что соответствует типичной для инфраструктурных проектов на железнодорожном транспорте ставке, учитывающей альтернативную доходность и риски. Амортизация оборудования начисляется линейным способом в течение пяти лет и составляет 2 720 424 рубля в год (округлённо 2 720 тыс. руб.). Эта сумма не является оттоком денежных средств, но учитывается при расчёте налога на прибыль; в построении чистого денежного потока CF она прибавляется обратно к чистой прибыли. Однако для упрощения анализа в таблице денежных потоков принят прямой метод – учтены только реальные поступления и платежи, а амортизация показана справочно.

Расчёт чистого дисконтированного дохода (NPV) выполнен по годам расчётного периода (таблица 3). Капитальные вложения в нулевом году составляют 13 602 тыс. руб. В первом году экономия отсутствует, эксплуатационные расходы – 3 931 тыс. руб., поэтому чистый денежный поток отрицательный (-6 651 тыс. руб. с учётом того, что часть затрат уже профинансирована в нулевом году). Во втором году экономия достигает 50 348 тыс. руб., эксплуатационные расходы – 3 931 тыс. руб., в результате чистый денежный поток положительный (43 697 тыс. руб.). Накопленный простой денежный поток становится положительным в течение второго года, а дисконтированный – также во втором году.

Таблица 3

Расчёт денежных потоков и показателей эффективности (тыс. руб.)

Показатель	Год 0	Год 1	Год 2	Год 3
Экономия от продления сроков	0	0	50 348	100 697
Эксплуатационные расходы	0	3 931	3 931	3 931
Чистый денежный поток (CF)	–13 602	–3 931	46 417	96 766
Накопленный CF	–13 602	–17 533	28 884	125 650
Коэффициент дисконтирования (15%)	1,0000	0,8696	0,7561	0,6575
Дисконтированный CF	–13 602	–3 418	35 103	63 618
Накопленный NPV	–13 602	–17 020	18 083	81 701

Простой срок окупаемости определяется как момент, когда накопленный чистый денежный поток переходит через ноль. Это происходит между первым и вторым годом. Точный расчёт: за первый год накопленный отрицательный поток составляет – 17 533 тыс. руб., во втором году положительный поток 46 417 тыс. руб. Необходимая сумма для достижения нуля – 17 533 тыс. руб. Срок окупаемости по недисконтированному потоку составляет 1,6 года, по дисконтированному – 1,9 года.

Заключение. В ходе выполнения работы решена актуальная научно-практическая задача – разработка и экономическое обоснование применения автоматизированной системы контроля жизненного цикла специальной одежды и средств индивидуальной защиты (АС КЖЦОС) на базе RFID-технологий применительно к хозяйству электрификации и электроснабжения железнодорожного транспорта.

На основе анализа действующей системы обеспечения СИЗ выявлены системные недостатки [1, 2, 3, 9]. Предложен алгоритм работы АС КЖЦОС, который учитывает статусную модель жизненного цикла, нормативно-правовые требования (Приказ Минтруда № 767н), временные пороги, антропометрические данные сотрудников. Реализация алгоритма в виде многопоточного приложения обеспечивает детерминированность, отказоустойчивость и работу в реальном времени [5, 6, 7, 8].

Экономическая оценка проекта подтверждает его целесообразность. С учётом переходного периода (1-й год – 0%, 2-й – 50%, 3-й – 100%) и ежегодных эксплуатационных расходов (3,93 млн руб.) простой срок окупаемости составляет 1,6 года, дисконтированный – 1,9 года при норме дисконта 15%. Таким образом, внедрение АС КЖЦОС на базе RFID-технологий позволяет:

перейти от реактивного управления запасами СИЗ к проактивному прогнозированию потребностей;

обеспечить сплошной автоматизированный контроль наличия и состояния спецодежды у каждого работника;

снизить производственный травматизм за счёт своевременного выявления отсутствия обязательных СИЗ;

исключить административные и уголовные риски, связанные с необеспечением персонала средствами защиты;

получить значительный экономический эффект при коротком сроке окупаемости.

Разработанный алгоритм и состав оборудования могут быть масштабированы на предприятия любой отрасли, где требуется строгий учёт и контроль специальной одежды и средств индивидуальной защиты с длительным сроком эксплуатации [7, 8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях : от 30.12.2001 № 195-ФЗ // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 1 (ч. 1). – Ст. 5.27.1.
2. Трудовой кодекс Российской Федерации : от 30.12.2001 № 197-ФЗ // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 1 (ч. 1). – Ст. 214.2, 221, 379.
3. Уголовный кодекс Российской Федерации : от 13.06.1996 № 63-ФЗ // Собрание законодательства РФ. – 1996. – № 25. – Ст. 143.
4. Об утверждении Единых типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств : Приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 767н.
5. Автоматизация учёта выдачи средств индивидуальной защиты: современные подходы и практические решения // Техносферная безопасность. – Иркутск : ИрГУПС, 2025. – С. 268–272.
6. Курочка, К. С. Сравнительный анализ нейросетевых моделей для контроля ношения специальной одежды на рабочем персонале / К. С. Курочка // Научное сотрудничество в Евразийском пространстве. – Душанбе : Технологический университет Таджикистана, 2025. – С. 414–420.
7. Селиванов, М. А. Автоматизация учёта спецодежды на основе RFID-технологий / М. А. Селиванов // Tadviser. – 2022. – Октябрь.
8. Шамси, А. Как обеспечить контроль за спецодеждой: RFID-метки – учёт и безопасность / А. Шамси // РБК Компании. – 2025. – 26 августа.
9. Официальные данные пресс-службы ОАО «РЖД» о травматизме за I квартал 2025 года // АБН 24. – 2025. – 21 апреля.
10. Гаранин, М. А. Разработка цифровой модели для управления энергетическим комплексом / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 3(75). – С. 22–27. – EDN JSYDYX.
11. Дмитриев, В. В. Сквозные цифровые технологии на железнодорожном транспорте / В. В. Дмитриев, М. А. Гаранин // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 8. – С. 2–6. – DOI 10.62994/AT.2025.8.8.001. – EDN EQJOCK.

УДК 621.311

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННОГО И ИНФРАКРАСНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. П. Куцый, И. Н. Леонов, В. А. Рудоминский, И. В. Щелоков, В. А. Яковлев

Иркутский государственный университет путей сообщения

Введение. Находящееся в эксплуатации в электроустановках высоковольтное оборудование, такое, например, как колонковые и баковые выключатели [1], подлежит периодическому диагностическому обследованию с целью своевременного выявления возможных развивающихся дефектов и предупреждения серьезных повреждений данного оборудования [2–4].

Диагностика таких составных частей высоковольтных выключателей, как покрышки, опорные изоляторы и даже в определенной мере контактные группы, может осуществляться с помощью тепловизионного и инфракрасного контроля [5–7]. Данными методами определяется как состояние фарфоровых покрышек и изоляторов, позволяющих выявить наличие коронных разрядов по их поверхности и пробоев их внутренней полости, так и,

косвенно, повреждение контактной группы, а именно, повышенное переходное сопротивление контактного соединения, ослабленные или дефектные контакты, их перегрев. Основным достоинством данных методов является отсутствие необходимости отключения оборудования для выполнения диагностики.

В существующей практике анализа состояния высоковольтного оборудования на базе результатов диагностического обследования преобладает ручной подход: специалист сравнивает измеренные величины с предельно допустимыми значениями. Лишь отдельные диагностические средства, например, тепловизоры, имеют встроенные модули выявления перегретых участков [8]. Но даже они не снимают рутинную нагрузку со специалиста-диагностика – при осмотре наружной изоляции ему всё равно приходится вручную анализировать распределение температур по нескольким точкам, чтобы отличить норму от локального дефекта. Вследствие этого сохраняется вероятность как неполноты диагностики, так и ошибок, обусловленных человеческим фактором. Положение усугубляется отсутствием унифицированной программной платформы, которая объединяла бы данные по всем узлам высоковольтного оборудования, что делает комплексную оценку состояния затруднительной. Следовательно, создание такого программного обеспечения является одной из приоритетных задач.

Методы решения задачи. Для решения указанной актуальной задачи авторами разработано программное приложение «Oracle-BO», которое призвано заполнить этот пробел. Оно автоматизирует сбор, обработку и архивацию результатов комплексной диагностики высоковольтного оборудования, а также последовательно проводит пользователя через все ключевые этапы тепловизионной и инфракрасной диагностики. Разберем в качестве примера модуль ПО «ИК-диагностика» (инфракрасная диагностика).

Разработка программного обеспечения – модуля «ИК-диагностика». В интерфейсе «ИК-диагностика» оператор задает параметры через выпадающие списки и поля ввода. Выбор материала автоматически определяет коэффициент излучения в соответствии с таблицей 2-1 из РД 153-34.0-20.363-99 (рис. 1). Для расчета требуются ручной ввод измеренного превышения температуры, скорости ветра, а также фактического и номинального тока. По команде «ВЫПОЛНИТЬ РАСЧЁТ» система выполняет алгоритм коррекции данных с учетом внешних факторов (ветер и нагрузка), после чего сравнивает результат с пороговыми значениями. Итоговый отчет содержит скорректированное значение температуры и категорию состояния: от «нормы» до «аварийного дефекта».

Все промежуточные и итоговые значения выводятся в отчёт, что обеспечивает прозрачность расчётов и облегчает проверку результатов.

Алгоритм реализован в виде последовательных шагов, каждый из которых сопровождается выводом промежуточного результата. Это позволяет пользователю видеть вклад каждого фактора и при необходимости вносить корректировки.

Все результаты диагностики могут быть скопированы из текстовых полей и вставлены в итоговый протокол (рис. 2). Программа накапливает историю измерений (при желании пользователя), что позволяет отслеживать динамику изменения параметров во времени. Интерфейс оптимизирован для работы инженерно-технического персонала: все поля подписаны, предусмотрена валидация ввода, а расчёт выполняется по нажатию одной кнопки.

Рис. 1. Интерфейс модуля ИК-диагностики с выбранным материалом и результатами коррекции

Выводы. С целью автоматизации обработки результатов диагностического обследования высоковольтного оборудования разработан модуль ПО «ИК-диагностика».

К преимуществам разработанного ПО относится:

Сокращение времени обработки – автоматизация исключает ручные расчёты и сравнения с нормативами.

Исключение человеческого фактора – минимизируются ошибки при интерпретации данных.

Рис. 2. Пример сформированного протокола

Универсальность – модульная структура позволяет легко адаптировать приложение под различные типы высоковольтного оборудования.

Наглядность – результаты представлены в структурированном виде, пригодном для включения в техническую документацию.

Безопасность – программа не требует подключения к оборудованию и работает с уже полученными данными, что исключает риск для персонала.

Таким образом, предлагаемый модуль ПО согласно [9] повышает эффективность обработки результатов диагностического обследования высоковольтного оборудования и приводит к снижению затрат на его эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пузина Е. Ю. Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровой тяговой подстанции / Е. Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 92–104. – EDN: RIXUQT.
2. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытания электрооборудования. Утвержден распоряжением ПАО «Россети» от 29.05.2017 № 280р.
3. Саушев, А. В. Анализ методов диагностики аппаратов высокого напряжения / А. В. Саушев, Д. А. Шерстнев, Н. В. Широков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 5. – С. 1073–1085. EDN: YEVSZR
4. Манаенков, А. А. Методы диагностирования электрооборудования / А. А. Манаенков, Д. В. Гурьянов, А. В. Чувилкин, А. А. Найденов // Наука и образование. – 2021. – Т. 4. – № 2. – С. 106–112. – EDN: ZRRREM.
5. Шпиганович, А. Н. Тепловизионный контроль изоляторов распределительных устройств и воздушных линий электропередач напряжением 0,4–220 кВ / А. Н. Шпиганович, А. Н. Мамонтов, К. А. Пушница, А. Н. Кустов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2020. – № 2 (60). – С. 18–27. – EDN: LOQRKX.
6. Бардушко, А. Ю. Комплексная методика диагностирования фарфоровых покрышек электрооборудования и опорно-стержневых изоляторов / А. Ю. Бардушко, М. И. Крапивин, Е. Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2025. – № 2 (86). – С. 10–23. – EDN: XFRQJZ.
7. РД 153-34.0-20.363-99. Методика инфракрасного контроля электрооборудования и ВЛ.
8. Косенко, А. Д. Система автоматизированной обработки результатов тепловизионной диагностики электрооборудования / А. Д. Косенко, В. А. Величко, А. А. Косенко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2025. – Т. 68. – № 4. – С. 324–342. – EDN: HVOIWI.
9. Горбунова, В. С. Эффективность внедрения энергетического менеджмента в промышленных компаниях России / В. С. Горбунова, Е. Ю. Пузина // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 119–137. – EDN: XNZJUL.

УДК 621.314.6

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ: ПОДХОД НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. П. Припутников, Н. С. Рагулин

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. Современный мир потребляет всё больше электричества, а эффективность его преобразования упирается в «физический потолок» классических методов проектирования [1]. Любая электротехническая система (зарядная станция для электромобиля, преобразователь для ветрогенератора, блок питания для сервера) содержит силовой преобразователь – устройство, которое меняет параметры тока (напряжение, частоту) [5]. Внутри него – силовые ключи (транзисторы), которые постоянно включаются и выключаются. Именно на них происходят основные потери энергии (до 10-15% от всей пропускаемой мощности в неоптимальных решениях). Эти потери превращаются в тепло, которое нужно

отводить (радиаторы, вентиляторы, жидкости), а это – дополнительные затраты, размеры, вес и снижение надёжности.

Рассмотрим классический подход: инженер применяет проверенную схему (топологию) – например, трёхуровневый инвертор на кремниевых (Si) ключах [4]. Затем, опираясь на свой опыт и справочники, подбирает номиналы элементов (дрессели, конденсаторы) и частоту переключения. Он проводит десятки симуляций в специализированных программах (SPICE, PLECS и т. п.), меняя параметры вручную. Это занимает недели или месяцы. В итоге он закладывает «запас прочности» 20-30%, чтобы гарантировать работу в самых тяжёлых условиях. Из-за этого оборудование получается громоздким, тяжёлым и дорогим. КПД – около 95-96%, а 4-5% мощности (это 7,5 кВт потерь для 150-кВт зарядки) уходит в виде бесполезного тепла, которое нужно отводить мощными вентиляторами (шум, пыль, энергия на охлаждение).

В статье рассматривается машинное обучение (ML) как инструмент проектирования, который используется не для управления, а для поиска самой оптимальной архитектуры и компонентов задолго до того, как схема будет собрана.

Основная часть. В алгоритм ML (например, нейросеть или эволюционный алгоритм) вносят разнообразные параметры: возможные топологии, характеристики ключей (Si, SiC, GaN), частоты, индуктивности, ёмкости, тепловые модели. Затем ML-модель обучается предсказывать потери и КПД для любой комбинации во много раз быстрее, чем классическая симуляция [3]. Она может перебрать миллионы вариантов за несколько часов и выдать инженеру неочевидное, но идеальное решение – например, гибридную топологию, где одна часть работает на высокой частоте, другая – на низкой, и при этом используются SiC-ключи только в критичных местах, а там, где можно – более дешёвые Si.

Рассмотрим пример с зарядной станцией для электромобилей. Проведём сравнительную характеристику классического подхода и подхода на основе машинного обучения, а результаты сведём в таблицу.

В результате использования ML-проектирования будет явная глобальная польза для энергосистемы в целом. Если масштабировать этот подход в пределах области, региона, страны, то будут следующие преимущества:

1. Снижение нагрузки на сети: если все зарядные станции для электромобилей в стране станут на 2% эффективнее – это высвободит гигаватты мощности, которые можно использовать для питания новых потребителей без строительства новых электростанций.

2. Экологический эффект: чем меньше потерь, тем меньше бесполезно выработанной энергии, и, следовательно, меньше выбросов CO₂. При переходе на возобновляемые источники электроэнергии (ветер, солнце) каждый процент повышения КПД преобразователя критичен, потому что выработка там и так нестабильна.

3. Надёжность и долговечность: снижение тепловыделения напрямую увеличивает срок службы электроники (как правило, снижение температуры на 10°C удваивает ресурс). Это значит, что оборудование будет работать 20 лет вместо 10 лет, сокращая затраты на замену и утилизацию.

Раньше методы машинного обучения были труднодоступны из-за:

- Нехватки данных (не было оцифрованных характеристик тысяч транзисторов).
- Слабой вычислительной мощности (перебор миллиардов вариантов требовал суперкомпьютера).
- Сложности в обучении (нейросети работали как «чёрный ящик»).

На сегодня машинное обучение применительно для проектирования силовых преобразователей стало возможным благодаря:

- Появлению огромных баз данных по SiC и GaN компонентам.
- Облачным вычислениям, которые делают поиск доступным.
- Развитию физико-информированных нейросетей (они обучаются не просто на цифрах, а с учётом законов физики), поэтому их решения можно объяснить и доверять им.

Таблица 1

Сравнительная характеристика классического подхода с ML-проектированием

Что меняется	Классический подход	С ML-проектированием	Польза (цифры и эффект)
Топология схемы	Выбиралась из 3-5 известных вариантов, знакомых инженеру	ML-алгоритм анализирует сотни тысяч потенциальных топологий и находит новую, гибридную, которую никто не рассматривал	Уникальность: можно запатентовать новую схему. Снижение потерь на 10-20% в ключевых режимах
Выбор материалов (Si / SiC / GaN)	Часто брали Si "на все случаи" (дешевле) или полностью SiC (дороже, но эффективнее) – интуитивно	ML прогнозирует, где использование дорогого GaN/SiC окупается максимальным снижением потерь, а где можно оставить Si	Экономия материалов: стоимость силовых ключей снижается на 15-25% без потери эффективности
Что меняется	Классический подход	С ML-проектированием	Польза (цифры и эффект)
Частота переключения и размеры	Частоту выбирали компромиссную (потери VS размеры дросселей)	ML находит частоту, при которой потери на переключение и потери в меди/магнитопроводах дают глобальный минимум для конкретного применения	Снижение массы и объёма: дроссели и конденсаторы можно уменьшить на 20-30%. Зарядная станция становится компактнее, легче, дешевле в монтаже
Тепловыделение и охлаждение	Закладывали запас по температуре, ставили мощный вентилятор	ML-модель учитывает тепловые потоки и оптимизирует схему так, что потери минимальны	Отказ от активного охлаждения: во многих случаях удаётся перейти с принудительного жидкостного охлаждения на пассивное (радиатор). Это повышает надёжность (нет движущихся частей), снижает шум и энергопотребление самой станции на ~30%
Время проектирования	Месяцы ручных расчётов, десятки итераций симуляций	Алгоритм за часы выдаёт набор из 5-10 оптимальных вариантов, инженер проверяет лучший и дорабатывает	Ускорение вывода на рынок: срок разработки сокращается с 12-18 месяцев до 3-6 месяцев. Экономия бюджета на инженерный труд и прототипирование – до 40%

Заключение. В данной статье предложен и обоснован подход к автоматизированному проектированию силовых преобразователей на основе методов машинного обучения. Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием силовой электроники, требующим новых методологий проектирования, способных повысить эффективность, надёжность и масштабируемость схем [2]. Традиционные подходы, основанные на итеративных процедурах и ручной оптимизации, зачастую не позволяют в полной мере исследовать доступное проектное пространство и являются трудоёмкими.

В качестве ключевых критериев эффективности рассмотрены КПД и удельная мощность (плотность мощности). Как описано в статье, современные преобразователи на широкозонных полупроводниковых материалах – карбиде кремния (SiC) и нитриде галлия (GaN) – демонстрируют впечатляющие результаты: КПД может превышать 99%, а удельная мощность достигать 430 Вт/дюйм³ и выше. Однако полный потенциал этих материалов раскрывается только при интеллектуальном выборе топологии, параметров и режимов работы, что представляет собой сложную многокритериальную задачу с нелинейными связями между проектными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Susobhan Bandopadhyay, Suman Banerjee, Diptapriyo Majumdar, Fahad Panolan "AI-Assisted Design of Power Electronic Circuits," 2025 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), BANGALORE, India, 2025.
2. Z. Wang et al., "Automatic zero-voltage-switching dynamic feature extraction and regression modeling for high-efficiency cascode gallium nitride/silicon carbide Class-E inverters," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 143, 2026.
3. Mahajan A, Chaturvedi S, Das S. "Optimal parameter design for power electronic converters using a probabilistic learning-based stochastic surrogate model," Next Energy, vol. 9, 100464, Oct. 2025.
4. S. Yin, K. J. Tseng, C. F. Tong, R. Simanjorang, C. J. Gajanayake, A. K. Gupta "A 99% efficiency SiC three-phase inverter using synchronous rectification," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2016.
5. Hiroshi Ishino, Tomokazu Watanabe, Kazuhiko Sugiura, Kazuhiro Tsuruta "6-in-1 Silicon carbide power module for high performance of power electronics systems," IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 2014.

УДК 621.311

ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛЭП 220 кВ

Е. Ю. Пузина, Д. В. Игнатко, К. Р. Зеленский

Иркутский государственный университет путей сообщения

Введение. В настоящее время тяговые подстанции Северного участка одной из железных дорог России получают электроснабжение от ЛЭП-220 кВ, имеющей неоправданно большую протяженность порядка 900 км, в свою очередь, питающуюся только от одного источника – УИ ГЭС. Эта линия в свое время была смонтирована в габаритах ЛЭП-500 кВ. Такая ситуация приводит к недопустимому повышению уровня напряжения в ЛЭП-220 кВ в часы снижения нагрузок подстанций в силу накопления значительной зарядной мощности в линии, особенно во второй половине исследуемого участка. Данная проблема решается в

текущих условиях путем установки в распредустройствах 10 кВ тяговых подстанций реакторов РТМ-3300/10, работающих в качестве дополнительной нагрузки. Свою задачу данные реакторы выполняют. Однако в последние годы после ввода в эксплуатацию ЛЭП-500 кВ, от которой через автотрансформаторные подстанции 500/220 кВ выполняется подпитка тяговых подстанций и, тем самым, происходит передача дополнительной мощности в систему тягового электроснабжения с целью пропуска тяжеловесных поездов по горно-перевальным участкам с минимально возможными интервалами [1–4], реакторы РТМ-3300/10 приходится держать в работе круглогодично. Это, в свою очередь, приводит к значительным экономическим потерям для дистанций электроснабжения в виде оплаты за потребляемую реакторами электроэнергию. Поэтому актуальной задачей является поиск иных технических решений, обеспечивающих необходимый уровень напряжения в ЛЭП-220 кВ, при оптимальных затратах на их реализацию и недопущении роста потерь электроэнергии [5–7].

Методы решения задачи. Для решения обозначенной выше проблемы предлагается установить в распредустройствах 220 кВ тяговых подстанций Северного участка управляемые шунтирующие реакторы УШРДТ-220 мощностью 63000 кВА [8–9]. Главным преимуществом такого реактора трансформаторного типа [10] является большой диапазон и простота регулирования тока и безынерционность регулирования. Принципиальная схема управляемого реактора приведена на рис. 1.

С целью оценки эффективности применения данных реакторов выполнено компьютерное моделирование системы электроснабжения исследуемого участка в ПМК Fazonord. Фрагмент разработанной модели представлен на рис. 2.

Анализ полученных результатов. В процессе моделирования системы электроснабжения Северного участка подтверждена эффективность установки управляемых шунтирующих реакторов, так как уровень напряжения в ЛЭП-220 кВ на протяжении нескольких межподстанционных зон, на тяговых подстанциях которых установлены данные реакторы, при минимальной тяговой нагрузке в виде только пассажирских поездов не поднимается выше допустимого 242 кВ, что наглядно представлено в табл. 1.

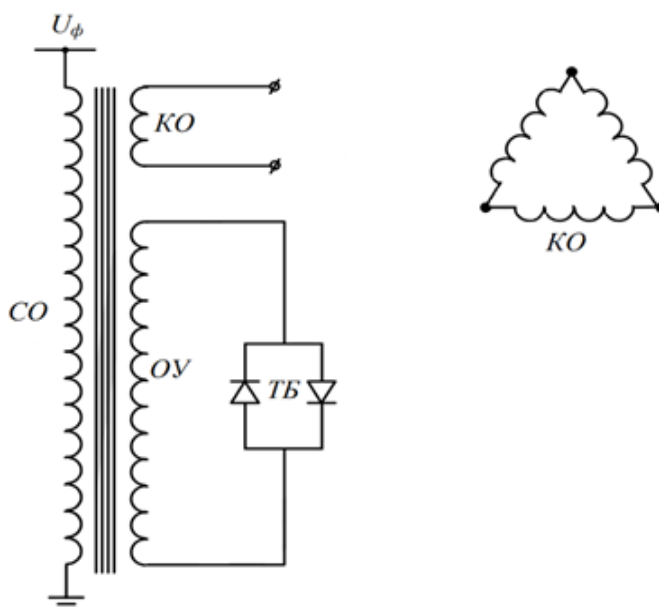


Рис. 1. Принципиальная схема управляемого реактора трансформаторного типа:
СО – сетевая обмотка; КО – компенсационная обмотка; ОУ – обмотка управления;
ТБ – тиристорный блок

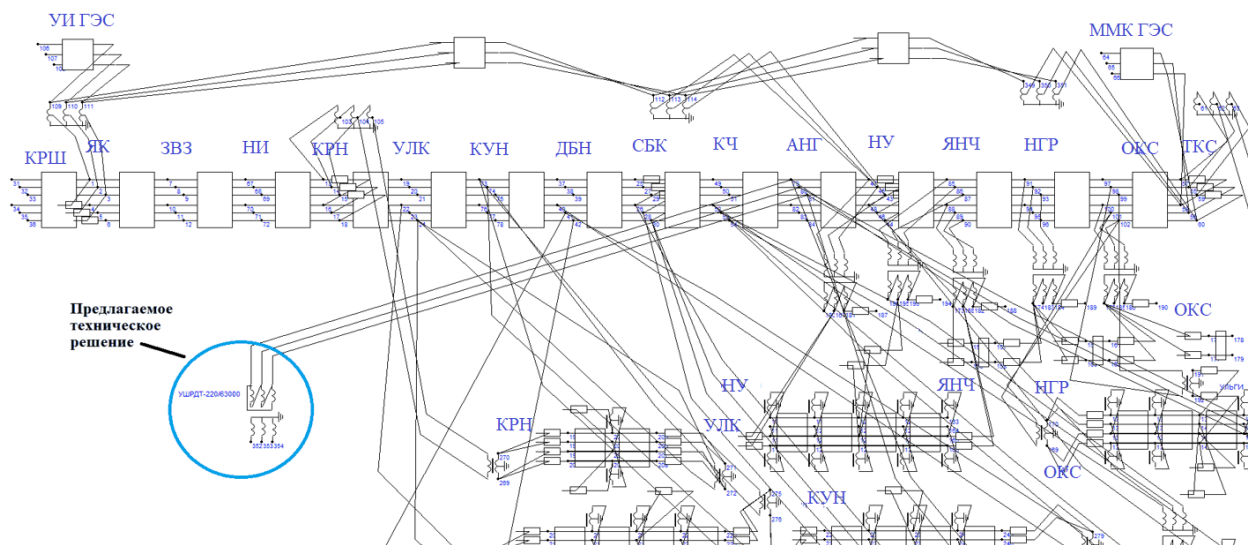


Рис. 2. Фрагмент модели системы электроснабжения исследуемого участка

Таблица 1

Уровень напряжения в точках подключения тяговых подстанций к ЛЭП-220 кВ

Тяговая подстанция	Значение уровня напряжения в питающей ЛЭП, кВ	Потери электроэнергии в реакторах, средние за месяц, кВтч
DBN	235,21	104524
SBK	234,93	104979
KCH	234,03	80126
ANG	235,24	62271
NU	235,26	83531

Также необходимо отметить, что суммарные годовые потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения исследуемого участка при использовании на протяжении всего исследуемого участка всего лишь одного реактора УШРДТ-220, рекомендуемого к установке на тяговой подстанции АНГ вместо 4–5 реакторов РТМ-3300/10, используемых на указанных в табл. 1 всех тяговых подстанциях, существенно ниже, а именно составляют согласно результатов моделирования 521406 кВтч в год вместо нынешних 5225218 кВтч – по данным дистанции электроснабжения, в ведении которой и находятся перечисленные в табл. 1 тяговые подстанции.

Выводы. Проведенные исследования подтверждают высокую эффективность предлагаемого решения. Применение управляемого шунтирующего реактора лишь на одной тяговой подстанции исследуемого участка обеспечивает стабилизацию уровня напряжения в ЛЭП-220 кВ на протяжении всего участка, не допускает превышения отклонения напряжения сверх значения, указанного в ГОСТ 32144-2013, приводит к существенной экономии электрической энергии – до 90 % от потребляемой всеми реакторами РТМ-3300/10 исследуемого участка.

Таким образом, предложенное техническое решение рекомендуется использовать на практике для оптимизации уровня напряжения в ЛЭП, питающих тяговые подстанции, и снижения потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куцкий, А. П. Анализ эффективности применения организационных и технических способов повышения пропускной способности тяговой сети двухпутного горно-перевального участка / А. П. Куцкий, И. С. Овечкин, А. А. Галков // Молодая наука Сибири. – 2022. – № 3 (17). – С. 56–63. – EDN: LIOLBC.
2. Крапивин, М. И. Разработка технических решений по увеличению пропускной способности системы тягового электроснабжения участка Восточного полигона / М. И. Крапивин, А. П. Куцкий, Е. Ю. Пузина // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России. – Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Москва. – 2024. – С. 180–186. – EDN: IKOYUQ.
3. Зарубин, А. Д. Подход к развитию технических решений по совершенствованию системы тягового электроснабжения Восточного полигона / А. Д. Зарубин // Молодежная наука. – Труды XXIX Всероссийской студенческой научно-практической конференции КРИЖТ ИрГУПС. – Красноярск. – 2025. – С. 41–45. – EDN: FCEWEV.
4. Puzina, E. Yu. The Study of The Effectiveness of Strengthening The Traction Power Supply System of The Northern Route of The Eastern Polygon of The Russian Railroads / E. Yu. Puzina, I. A. Khudonogov // Journal of Physics: Conference Series. Ser. «International Conference on Automatics and Energy. ICAE 2021». – 2021. – С. 012153. – EDN: TKZRAG.
5. Евдокунин, Г. А. Оценка эффективности снижения потерь активной мощности в элементах электропередачи при применении управляемых шунтирующих реакторов / Г. А. Евдокунин, С. В. Смоловик // Энергоэксперт. – 2008. – № 4. – ISBN 978-5-905657-07-8.
6. Капранов, П. А. Реконструкция районов электрических сетей с целью снижения потерь мощности / П. А. Капранов, Е. Ю. Пузина // Транспорт: наука, образование, производство: труды междунар. научн.-практ. конф. – Ростов-на-Дону. – 2020. – С. 113–116. – EDN: BUHKK.
7. Горбунова, В. С. Эффективность внедрения энергетического менеджмента в промышленных компаниях России / В. С. Горбунова, Е. Ю. Пузина // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т 4. – № 1. – С. 119–137. – EDN: XNZJUL.
8. Ивакин, В. Н. Управляемые шунтирующие реакторы ОАО «Электрозавод» / В. Н. Ивакин, В. Д. Ковалев, А. А. Магницкий // Электроэнергия. Передача и распределение. – № 4 (55). – 2019. – С. 88–93. – EDN: DTPGFO.
9. Александров, Г. Н. Управляемые реакторы: учебное пособие / Г. Н. Александров, В. П. Лунин // Центр подготовки кадров энергетики. – Санкт-Петербург. – 2005. – 200 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cpk-energo.ru/metod/AlexandrovLuninReaktory.pdf>. – Дата доступа: 20.05.2026.
10. Долгополов, А. Г. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей / А. Г. Долгополов, Д. В. Кондратенко, С. В. Уколов, В. М. Постолатий // Problemele Energeticii Regionale. № 3(17). 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlyaemye-shuntiruyuschie-reaktory-dlya-elektricheskikh-setey>. Дата доступа: 10.05.2026.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ТЯГОВОГО ТОКА В РЕЛЬСОВЫХ НИТЯХ

В. С. Саблин, А. Г. Исайчева, Л. Б. Смирнова

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. На сети железных дорог РФ применяется электрическая тяга подвижного состава постоянного и переменного тока. На стадии проектирования систем интервального регулирования движения поездов и эксплуатации технических средств по комплексу автоматики и телемеханики учитывается род тяги и условия электромагнитной совместимости [1]. Теоретические исследования по вопросам функциональной безопасности технических средств в условиях воздействия тягового тока проведены многими выдающимися учёными в области автоматики и электроснабжения, практическое применение которых отразилось в разработке диагностических контроллеров непрерывного мониторинга.

Методы решения. Одно из направлений развития системы технического диагностирования и мониторинга, применяемой на сети железных дорог – совершенствование схематических решений и программного обеспечения диагностических контроллеров, сбор информации которых обеспечивается по рельсовым нитям рельсовой линии.

Авторами ведётся разработка измерительного устройства – сигнализатора о превышении допустимого значения неравенства тяговых токов в рельсовых нитях (РН). Обоснование применения диагностической информации по тяговому току для устройств систем интервального регулирования движения поездов приведено в научных публикациях [2, 3].

В статье приведены результаты подключения лабораторного макета сигнализатора версии, применяемой на участках железных дорог с электротягой переменного тока. Целью подключения является сравнительный анализ погрешности измерений при различных технических исполнениях лабораторного макета.

Испытательный макет сигнализатора с интегральной микросхемой, работающей на методе дельта-сигма модуляции подключался к цифровому осциллографу. Выход сигнала с датчиков Холла подключается на вход интегральной микросхемы. Полученные осциллограммы позволили провести сравнительный анализ напряжений на выходе макета сигнализатора.

Современный рынок микроконтроллеров позволяет повысить точность измерений без изменения схемотехники устройств. Для макета сигнализатора выбран микроконтроллер STM 132, разработан алгоритм вычисления среднеквадратичного значения тягового тока и проведено подключение к лабораторному оборудованию.

Анализ полученных результатов. Сводные характеристики рассмотренных технических решений приведены в таблице.

Анализ полученных данных показывает, что применение интегральной микросхемы для технического решения сигнализатора, повышает точность измерения диагностического параметра, но усложняет функциональные возможности. На выходе интегральной микросхемы измерительный канал формирует постоянное напряжение, не имеющее информацию о гармоническом составе, о наличии кратковременных выбросов и других особенностях формы сигнала, которые могли бы быть интерпретированы как признаки конкретного предотказного состояния элементов рельсовых нитей.

Цифровой подход, напротив, сохраняет полную информацию о сигнале. Отсчёты аналого-цифрового преобразователя могут быть записаны в буфер и подвергнуты дополнительной математической обработке: спектральному анализу, корреляционному сравнению с эталонными сигналами, выделению информативных признаков для нейросетевых классификаторов. Все перечисленные возможности реализуются исключительно программными средствами, без внесения изменений в схемотехнику устройства [4, 5].

Таблица 1

**Сравнительные характеристики технических решений разрабатываемого
сигнализатора**

Характеристика	Аппаратный подход	Цифровой подход
Погрешность измерения	0,02 %	< 1,0 %
Загрузка процессора	минимальная	средняя
Сохранение формы сигнала	-	+
Возможность гармонического анализа	-	+
Многоканальность	рост стоимости	без затрат
Калибровка	физическая	программная
Модернизация диагностических функций	изменение схемотехники	обновление ПО

Следует также отметить вопрос калибровки измерительных каналов. При аппаратной реализации с несколькими микросхемами неизбежен технологический разброс параметров пассивных компонентов и коэффициентов передачи самих преобразователей, что требует индивидуальной подстройки каждого канала. Цифровой подход допускает программную коррекцию смещения нуля и масштабного коэффициента путём однократной записи калибровочных констант в энергонезависимую память микроконтроллера, что технологически проще и обеспечивает повторяемость результатов при серийном производстве.

Вывод. Совокупность факторов – экспериментально подтверждённая точность, достаточная для задач диагностики, сохранность формы сигнала, простота калибровки и возможность наращивания функциональности без изменения аппаратной части сигнализатора – обуславливает предпочтительность цифрового подхода для контроля состояния элементов рельсовых нитей рельсовых линий при электротяге переменного тока железнодорожных линий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаранин, М. А. Учет электрической связи между тяговыми подстанциями при расчете пропускной способности электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, А. Н. Митрофанов, Е. В. Добрынин // Электротехника. – 2017. – № 3. – С. 35–39. – EDN XWVTXL.
2. Исайчева, А. Г. Обоснование применения мультимедийного комплекса диагностирования тяговой рельсовой сети / А. Г. Исайчева, М. В. Башаркин, В. А. Воронин // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 3(111). – С. 145–150. – EDN LOUYNI.
3. Исайчева, А. Г. Разработка устройства мониторинга тягового тока / А. Г. Исайчева, М. В. Башаркин, Д. А. Шашин // Автоматика, связь, информатика. – 2024. – № 10. – С. 2–4. – DOI 10.62994/AT.2024.10.10.001. – EDN PSWFNE.
4. Митрофанов, А. Н. Построение моделей цифровых двойников электротехнической инфраструктуры железных дорог для оценки ресурса её нагрузочной способности / А. Н. Митрофанов, М. А. Гаранин, С.

А. Окладов // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 2–7. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_2. – EDN UFWXMQ.

5. Гаранин, М. А. Анализ потенциала применения сквозных цифровых технологий в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков, Т. С. Максимова // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 1(97). – С. 19–27. – EDN EHDVJT.

УДК 621.331

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПРИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ УЧАСТКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

И. А. Сафронова, Е. В. Добрынин

Приволжский государственный университет путей сообщения

Основным этапом проектирования системы тягового электроснабжения (СТЭ) постоянного тока является выбор места расположения и характеристик тяговых подстанций (ТП). В настоящее время основным документом проектировщика тяговых подстанций является ГОСТ Р 57670-2017. Действующая методика регламентирует выбор параметров на основе имитационного моделирования, однако начальное расположение ТП задается приближенно или по средним/предельным границам километража [2].

Для снижения неопределенности выбора места расположения ТП предложен подход основанный на равномерном распределении тяговой нагрузки от движения электроподвижных составов (ЭПС). Предлагаемый подход базируется на переходе от динамической (поездной) нагрузки к эквивалентной стационарной распределенной нагрузке.

Проектирование электрифицированного участка включает определение расстояния между ТП, их мощности и типа контактной подвески. ГОСТ Р 57670-2017 предлагает использовать имитационное моделирование, однако начальный этап расстановки ТП не формализован – их местоположение выбирается по среднему километражу в привязке к станциям и центрам питания. Далее для выбранных межподстанционных зон и ТП рассчитываются параметры оборудования и площадь сечения проводов контактной сети (КС), после чего модель проверяется на пропускную способность. Если параметры СТЭ не удовлетворяют условиям, изменяются и подбираются параметры ТП и КС до обеспечения необходимой пропускной способности участка [3–6].

Недостатком такого подхода является отсутствие четких критериев начального выбора расположения и технических характеристик ТП. Это ведет к риску неоптимального использования оборудования ТП и завышению стоимости проекта. Актуальной остается разработка аналитического метода, учитывающего реальное распределение токовой нагрузки на участке железной дороги постоянного тока.

Присоединение ТП к внешней линии электроснабжения осуществляется путем логистической оптимизации (минимизация протяженности линий с учетом нагрузок).

В тяговом электроснабжении задача усложняется из-за перемещения нагрузки электроподвижного состава (ЭПС), изменения режимов работы ЭПС, массы поездов и межпоездного интервала [7, 8].

Рассмотрим более подробно метод перехода к стационарной нагрузке. Предлагается привести динамическую нагрузку к стационарному эквиваленту, тогда значение действия тока равно произведению тягового тока на время его действия и определяется формулой:

$$S_I = I \cdot t_{SI} = I \cdot t \quad (1)$$

Введенное понятие действия тока эквивалентно заряду. Для участка длиной L за период T при пропуске n поездов значение действия тока составит:

$$S_I = \sum_{i=1}^n \int_0^L I_{ix} \cdot dt = \sum_{i=1}^n \int_0^L \frac{I_{ix}}{V_x} \cdot dx, \quad (2)$$

где n – количество поездов за расчетный период времени T ,

I_{ix} – ток, потребляемый i -тым поездом на координате $x \in [0; L]$ участка; чтобы интеграл был расчетным выполнена замена $dt=dx/V_x$; V_x – скорость поезда на координате x .

Тогда распределенную токовую нагрузку определим как:

$$I_x = \sum_{i=1}^n \frac{I_{ix} \cdot dx}{T \cdot V_x} = i_x \cdot dx, \quad (3)$$

где i_x – величина распределенной токовой нагрузки, А/м.

Интегрирование по длине L и умножение на период времени T дает искомое действие тока I_x . Умножив результат на напряжение сети, получаем потребную энергию, на основе которой рассчитываются суммарная мощность и количество тяговых подстанций k с учетом коэффициента их загрузки [9].

Места установки ТП находятся из условия равенства интегралов действия тока по каждой межподстанционной зоне, что соответствует равномерному распределению заряда на участке:

$$\int_0^{x_1} \sum_{i=1}^n \frac{I_{ix} \cdot dx}{T \cdot V_x} = \int_{x_2}^{x_3} \sum_{i=1}^n \frac{I_{ix} \cdot dx}{T \cdot V_x} = \int_{x_3}^{x_4} \sum_{i=1}^n \frac{I_{ix} \cdot dx}{T \cdot V_x} = \dots = \int_{x_{k-1}}^{x_k} \sum_{i=1}^n \frac{I_{ix} \cdot dx}{T \cdot V_x} \quad (4)$$

Приведем пример моделирования для четырех тяговых подстанций постоянного тока:

1 вариант моделирования – одинаковое расстояние между четырьмя тяговыми подстанциями;

2 вариант моделирования – одинаковая нагрузка на всех четырех тяговых подстанциях;

3 вариант моделирования – одинаковая нагрузка на всех межподстанционных зонах;

4 вариант моделирования – минимизация потерь электрической энергии.

Для расчета приняты все характеристики участка с единичными параметрами, т. е. ток ЭПС, напряжение на токоприёмнике ЭПС, время прохождения участка, скорость и сопротивление тяговой сети равны 1.

Тогда расход энергии на i -ю ТП при движении одиночного поезда составит:

$$W_{ТПi} = \int_{x_{i-1}}^{x_i} U_{\Xi} \cdot I_{\Xi} \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} dt + \int_{x_i}^{x_{i+1}} U_{\Xi} \cdot I_{\Xi} \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} dt \quad (5)$$

И потери мощности при прохождении поезда:

$$W_{ТПi} = \frac{U_{\Xi} \cdot I_{\Xi}}{V} \left(\int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} dx + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} dx \right) \quad (6)$$

В случае, когда нагрузка ЭПС на всем протяжении участка не меняется, равномерное распределение ТП по длине электрифицированной магистрали создаст также равномерную последовательную загрузку всех тяговых подстанций по мере прохода поезда. Но в реальности таких случаев не бывает. Ток, потребляемый ЭПС, будет меняться в зависимости от профиля

и управления движением состава. Рассмотрим неравномерную нагрузку на участке, но частично идеализированную – линейно убывающую от начала участка до его конца.

Проведено четыре варианта моделирования с линейно убывающей токовой нагрузкой. За базовый вариант принят 1-ый с равномерной расстановкой четырех подстанций по длине участка. Получены следующие результаты:

1 – одинаковое расстояние между четырьмя тяговыми подстанциями – потери составили 0,0552 ед., нагрузка на первой ТП соответственно составила максимальное значение, а на последней – минимальное. Отличие составило в 4 раза;

2 – одинаковая нагрузка на всех четырех тяговых подстанциях – потери снизились на 5,8% (0,052);

3 – одинаковая нагрузка на всех межподстанционных зонах – потери снизились на 20,7% (0,0438), разница нагрузки первой ТП относительно последней сократилась до двухкратной.

4 – минимизация потерь электрической энергии – потери снижены на 21% (0,0436), кратность нагрузки первой относительно последней составляет 2,13.

Для сравнения введен также коэффициент использования оборудования, определяемый, отношением максимальной нагрузки тяговой подстанции к средней:

$$k_{\text{исп}} = \frac{I_{\text{ТП max}}}{I_{\text{ТП ср}}} \quad (7)$$

С экономической точки зрения предпочтительно, чтобы коэффициент использования оборудования стремился к единице. В рассмотренных вариантах он составил для отдельных тяговых подстанций от 9,7 до 3. Если смотреть по интегральному показателю всего участка, то от 5 до 6,3. Такое высокое относительно единицы значение обусловлено тем, что в моделировании использовали только один поезд. Увеличение потока поездов и снижение межпоездного интервала создадут более эффективное использование оборудования, но в данном исследовании ставилась задача определения закономерности изменения показателей относительно расстановки ТП. Во всех вариантах наибольший показатель коэффициента оказался у первой ТП, на которую пришелся пик нагрузки, соответственно у последней он составил наименьшее значение.

Вывод: минимальные потери достигаются в варианте 4, наилучший коэффициент использования – в варианте 1. Равномерная расстановка тяговых подстанций снижает риск перегрузок, но увеличивает потери электрической энергии; смещение ТП к сложным участкам (подъемам) снижает потери электрической энергии, но повышает пиковые нагрузки.

При увеличении числа поездов на участке происходит рост потерь электрической энергии. Коэффициент использования в варианте 1 для ТП2–ТП4 при этом будет стремиться к 1 при интервале, когда в межподстанционной зоне оказывается только один поезд. В варианте 4 – аналогичная тенденция, но на ТП1 коэффициент использования оборудования на 15% ниже, разница уменьшается с ростом интенсивности движения.

Заключение. Предложенный метод приведения нагрузки к стационарному эквиваленту позволяет обоснованно выбрать количество и расположение тяговых подстанций с учетом профиля пути, массы поездов и межпоездных интервалов. Это сокращает число итераций моделирования и повышает достоверность проектных решений.

Установлено, что равномерная расстановка тяговых подстанций обеспечивает оптимальное использование ресурса оборудования, но увеличивает потери электрической энергии. частая установка ТП на сложных участках снижает потери электрической энергии

ценой роста пиковых нагрузок. При циклическом движении потери энергии присутствуют во всех вариантах, что позволяет использовать результаты одиночного поезда как базовые для предпроектных исследований электрифицируемого участка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57670-2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров.
2. Гаранин, М. А. Совершенствование расчета наличной пропускной способности железных дорог постоянного тока по условиям электроснабжения : специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гаранин Максим Алексеевич. – Самара, 2004. – 24 с. – EDN NHVBFH.
3. Митрофанов А. Н., Добрынин Е. В., Митрофанов С. А. Алгоритм формирования множеств допустимых значений энергообеспеченности для интеллектуальных систем пропуска тяжеловесных поездов // Электротехника. 2020. № 3. С. 41–45.
4. Жарков Ю. И., Митрофанов А. Н., Окладов С. А., Потейко А. Н. Идентификация удельного расхода электрической энергии на тягу поездов в границах железных дорог // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 3(111). С. 47–57.
5. Гаранин М. А., Блинкова С. А. Выбор мероприятия по усилению системы тягового электроснабжения // Наука и образование транспорту. 2013. № 1. С. 235–237.
6. Гаранин М. А., Загорский В. А., Блинкова С. А. Усиление системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 1(55). С. 30–34.
7. Добрынин Е. В., Табаков О. В., Гордеев И. П., Плохов Е. М. Учет распределения тока в тяговой сети при проектировании и усилении контактной подвески // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 2(80). С. 16–21.
8. Добрынин Е. В., Мухарямов Р. И., Окладов С. А. Анализ распределения нагрузки в тяговой сети // Инновации в системах обеспечения движения поездов: Матер. I Междунар. науч.-практ. конф. Самара, 2016. С. 80–82.
9. Гаранин, М. А. Оценка энергообеспеченности участков железной дороги / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Наука и образование транспорту. – 2014. – № 1. – С. 211–214. – EDN TGLWUL.

УДК 621.31

КОМПЛЕКС ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

И. А. Сафронова

Приволжский государственный университет путей сообщения

Для мониторинга технического состояния оборудования тяговых подстанций железнодорожного транспорта, где есть проблема отсутствия ранней диагностики отказа оборудования, необходима разработка системы, основой которой будет метод подобия, сравнивающий текущее состояние оборудования с предыдущим. Внедрение такой системы позволит:

- В значительной мере снизить стоимость обслуживания оборудования тяговых подстанций железнодорожного транспорта;
- Предотвратить 80 % отказов оборудования и, соответственно, простоев поездов;
- Снизить удельный расход электроэнергии на тягу поездов [1, 2];
- Уменьшить человеческий фактор;

– Проводить ремонтные и профилактические работы не по графику, а по техническому состоянию оборудования [3].

Программно-технический комплекс предиктивной аналитики должен осуществлять непрерывный мониторинг и диагностику, оценку ресурса оборудования, а также анализ и прогнозирование изменения технического состояния оборудования системы электроснабжения железнодорожного транспорта.

Объектом мониторинга является совокупность агрегатов тяговой подстанции, а именно – трансформаторы (в среднем 6 устройств), выпрямительные агрегаты (если тяговая подстанция на постоянном токе – 2 устройства, если на переменном – они отсутствуют), выключатели (в среднем 10 устройств), быстродействующие выключатели (если тяговая подстанция на постоянном токе – в среднем 5 устройств, если на переменном – они отсутствуют). Каждое устройство тяговой подстанции оснащается набором необходимых датчиков для снятия параметров и контроля технического состояния [4].

Для тяговой подстанции, которая оснащается данной системой, создается эмпирическая модель, в которой будет производиться сравнение параметров за определенные промежутки времени. Базовый период – нормальное рабочее состояние оборудования, именно с ним в процессе эксплуатации будет производиться сравнение технических параметров в режиме реального времени с целью обнаружения отклонений технического состояния оборудования. Предлагаемая модель тяговой подстанции представляется в виде многомерной сети, структуру которой составляют узлы и межузловые связи [5, 6]. За основу взято использование статистического алгоритма [7].

Изменение в работе оборудования тяговой подстанции автоматически определяется предлагаемой системой, что предупреждает о зарождении или развитии дефекта деталей и устройства в целом. Система чувствительна даже к малейшим изменениям параметров, что говорит о ее повышенной точности и надежности. Она способна обнаруживать отклонения в работе оборудования на самых ранних стадиях, это позволит контролировать и легко определить направление поиска дефекта [8, 9].

После накопления определенного объема статистических данных система автоматически корректирует эмпирическую модель, создается пакет правил для каждого устройства тяговой подстанции железнодорожного транспорта.

Архитектура предлагаемой системы (рис. 1).

Программно-технический комплекс интегрируется в существующую АСУ ТП тяговой подстанции, количество подключаемого оборудования не ограничено.

Сигналы с датчиков и приборов оборудования поступают на нижний уровень, расположенный на тяговой подстанции

Данные параллельно транслируются на сервер верхнего уровня по защищенному каналу связи. Такой сервер предназначен для хранения большого объема данных в течение длительного периода.

Затем информация передается в экспертно-аналитический отдел для дальнейшего анализа и обработки. Обработка данных также даёт возможность спрогнозировать выход из строя того или другого оборудования при определенных условиях работы (нагрузке).

После анализа полученной информации формируются и предлагаются рекомендации для устранения дефектов или неисправностей (при их наличии)

Рекомендации передаются начальнику тяговой подстанции и начальнику дирекции по энергообеспечению.

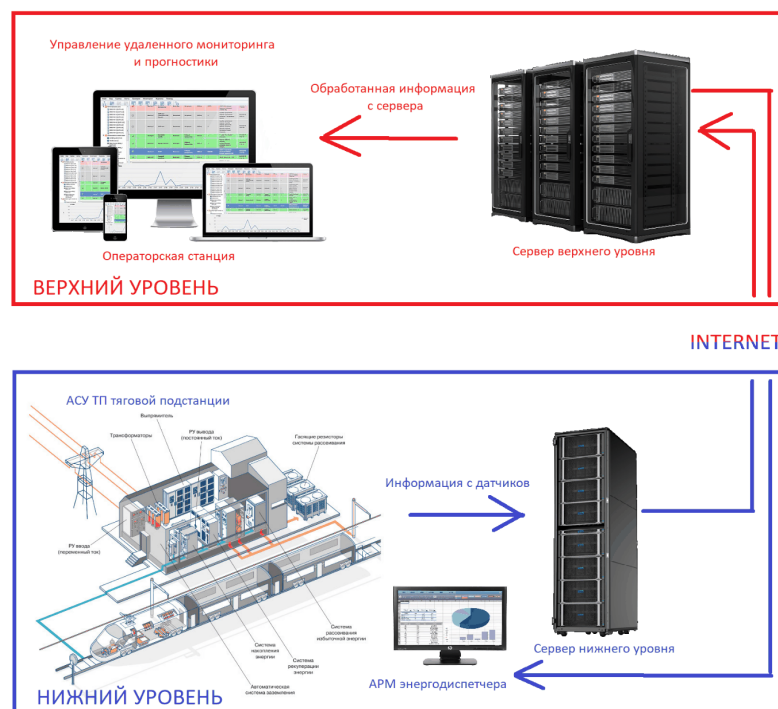


Рис. 1. Архитектура предлагаемой системы

Функции предлагаемой системы:

Построение математической модели нормальной работы оборудования с учетом особенности его работы

Оповещение системой о фиксации отклонений в работе оборудования

Определение причины и места отклонений параметров в оборудовании

Прогнозирование безотказной работы оборудования

Планирование и автоматическое включение резервного оборудования

Хранение большого объема данных

Вынесение рекомендаций по дальнейшей работе оборудования

Удаленный доступ к данным в режиме реального времени

Бесперебойная работы системы

Внедрение данной системы позволит снизить риск наступлений аварийной или предаварийной ситуации, увеличить межремонтный период за счет раннего обнаружения дефектов в оборудовании и тем самым снизить затраты (до 30 %) на обслуживание оборудования ввиду перехода на ремонт по техническому состоянию деталей и узлов оборудования тяговой подстанции железнодорожного транспорта [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаранин, М. А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2(90). – С. 85–90. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_85. – EDN TUOYML.
2. Блинкова, С. А. Повышение эффективности тягового электроснабжения за счет применения высокотехнологичных накопителей энергии / С. А. Блинкова, О. Н. Козменков // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 2(98). – С. 7–10. – EDN FMFNQZ.
3. Козменков О. Н., Сафронова И. А., Батищев А. М. Совершенствование расчётных моделей определения остаточного ресурса масляных трансформаторов потребителей нефтедобычи // Оборудование и технологии. – 2022. – № 2(128). – С. 13–18.

4. Козменков О. Н., Ефремова И. А. Автоматизированная система мониторинга и оценки технического состояния преобразовательных трансформаторов железнодорожного транспорта // Вестник транспорта Поволжья. 2017. № 5 (69). С. 41–45.
5. Гаранин, М. А. Разработка цифровой модели для управления энергетическим комплексом / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 3(75). – С. 22–27. – EDN JSYDYX.
6. Гаранин, М. А. Моделирование системы тягового электроснабжения с использованием накопителей энергии / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2(90). – С. 85–90. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_85. – EDN TUOYML.
7. Добрынин Е. В. Ефремова И. А. Цифровая подстанция. Метод реализации // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 1 (79). – С. 16–22.
8. Козменков О. Н. Обеспечение бесперебойного электроснабжения железнодорожного транспорта за счёт автоматизации процессов контроля, управления и планирования действий с ресурсами // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 2 (50). – С. 21–26.
9. Правила устройства электроустановок: 7-е издание (ПУЭ)/ Главгосэнергонадзор России. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. 610 с
10. Добрынин Е. В., Бошкарева Т. В., Табаков О. В. An overhead line voltage monitoring system // Russian electrical engineering. – 2020/ – № 3.-С. 191–194.

УДК 621.311

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ЗАМБИИ: ПОДДЕРЖКА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, СНИЖЕНИЕ ДЕФИЦИТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ВНЕДРЕНИЕ МЕР ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ВЫБРОСОВ

А. С. Тамбатамба, М. В. Шевлюгин, Ф. Н. Нам, Т. А. Салахов

Российский университет транспорта (МИИТ)

Введение. Энергетический сектор Замбии в значительной степени зависит от гидроэнергетики, которая составляет 83% от установленной мощности в 3871 МВт, при этом на тепловые источники приходится 13,8%, а вклад солнечной энергии ограничен [1, 2]. Периодические засухи серьезно сократили выработку гидроэнергии, что привело к общенациональному энергетическому кризису, когда веерные отключения продолжаются до 20 часов в день, пиковый спрос достигает 2400 МВт, но эффективное доступное энергоснабжение часто падает ниже 1500 МВт [12, 42]. Важнейшим перспективным направлением является строительство электрифицированной железной дороги Джимбе–Казунгула протяженностью 1350 км. В предыдущих исследовательских работах этого автора представлены результаты моделирования ЕТАР eTгах, учитывающие топографию, конфигурацию поездов, расписание движения и схему тягового электроснабжения, которые показывают пиковые потребности предлагаемой электрифицированной железной дороги в 127,4 МВт (2035) и 148,7 МВт (2050). Острый дефицит электроэнергии, усугубляемый спросом на железную дорогу, угрожает экономической стабильности и энергетической безопасности Замбии, поскольку снижение нагрузки, по прогнозам, сохранится по крайней мере до 2027 года, несмотря на интеграцию солнечной энергии мощностью 1000 МВт [3–5]. Целью данного исследования является определение дополнительного потенциала тепловой энергии (в МВт), доступного из доказанных запасов угля в Замбии, для поддержки электрификации железных дорог и сокращения текущего дефицита энергии, а также критическая оценка необходимых стратегий контроля выбросов.

Конкретными целями являются: Оценка текущих мощностей по производству электроэнергии в Замбии и прогнозирование общего дефицита энергии, включая новый спрос в связи с электрификацией железных дорог; Расчет устойчивой тепловой мощности с использованием формул, основанных на резервировании, и стандартных технических параметров; Обзор передовых технологий контроля выбросов, применимых к современным угольным электростанциям; Обсудить техническую и политическую целесообразность расширения угольной энергетики с ограничением выбросов в конкретных условиях Замбии [4].

Обзор литературы: У Замбии есть свой уголь – и это вполне реальная альтернатива для базовой нагрузки, особенно когда речь идёт об экономических рисках и угрозах энергобезопасности из-за дефицита электричества. Подтверждённые запасы составляют 80 миллионов тонн, они находятся в Южной провинции, на месторождении Маамба. А по некоторым оценкам, ресурс там может достигать и до 945 миллионов тонн. Так что угольная генерация вполне может стать логичным «мостиком» в переходный период [5–7].

Согласно официальным данным Геологической службы Замбии [5] и отчётам Министерства горнодобывающей промышленности и развития полезных ископаемых [6], утверждённые запасы месторождения Маамба составляют 80 млн. Расширенная оценка ресурсной базы в 945 млн тонн основывается на геофизических исследованиях 2018–2022 гг., проведённых совместно с Китайской корпорацией по разведке угля [7]. Верификация этой оценки планируется в рамках программы бурения дополнительных разведочных скважин на 2025–2027 гг. [Zambia Geological Survey, Technical Report No. 45, 2023; MMD, 2024].

Сейчас главная угольная станция страны – это Маамба, 300 МВт, но уже идёт расширение до 600 МВт [20, 23]. И что показательно: Замбия вместе с соседним Зимбабве снова запустили простаивавшие угольные блоки – чтобы хоть как-то закрыть текущие дефициты. Это лишний раз подтверждает: без тепловой генерации в Африке пока не обойтись [4].

В национальных планах, например, в Интегрированном ресурсном плане Замбии (IRP), к 2030 году заложена общая мощность в 10 000 МВт, из которых на уголь должно приходиться 13–20% [2, 3].

Что касается экологии – технологии очистки на угольных станциях уже давно не новость. ФДГ (FGD) даёт улавливание SO_x на уровне 90–98%, селективное каталитическое восстановление (SCR) снижает NO_x на 80–90%, а электрофильтры задерживают больше 99% твёрдых частиц [46, 50]. Более перспективная технология – улавливание и хранение углерода (CCS); она позволяет захватывать до 90% CO₂, но для развивающихся стран её высокая стоимость остаётся серьёзным барьером [8, 11].

В Африке, особенно в ЮАР, уже есть примеры успешной интеграции таких систем с гибридными возобновляемыми источниками [9, 10]. Однако для Замбии глубоких технико-экономических исследований по внедрению современных систем очистки по-прежнему не хватает – и это серьёзный пробел

Методология: В этом исследовании использовали детерминированное моделирование, чтобы прикинуть возможную мощность угольной генерации – на основе опубликованных данных о запасах и обычных инженерных формулах. Всё построено исключительно на открытых источниках: научных статьях, правительственных отчётах и отраслевых обзорах.

Моделирование спроса на железнодорожные перевозки (ETAP eTrax): В предыдущем исследовании этого же автора пик нагрузки для железной дороги Джимбе–Казунгула считали в ETAP eTrax. Учили всё: профиль пути (SRTM, шаг 10 км), поезд из 30 вагонов и локомотива

ЗЕС5К весом 2238 тонн, график движения (20 поездов в сутки к 2035 году и 48 – к 2050-му), сеть 25 кВ, 33 подстанции с двухсторонним питанием. Шаг расчёта – 20 секунд, период – сутки. Результат: пик 127,4 МВт (2035) и 148,7 МВт (2050). Средние оценки – 60–80 и 90–110 МВт соответственно.

Оценка текущего дефицита электроэнергии: Общий дефицит энергии рассчитывается путем суммирования пикового национального спроса и смоделированного спроса на железнодорожном транспорте.

Пиковый национальный спрос, $D=2400$ МВт

Доступная эффективная выработка гидроэнергии $P_r=1500$ МВт. Как получили 1500 МВт для засушливого периода? Установленная мощность гидростанций Замбии – около 3200 МВт: Карриба (1080), Кафуэ-Нижняя (750), Кафуэ-Верхняя (990), Виктория–Фолс (108) и другие [3, 7]. При засухе 2024–2025 годов уровень воды в Карибе упал ниже 10% – выработка там снизилась до 300 МВт. Вот и применили коэффициенты: для Карибы 30% (324 МВт), для Кафуэ 70% (1218 МВт), для остальных 80%. Это подтверждают отчёты ZESCO за конец 2025 года [1, 2].

Текущая выработка тепловой энергии (Маамба), $P_r=300$ МВт.

Текущий дефицит электроэнергии (без учета железной дороги)

$$\Delta = D - (P_r + P_t) = 2400 - (1500 + 300) = 600 \text{ МВт}$$

Спрос на электроэнергию для электрифицированной железной дороги

$$R_{20} = 127.4 \text{ МВт (пик)}$$

$$R_{48} = 148.7 \text{ МВт (пик)}$$

Общий дефицит мощности (с учётом железной дороги)

$$\text{Для 20 поездов: } G_{20} = \Delta + R_{20} = 600 + 127.4$$

$$\text{Для 48 поездов: } G_{48} = \Delta + R_{48} = 600 + 148.7$$

Устойчивая энергетическая мощность за счет разведанных запасов угля была рассчитана с использованием установленных параметров:

Доказанные запасы, $R_d = 80$ Миллион тонн (т) .

Желаемый срок службы шахты, $L = 50$ лет.

$$\text{Годовая добыча угля, } P_a = \frac{R_d}{L} = \frac{80}{50} = 1.6 \text{ т/год.}$$

Для установки по производству сверхкритической угольной пыли:

Норма расхода угля , $C=350$ г/кВтч (эквивалентно скорости нагрева около 10,000 кДж/кВтч при КПД 35%).

Коэффициент использования установленной мощности (электростанции) КИУМ=0.8

Годовое количество часов работы при коэффициенте использования установленной мощности (КИУМ) , $H=8,760$ часов/год $\times 0.8=7008$ часов/год

Годовая выработка электроэнергии на 1 МВт установленной мощности, $E_{ann}=7,008$ МВтч/МВт – год.

$$\text{Расход угля на 1 МВт·год (или на МВт в год), } T = C \cdot E_{год} = \frac{350 \frac{\text{г}}{\text{кВтч}} \cdot 7008 \text{ кВтч}}{1000000} = 2453 \text{ т/МВт – год}$$

Таким образом, общая устойчивая (или гарантированная) мощность (Сар) составляет:

$$\text{Сар} = \frac{P_a \cdot 1000\,000}{T} = \frac{1.6 \cdot 1000\,000}{2,453 \text{ т/МВт-год}} = 652 \text{ MW.}$$

Это представляет собой общий потенциальный объём мощности. При текущей мощности электростанции «Маамба» в 300 МВт и ведущемся расширении до 600 МВт, чистый дополнительный потенциал от 80 млн тонн резервной базы составляет около 52 МВт после завершения расширения.

50-летний срок службы шахты был выбран для согласования с долгосрочным горизонтом планирования национальных инфраструктурных проектов и для обеспечения устойчивого использования ресурсов. Коэффициент использования установленной мощности 80% является стандартным допущением для современных сверхкритических угольных электростанций, работающих в качестве надёжной базовой нагрузки. Расчёт «резервы – мощность» выполнен в соответствии с установленными инженерными принципами оценки ресурсной базы [8].

Был проведён анализ чувствительности с использованием более крупного, неподтверждённого ресурса, специфичного для месторождения «Маамба», объёмом 173 млн тонн [7]. При $R_{\Pi} = 80$ Миллион тонн (т), общая потенциальная мощность $S_{арм}$ возрастает до 7705 МВт. После расширения на 600 МВт это даёт чистый дополнительный потенциал ($S_{арм, доп. м}$) 7105 МВт. Соответствие ключевым допущениям было проверено путем варьирования срока службы шахты (L) в пределах 30–70 лет и коэффициента производительности (CF) в пределах 0,7–0,9.

Был проведен качественный обзор технологий контроля дожигания с акцентом на их применимость в условиях Замбии. Оцениваемые технологии включают:

Контроль выбросов NO_x: Селективное каталитическое восстановление (SCR) с впрыскиванием мочевины с эффективностью удаления (η_{NOx}) 80–90%.

Контроль содержания SO_x: Влажная десульфурация дымовых газов (FGD) известняковым шламом с эффективностью удаления (η_{SOx}) >95%.

Контроль образования твердых частиц: электрофильтры (ESP) или тканевые фильтры с эффективностью удаления (η_{PM}) >99%.

Контроль выбросов CO₂: Улавливание и хранение углерода на основе аминов (CCS) с эффективностью улавливания (η_{CO2}) ~90%, но со значительным снижением производительности установки на 20–30%.

Результаты и обсуждение: Базовый расчёт на 80 МТ даёт 652 МВт, что покрывает примерно 60% от общего дефицита в 1 090 МВт. При оценке запасов в 945 МТ потенциальная мощность вырастает до ~7 705 МВт. После расширения Маамбы до 600 МВт остаётся ~7 105 МВт дополнительной мощности – этого хватает с избытком, и Замбия становится нетто-экспортёром электричества.

Таблица 1

Сценарии угольной генерации

Параметр	Базовый (80 МТ)	Расширенный (945 МТ)
Запасы угля	80 МТ	945 МТ
Устойчивая мощность	652 МВт	~7 705 МВт
Текущая мощность Маамба	300 МВт	300 МВт
Планируемое расширение	600 МВт	600 МВт
Чистый доп. потенциал	52 МВт	~7 105 МВт
Общий дефицит	1 090 МВт	1 090 МВт
Покрытие дефицита	~60%	>100% (экспорт)
Необходимая добыча	~1,6 МТ/год	~18,9 МТ/год

Таблица 2

Анализ чувствительности (80 МТ)

Сценарий	Срок службы	Коэфф. использ.	Мощность	Добыча в год
Базовый	50 лет	80%	652 МВт	1,6 МТ
Короткий срок	30 лет	80%	~1 086 МВт	2,67 МТ
Долгий срок	70 лет	80%	~466 МВт	1,14 МТ
Высокое использование	50 лет	90%	~733 МВт	1,6 МТ

Сейчас на Маамбе добывают ~0,74 МТ/год для 300 МВт. Чтобы выйти на ~18,9 МТ/год, нужны колоссальные вложения [6]. Ограничения: добыча, вода, сеть и экология.

SCR и горелки снижают NO_x ниже 50 мг/Нм³; FGD и ESP дают SO_x и PM <10 мг/Нм³; CCS улавливает до 90% CO₂, но съедает 20–30% мощности [5]. CCS дорог (+15–20% к стоимости) и в Замбии геология не изучена. Реалистичный план: 1 этап (2028–2032) – изыскания; 2 этап (2033–2038) – пилот для удобрений; 3 этап (2040+) – полный CCS только с международным финансированием. Приоритет – SCR, FGD и ESP.

Технико-экономическая оценка CCS для Замбии: Для объективной оценки применимости технологий улавливания и хранения углерода в условиях Замбии был проведён анализ по трём ключевым измерениям: техническая зрелость, экономическая целесообразность и институциональная готовность.

Таблица 3

Оценка применимости CCS в Замбии

Параметр	Оценка	Обоснование
Техническая зрелость (0–10)	6.0	Технология подтверждена на коммерческом уровне в развитых странах, но отсутствует локальный опыт эксплуатации
Капитальные затраты (млн USD/МВт)	1.2–1.8	Дополнительные затраты составляют 15–20% от CAPEX базовой станции
Эксплуатационные затраты (USD/т CO ₂)	50–80	На 30–50% выше, чем в развитых странах из-за отсутствия локального производства реагентов
Снижение эффективности станции	20–30%	Стандартный показатель для систем пост-сжигания на основе аминов
Потенциальные хранилища CO ₂ в Замбии	Неизвестно	Требуются геофизические исследования (ориентировочная стоимость: \$15–25 млн)
Институциональная готовность (регулирование)	2.0	Отсутствуют нормативные акты по улавливанию, транспортировке и хранению CO ₂

Рекомендуемый дорожный план для CCS:

Фаза 1 (2026–2029): Проведение геофизических исследований для выявления потенциальных хранилищ (глубокие солёные водоносные горизонты, истощённые газовые месторождения) в районе Маамба.

Фаза 2 (2028–2032): Создание нормативно-правовой базы для CCS в сотрудничестве с Международным энергетическим агентством (МЭА) и Всемирным банком. Оценка возможности использования CO₂ для повышения нефтеотдачи (EOR) или производства синтетического топлива.

Фаза 3 (2035–2040+): Пилотный проект CCS мощностью 50 МВт с привлечением международного финансирования (МВФ, Зелёный климатический фонд).

По воде: ТЭС нужен объём, а не напор. Карибы хватит даже в засуху. Альтернативы – сухое охлаждение (экономия воды 80–90%) и DSI для SO_x (50–70% удаления, без воды).

Детальная оценка водных ресурсов для угольной генерации: Для количественной оценки водопотребления угольных электростанций в условиях засушливого периода была разработана модель водного баланса для трёх сценариев: существующая станция (300 МВт), расширенная станция (600 МВт) и гипотетическая новая станция (1200 МВт).

Таблица 4

Водопотребление угольных ТЭС в условиях Замбии

Параметр	Ед. изм.	300 МВт	600 МВт	1200 МВт
Тип охлаждения		Влажное (мокрое)	Влажное	Сухое (гибридное)
Водопотребление на охлаждение	м³/МВт·ч	2.8–3.5	2.8–3.5	0.3–0.5
Водопотребление на технологические нужды	м³/МВт·ч	0.2–0.3	0.2–0.3	0.2–0.3
Общее водопотребление	м³/ч	840–1140	1680–2280	360–720
Годовое водопотребление	млн м³/год	7.4–10.0	14.7–20.0	3.2–6.3

Сравнение с доступными водными ресурсами озера Кариба (полезный объём ~45 км³, или 45 000 млн м³): годовое испарение с поверхности озера: ~1.5 км³ (~3.3% от полезного объёма); водопотребление ТЭС 600 МВт (влажное охлаждение): 15–20 млн м³/год (~1.3% от испарения); водопотребление ТЭС 1200 МВт (сухое охлаждение): 3–6 млн м³/год (~0.4% от испарения)

Таким образом, даже при сохранении влажного охлаждения, водозабор для угольной генерации составляет менее 1.5% от естественных потерь на испарение, что делает риски для гидроэнергетики минимальными [6, 8]. Рекомендация: Приоритетное использование гибридной системы охлаждения (сухое охлаждение с аккумуляцией тепла) для новых блоков позволит сократить водопотребление на 80–90% и обеспечить бесперебойную работу в экстремальные засушливые периоды. Сравнение LCOE (упрощённое).

Уголь с очисткой (0,07–0,09 USD/кВт·ч) вполне конкурентоспособен по сравнению с солнечной генерацией с накопителями. Для железной дороги, которой нужна стабильная нагрузка без перебоев, уголь даёт то, чего не видно в простом сравнении LCOE – надёжность и гарантированную мощность. Полный техно-экономический анализ – задача для следующих исследований.

Заключение. Даже при скромных 80 млн тонн угля Замбия может получить 652 МВт – это закрывает 60% дефицита вместе с железной дорогой. А если брать реальные запасы Маамбы (945 млн тонн), выходит уже ~7 705 МВт, а после расширения станции до 600 МВт

остаётся ~7 105 МВт сверху. Этого хватит не только на покрытие всех дыр (1 090 МВт), но и на экспорт в SADC.

Таблица 5

Ориентировочный LCOE для Замбии (USD/кВт·ч)

Технология	LCOE (USD/кВт·ч)
ГЭС (существующие)	0,03 – 0,05
Уголь (без очистки)	0,05 – 0,07
Уголь + FGD + SCR + ESP	0,07 – 0,09
Солнечные панели (крупные)	0,04 – 0,06
Солнечные + 4ч аккумуляторы	0,08 – 0,12
Уголь + CCS (гипотетически)	0,12 – 0,18

Проблема не в угле, а в том, чтобы нарастить добычу с нынешних 0,74 млн тонн в год до почти 19 млн. Плюс вода и экология. Технологии очистки (SCR, FGD, ESP) есть и работают. CCS – дело далёкое, без внешних денег и геологии не сдвинется.

Что делать: ускорить расширение Маамбы до 600 МВт, параллельно вкладываться в разведку и добычу, а очистку вводить поэтапно. Тогда уголь станет нормальным мостиком к стабильной энергосистеме – и для железной дороги, и для всей страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазунов, А. А. Проектирование районной электрической сети: методические указания к курсовому проектированию / А. А. Глазунов, Г. В. Шведов. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2010. – 72 с. – EDN [при наличии].
2. Тамбатамба, А. Особенности электрификации скоростных железнодорожных магистралей в Замбии / А. Тамбатамба // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 6(102). – С. [указать страницы]. – EDN [при наличии].
3. Тамбатамба, А. С. Электротехническое проектирование электрифицированной высокоскоростной железнодорожной системы, соединяющей Лусаку и Китве / А. С. Тамбатамба, М. В. Шевлюгин // [Название сборника или журнала]. – 2023. – С. 246–250. – EDN [при наличии].
4. Тамбатамба, А. С. Оценка способности энергосистемы Замбии выдерживать большие тяговые нагрузки / А. С. Тамбатамба, М. В. Шевлюгин, Т. А. Салахов // Вестник Трассиба. – 2024. – № 3(59). – С. [указать страницы]. – EDN [при наличии].
5. Zambia Geological Survey Department (GSD). Technical Report No. 45: Maamba Coalfield Resource Assessment Update 2023. – Lusaka: GSD, 2023. – 78 p.
6. Ministry of Mines and Minerals Development (MMD). Zambia Mining and Minerals Development Policy 2023–2030. – Lusaka: MMD, 2024. – 42 p.
7. China Coal Geology Corporation (CCGC). Geophysical Survey Report for Maamba Coalfield Extension. – Beijing: CCGC, 2022. – 150 p.
8. World Bank. Water-Energy Nexus in Southern Africa: Opportunities for Coal Power in Water-Stressed Regions. – Washington, DC: World Bank, 2023. – 120 p.
9. International Energy Agency (IEA). CCUS in Developing Countries: Policy and Investment Framework. – Paris: IEA, 2024. – 80 p.
10. Global CCS Institute. The State of Carbon Capture and Storage 2024. – Melbourne: GCCSI, 2024. – 120 p.
11. International Monetary Fund (IMF). Zambia: Economic Diversification and Energy Export Potential. – Washington, DC: IMF, 2024. – 60 p.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КОНТАКТНОГО ПРОВОДА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЕГО ИЗНОСА В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Н. Л. Топорова

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. В России почти половина (43%) электрифицированных магистралей работает на постоянном токе, это самый тяжелый режим с точки зрения токовых и тепловых нагрузок. Рост этих нагрузок ведет к отказам узлов контактной сети. Без понимания того, какие именно тепловые процессы идут в проводе при эксплуатации, не обойтись. От исправной работы контактного провода зависит вся система электроснабжения, так как именно по нему энергия от подстанции поступает на электропоезда. На линиях постоянного тока напряжение низкое, зато токи достигают больших величин, поэтому вопрос теплового режима провода стоит актуально.

В реальных условиях на провод действуют несколько факторов: это погодные условия, нагрев от проходящего тока, постоянное трение о токоприемник, электрохимическая коррозия и натяжение провода в процессе натяжки. Рост веса составов, скоростей движения и потребляемой мощности заставляет по-новому взглянуть на тепловые процессы, протекающие в контактной подвеске [1]. Линии, работающие в условиях возросших перевозок нуждаются в диагностике, необходимо понимание, где именно возникают перегрузки по току и нагреву.

Рассмотрим, как именно тепловой режим влияет на износ контактного провода и какие существуют способы, чтобы замедлить этот процесс. Износ провода делят на механический и электрический. Но в последнее время все чаще говорят о «тепловом износе» – особенно для медного провода. Само по себе тепловое воздействие способно разрушать материал без видимого истирания или электрической эрозии [2].

Так откуда берется тепло в контактном проводе:

Нагрев рабочим током (резистивный).

Согласно закону Джоуля-Ленца, погонная мощность, выделяемая в проводе, рассчитывается по формуле:

$$Q=I^2R_{\text{пг}}(t) \quad (1)$$

где I – ток в проводе,

$R_{\text{пг}}$ – погонное сопротивление, зависящее от t – температуры.

Возникает эффект положительной обратной связи, рост температуры увеличивает сопротивление, что в свою очередь вызывает дополнительное тепловыделение. Это явление опасно при аварийных режимах и перегрузках.

Нагрев в зоне скользящего контакта.

Дополнительным источником нагрева является тепловыделение в скользящем контакте между контактным проводом и токосъемными пластинами токоприемника. Этот процесс можно охарактеризовать двумя составляющими:

Ток идет через переходное сопротивление в точке касания – оно всегда выше, чем сопротивление целого провода, поэтому выделяется добавочное тепло.

Механическая работа силы трения.

Когда поезд движется, реальная площадь касания очень мала, контакт получается почти точечным. Температура в зоне контакта сильно изменяется, механические свойства провода падают.

Дуга при отрыве токоприемника.

Самый опасный случай, когда контакт между пантографом и проводом кратковременно теряется, и в разрыве загорается электрическая дуга. Возникающая на долю секунды, она успевает пропускать через себя тяговый ток. Эти явления не учитываются и не нормируются при оценке взаимодействия пантографа с контактной сетью, однако они ускоряют износ и нарушают работу тяговых систем.

Если мощность дуги и время ее горения достаточно велики, выделившегося тепла хватит не только на разогрев, но и на расплавление материала провода в точке удара дуги.

Тепловой износ, по сути, термическое разупрочнение участка провода под действием коротких, но интенсивных тепловых импульсов. Когда токоприемник кратковременно теряет контакт с проводом, между ними загорается электрическая дуга, и через нее продолжает протекать ток нагрузки, дуга нагревает поверхность провода. При повторяющихся разрывах контакта такие изменения накапливаются, в итоге пропадают прочностные характеристики провода.

У теплового износа есть особенность, он может идти, а сечение провода при этом визуально не меняться, но при этом меняется внутренняя структура металла. Механический износ всегда приводит к уменьшению площади сечения. Оба вида износа снижают несущую способность провода и делают его обрыв более вероятным.

Исследования показывают, что скорость движения поезда существенно влияет на тепловой режим контакта. Чем выше скорость, тем ниже контактная температура дуги. При малой скорости дуга дольше держится на одном участке провода, и локальные повреждения получаются глубже.

В режиме торможения контакт греется сильнее, чем при разгоне или равномерном движении. Согласно экспериментальным данным, максимальная зафиксированная контактная температура составляет 332K (около 59°C) [3].

Другие эксплуатационные факторы, влияющие на допустимый ток провода, включают в себя температуру окружающей среды, скорость ветра и условия теплообмена.

Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» предполагает внедрение высокопроизводительных методов диагностики инфраструктуры. Один из них тепловизионный контроль контактной сети.

Тепловизор позволяет выявлять перегретые участки, дефектные соединения и зоны с повышенным переходным сопротивлением. Однако для эффективного использования тепловизора необходимы теоретические критерии поиска дефектов на основе анализа тепловых полей.

Выводы. Конфигурация токосъемных пластин существенно влияет на тепловой режим контакта. Эксперименты показывают: двухпантографная четырёхугольная схема даёт температуру дуги около 370K – почти у критической границы. А однопантографная двухугольная схема разогревает дугу до 440K – это уже выше допустимого, и работоспособность сети падает [4]

Согласно исследованиям с применением метода Тагучи, постоянный ток является наиболее важным фактором, влияющим на износ и температуру токосъемников. Нормальное усилие является вторым по значимости фактором, а скорость скольжения – наиболее слабым.

Оптимизация параметров может быть достигнута путем:

подобрать совместимую пару «угольная вставка – провод Cu–Ag»;
выставить оптимальное нормальное усилие;
согласовать силу постоянного тока и скорость скольжения.

Тепловой режим контактного провода является определяющим фактором износа и ресурса в системах тягового электроснабжения постоянного тока. Основными источниками тепловыделения являются резистивный нагрев, электрическая дуга при нарушении контакта, нагрев в скользящем контакте.

Понятие «теплого износа» позволяет описать процесс термического разупрочнения материала провода.

Условия окружающей среды, скорость движения и режим эксплуатации влияют на тепловой режим контактного провода. Наибольшую опасность представляют режимы с низкой скоростью движения и торможения.

Тепловизионная диагностика и метод оценки по величине теплового износа позволяют находить перегретые участки и прогнозировать остаточный ресурс.

Снизить тепловые нагрузки можно правильным выбором схемы и оптимизацией параметров токосяема – тока, усилия прижатия и скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаранин, М. А. Расчет энергообеспеченности перевозочного процесса и усиление системы тягового электроснабжения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Транспорт Урала. – 2014. – № 3(42). – С. 109–114. – EDN SVNLMТ.
2. Блиновских Д. В. Оценка износа контактного провода и способа его замены. В сборнике: Студент: наука, профессия, жизнь. Материалы X Всероссийской студенческой научной конференции с международным участием. В 5-ти частях. Омск, 2023. С. 187–193.
3. Батрашов А. Б. Совершенствование электротепловых расчетов и характеристик контактной сети постоянного тока. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – 2019.
4. Никонов И. О., Шелохович А. Е. Анализ мероприятий по снижению износа контактного провода. В сборнике: Молодежная наука. Труды XXIV Всероссийской студенческой научно-практической конференции. В 4-х томах. Редколлегия: В. С. Ратушняк (отв. ред.) [и др.]. 2020. С. 88–92.

УДК 621.331

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ RFID-МЕТОК В ДИАГНОСТИКЕ СЕКЦИОННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Т. В. Харитонова, В. Ф. Путько

Приволжский государственный университет путей сообщения

Введение. Контактная сеть является важным элементом системы тягового электроснабжения [1]. Развернутая длина составляет сотни километров [2:539; 3:149]. Для надежной и качественной эксплуатации на протяжении вот уже ста лет разрабатываются различные устройства и комплексы диагностики.

Для обеспечения безопасности работ на контактной сети, для ее надежности и долговечности всю контактную сеть принято разбивать на электрически независимые участки. Такое деление называется секционированием. И если изолировать несущий трос или усиливающий провод не представляет сложности, в них врезается обыкновенный тарельчатый

изолятор, то секционирование контактного провода осложняется необходимостью соблюдения следующих условий:

надежная изоляция смежных участков контактного провода, в случае нарушения которой возможны человеческие жертвы при выполнении работ;

специальная конструкция, позволяющая осуществлять токосъем и плавное скольжение токоприемника;

простота и удобство эксплуатации и ремонта.

Для деления контактного провода на секции на контактной сети принято применять секционные изоляторы (рис. 1).

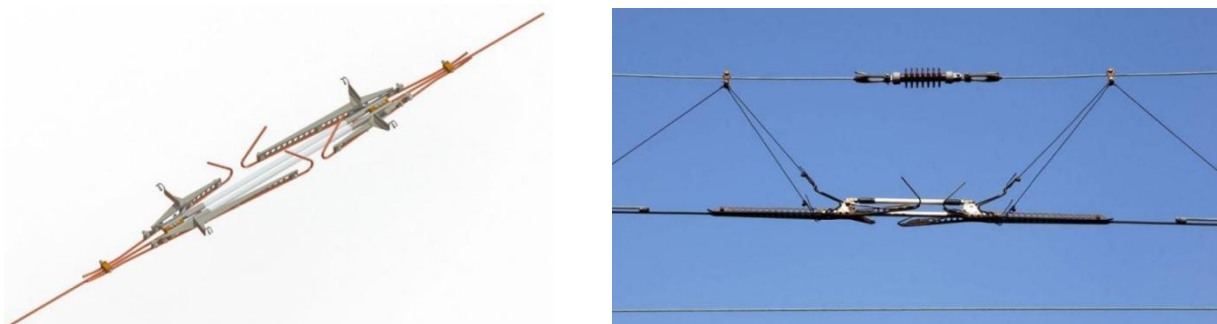


Рис. 1. Секционный изолятор контактной сети

Основная часть. От состояния секционного изолятора напрямую зависит корректная и безопасная работа контактной сети. Для его диагностики используются различные способы и устройства [4–6]:

- вагон-лаборатория фиксирует динамическое воздействие с токоприемником;
- тепловизионные камеры фиксируют возможный перегрев токоведущих частей и места стыковок;
- ультрафиолетовые камеры отслеживают утечку токов;
- при помощи бинокля и простого визуального осмотра контролируется состояние изоляторов.

В рамках данной работы предлагается рассмотреть возможность использования RFID-меток, установленных в местах стыка секционного изолятора и контактного провода. Данная метка способна подавать сигнал на проходящий мимо нее вагон-лабораторию. В случае отсутствия сигнала, система будет давать сигнал о нарушении контакта.

Каждая RFID-метка состоит из (рис. 2):

- антенны;
- интегральной схемы;
- защитного корпуса

Работа метки заключается в следующем: на вагоне-лаборатории устанавливается считывающая система, которая генерирует электромагнитное поле. При прохождении вагона по станции в данное поле попадает метка. Считыватель регистрирует сигнал и передает на компьютер [7–9].

Подобные метки получили в настоящий момент очень широкое распространение в различных сферах.

На транспорте такие метки позволяют:

- учитывать перемещение средств;

- давать разрешение на въезд/выезд;
- учитывать вес груза;
- оплата проезда;
- использование в библиотеках.

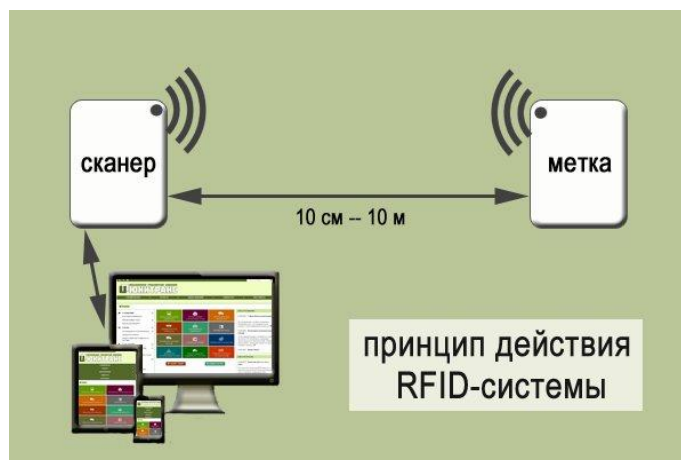


Рис. 2. Принцип работы RFID-метки

Для социальной сферы:

- использование в брелоках для доступа к домофонам, калиткам и т. д. метки для шлагбаумов.

В торговле:

- ведение учета товара;
- защита от хищения;

В медицине:

- используются в специальных браслетах, несущих информацию о группе крови, наличии аллергических реакций;

контроль за пациентами психиатрических клиник, младенцами в родильных домах.

Вывод. Таким образом, можно сделать вывод о том, что RFID-метки имеют широкую область использования и зарекомендовали себя как надежный источник информации. Внедрение таких меток на секционные изоляторы позволит своевременно выявлять случаи ухудшения контакта между контактным проводом и самими изоляторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаранин, М. А. Методика бесконтактной диагностики положения проводов контактной сети электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков // Известия Транссиба. – 2020. – № 4(44). – С. 48–56. – EDN DKTQVO.
2. Блинкова, С. А. Повышение эффективности тягового электроснабжения за счет применения высокотехнологичных накопителей энергии / С. А. Блинкова, О. Н. Козменков // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 2(98). – С. 7–10. – EDN FMFNQZ.
3. Гаранин, М. А. Разработка цифровой модели для управления энергетическим комплексом / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – № 3(75). – С. 22–27. – EDN JSYDYX.
4. Гаранин, М. А. Анализ потенциала применения сквозных цифровых технологий в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков, Т. С. Максимова // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 1(97). – С. 19–27. – EDN EHDVJT.
5. Дмитриев, В. В. Сквозные цифровые технологии на железнодорожном транспорте / В. В. Дмитриев, М. А. Гаранин // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 8. – С. 2–6. – DOI 10.62994/AT.2025.8.8.001. – EDN EQJOCK.

6. Blinkova, S. Development of an Energy System at a Railway Station Using a Gas Turbine Power Station / S. Blinkova, M. Garanin, E. Dobrynin // *Transportation Research Procedia*, Novosibirsk, 25–29 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 538–543. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.105. – EDN OEQNNX.
7. Гаранин, М. А. Модель для расчета энергообеспеченности перевозочного процесса повышенной точности / М. А. Гаранин, Д. А. Никоноров, С. А. Блинкова // *Наука и образование транспорту*, Самара, 29–31 октября 2012 года. – Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2012. – С. 149–151. – EDN RLCPPJ.
8. Харитонова, Т. В. Анализ работы стационарных устройств диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог / Т. В. Харитонова, М. Ю. Ефимов // *Наука и образование транспорту*. – 2025. – № 1. – С. 373–375. – EDN UKTQLV.
9. Фроленков, С. А. Бесконтактная диагностика зажимов контактной сети / С. А. Фроленков, М. А. Гаранин // *Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017) : труды Международной научно-технической конференции*, Самара, 14–16 марта 2017 года. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. – С. 753–755. – EDN YOWQJT.

УДК 621.331

ВЛИЯНИЕ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ НА ОТКАЗЫ УСТРОЙСТВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Т. В. Харитонова¹, С. И. Гусева², М. Ю. Варфоломеева³

¹ *Приволжский государственный университет путей сообщения*

² *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва*

³ *СамКЖТ – филиал ФГБОУ ВО ПривГУПС*

Введение. Электрификация железных дорог берет свое начало с открытия участка Москва-Мытищи в 1929 году и с тех пор вопрос о надёжности контактной сети не перестаёт быть актуальным [1]. Контактная сеть является неотъемлемой частью электрифицированных железных дорог, при непосредственном контакте с токоприемником осуществляется процесс токосъема, от которого напрямую зависит скорость движения поезда и комфорт пассажиров при движении.

Диагностика контактной сети занимает широкое место в науке и технике. Ведущие транспортные ВУЗы и научные школы непрерывно ведут работу по разработке новейших систем предиктивной диагностики [1–3].

Основная часть. Устройства диагностики постоянно модернизировались и прошли большой путь от визуального осмотра до предиктивной аналитики (рис. 1) [4–8].

Проведем анализ отказов устройств контактной сети за последние 10 лет и оценим динамику их количественного изменения.

В таблице 1 приведены данные об отказах за последние 10 лет на примере одной железной дороги. Как видно из таблицы, еще десять лет назад ситуация была очень тяжелой, самыми массовыми повреждениями были поломки токоприемников, отказы изоляторов, разрегулировки воздушных стрелок. Если же посмотреть в левый столбец, то мы видим резкое сокращение с сотен до считанных единиц. И это не случайно. Система диагностики контактной сети 10–15 лет назад состояла из вагона-лаборатории по изучению параметров контактной сети. Только в ходе объезда можно было при помощи инфракрасных камер увидеть пробой изолятора, при помощи тепловизора можно было увидеть локальный нагрев в местах стыковок проводов, обводов и т. д.



Рис. 1. Эволюция средств диагностики устройств контактной сети

Можно смело утверждать, что на сегодняшний момент система диагностики контактной сети работает на предупреждение отказа, а не на фиксацию случившегося.

Вагоны-лаборатории и сейчас несут основную нагрузку по диагностике устройств контактной сети, но такие объезды проводятся один-два раза в месяц, а этого недостаточно.

Таблица 1

Количество отказов в год

	2025	2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015
Изоляторы	3	2	2	4		115	95	125	142	157	136
Регулировка КС			1	4		44	67	58			
Обрывы, пережоги	10	10	14	10	14	100	89	110	145	68	79
Зажимы, детали	5	5	1	8	2	45	70	80	77	87	88
Воздушные стрелки	1		1	2	1	24	25	26	70	68	104
Струны	2	2		4	5	39	33	46	64	51	65
Разъединители, разрядники	2	2		3	1	17	17	40	63	50	48
Секц.изоляторы	1	1	1			10	12	12	19	25	12
Эл.соединители								4			
Узлы компенсации								7			
Опоры		3	1			7	10	11	11	14	14
Метео								45			
Детали											
Поддерж конструкции	1	1		1	1	48	43	30	40	43	114
Поперечины									1	1	2
другие	5	5	4	3	1	128	135		62	220	258
токоприемники из-за КС	22	22	24	14	20	243	253	261	300	157	395
ИТОГО	52	53	49	53	45	820	849	855	994	941	1315

В настоящий момент на помощь вагону-лаборатории пришли современные цифровые датчики, которые способны выполнять целый спектр функций [2–4]:

- контроль температуры;
- контроль положения грузоподъемников;
- фиксация пробоа изоляторов;
- измерение геометрии контактного провода;
- контроль тока утечки;
- измерение натяжения проводов и тросов и др.

Если посмотреть на анализ отказов, можно сказать, что изменилась их структура, на первое место выходят внезапные отказы, а усталостные отказы удается предотвратить практически на 100%.

Система видеонаблюдения позволила резко сократить факты хищений цветных металлов и случаи вандализма.

Вывод. Таким образом, можно сделать вывод о том, что развитие систем диагностики кардинально изменило ситуацию в отказах устройств контактной сети. Современные системы позволяют предотвратить отказ, а не зафиксировать факт его наступления. Дальнейшее развитие позволит сделать контактную сеть надежной и устойчивой к любым внешним факторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинкова, С. А. Повышение эффективности тягового электроснабжения за счет применения высокотехнологичных накопителей энергии / С. А. Блинкова, О. Н. Козменков // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 2(98). – С. 7–10. – EDN FMFNQZ.
2. Дмитриев, В. В. Сквозные цифровые технологии на железнодорожном транспорте / В. В. Дмитриев, М. А. Гаранин // Автоматика, связь, информатика. – 2025. – № 8. – С. 2–6. – DOI 10.62994/AT.2025.8.8.001. – EDN EQJOCK.
3. Митрофанов, А. Н. Построение моделей цифровых двойников электротехнической инфраструктуры железных дорог для оценки ресурса её нагрузочной способности / А. Н. Митрофанов, М. А. Гаранин, С. А. Окладов // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 2–7. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_2. – EDN UFWXMQ.
4. Гаранин, М. А. Повышение точности расчета энергообеспеченности перевозочного процесса / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – № 6(36). – С. 36–40. – EDN PJUNVN.
5. Dobrynin, E. V. Measuring the Geometry of Catenary Devices / E. V. Dobrynin, T. V. Kharitonova, D. A. Kudryashov // AIP conference proceedings : International Scientific Conference “International Transport Scientific Innovation” ITSI-2021, Москва, 29 июня 2021 года. Vol. 2476. – Москва: AIP PUBLISHING, 2023. – P. 020050. – DOI 10.1063/5.0105972. – EDN GMAYCH.
6. Харитонов, Т. В. Разработка технического комплекса диагностики проводов контактной сети электрифицированных железных дорог / Т. В. Харитонов, С. А. Фроленков // Транспортное дело России. – 2025. – № 5. – С. 158–162. – EDN XPMZHN.
7. Харитонов, Т. В. Анализ работы стационарных устройств диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог / Т. В. Харитонов, М. Ю. Ефимов // Наука и образование транспорту. – 2025. – № 1. – С. 373–375. – EDN UKTQLV.
8. Харитонов, Т. В. Своевременное выявление гололедных отложений на проводах контактной сети при помощи цифровой системы / Т. В. Харитонов, О. В. Табаков // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 1(97). – С. 45–49. – EDN PNSRTW.
9. Фроленков, С. А. Бесконтактная диагностика зажимов контактной сети / С. А. Фроленков, М. А. Гаранин // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017) : труды Международной научно-технической конференции, Самара, 14–16 марта 2017 года. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. – С. 753–755. – EDN YOWQJT.

10. Гаранин, М. А. Методика бесконтактной диагностики положения проводов контактной сети электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков // Известия Транссиба. – 2020. – № 4(44). – С. 48–56. – EDN DKTQVO.
11. Гаранин, М. А. Анализ потенциала применения сквозных цифровых технологий в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков, Т. С. Максимова // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 1(97). – С. 19–27. – EDN EHDVJT.
12. Фроленков, С. А. Совершенствование диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог на основе сквозных цифровых технологий : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фроленков Сергей Андреевич, 2024. – 181 с. – EDN QZCVIP.

УДК 621.311

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ МЕТРОПОЛИТЕНА ХАНОЯ: ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭСТАКАДНОГО И ПОДЗЕМНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

М. В. Шевлюгин, Ф. Н. Нам, А. С. Тамбатамба, Т. А. Салахов

Российский университет транспорта (МИИТ)

Введение. Транспортная инфраструктура является фундаментом социально-экономического развития современного мегаполиса. Среди многообразия видов общественного транспорта именно рельсовые системы признаны наиболее эффективным инструментом обеспечения устойчивой мобильности населения и снижения нагрузки на дорожную сеть в условиях стремительной урбанизации.

Актуальность исследования. Быстрый демографический рост и урбанизация столицы Вьетнама привели к критической перегрузке существующей дорожно-транспортной сети, что обуславливает острую необходимость ускоренного развития систем массового транзита (Mass Rapid Transit). Согласно актуальной стратегии развития Управления городской железной дороги Ханоя (MRB), целевая сеть метрополитена проектируется как гибридная инфраструктура, сочетающая подземные и эстакадные участки [1].



Рис. 1. Схема перспективного развития сети городского рельсового транспорта Ханоя

Однако на начальном этапе реализации абсолютный приоритет отдается эстакадному исполнению. Как показывают отчеты Азиатского банка развития (ADB), такой подход продиктован необходимостью снижения начальных капитальных затрат [2] и сложнейшими инженерно-геологическими условиями дельты Красной реки [3]. Вместе с тем интеграция электрифицированного подвижного состава требует строгого соблюдения национальных стандартов электроснабжения [4] и адаптации энергетического оборудования к экстремальным тропическим погодным условиям. Выбор оптимальной архитектуры сети и системы тягового электроснабжения в таких условиях является сложной многокритериальной задачей, требующей глубокого научного анализа.

Цель исследования заключается в проведении комплексного технико-экономического анализа инфраструктурных и энергетических решений для метрополитена Ханоя, с обоснованием выбора эстакадного заложения и системы нижнего токосъёма на начальном этапе развития сети.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

Выполнить сравнительный анализ капитальных затрат и геологических рисков при эстакадном и подземном строительстве в условиях Ханоя.

Проанализировать технические особенности и преимущества системы тягового электроснабжения (третий контактный рельс 750 В постоянного тока с нижним токосъёмом) в сравнении с традиционными решениями.

Оценить компромисс (trade-off) между уязвимостью инфраструктуры к метеорологическим факторам (тропическим ливням) и градостроительными преимуществами (уменьшение габаритов тоннелей, эстетика городской среды).

Научная новизна. Впервые представлен комплексный междисциплинарный подход к оценке целесообразности применения системы электроснабжения через третий рельс с нижним токосъёмом в условиях Ханоя. Проблема рассматривается через призму технико-экономического компромисса между рисками затопления при тропических ливнях, обеспечением электробезопасности пассажиров и оптимизацией затрат на проходку тоннелей. Показана прямая взаимосвязь между выбором энергетической инфраструктуры и снижением строительных издержек в плотной городской застройке.

Обзор литературы

Проблематика проектирования и строительства городского рельсового транспорта в сложных инженерно-геологических условиях Юго-Восточной Азии широко освещена в современной научно-технической литературе. Значительный массив исследований посвящен оценке рисков при возведении инфраструктуры в дельте Красной реки. В частности, в работе Нгуена Т. Х. и Фролова А. В. [5] подробно проанализированы угрозы применения щитовой проходки в водонасыщенных грунтах Ханоя, где отмечается высокая вероятность прорывов плывунов и деформации массива. Схожую проблему рассматривают Ле Куанг Х. и Ким Д. [6], которые с помощью методов численного моделирования доказали, что использование тоннелепроходческих механизированных комплексов с грунтопригрузом (EPB) в историческом центре требует сверхдорогостоящих мероприятий по укреплению грунтов и предотвращению осадок существующих фундаментов. Успешной альтернативой подземному строительству на участках со слабой несущей способностью грунта признано эстакадное исполнение. В техническом отчете инженерной корпорации China Railway Sixth Group [7] подтверждена высокая надежность применения технологии буронабивных свай глубокого заложения (до 70 м), позволившей преодолеть геологические препятствия при возведении эстакад на первой пусковой линии «Катлинь – Хадонг». Финансово-экономическое

обоснование выбора архитектуры линий детально представлено в исследовании Фама В. Т. и Иванова С. Н. [8]. Авторы провели масштабный технико-экономический анализ рельсовых систем в мегаполисах АСЕАН и установили, что удельная стоимость строительства эстакадных участков в 2,5–3 раза ниже подземных (капитальные затраты составляют около 65–70 млн долл. США/км против 170 млн долл. США/км соответственно). Однако, несмотря на глубокую проработку сугубо строительных, геологических и экономических аспектов, в проанализированной литературе практически отсутствует комплексный подход, связывающий выбор архитектуры линии (эстакада или тоннель) с конфигурацией системы тягового электроснабжения. Вопросы оптимизации габаритов тоннелей за счет применения нижнего токосъёма и адаптации контактного рельса к тропическим условиям остаются недостаточно изученными, что формирует четко выраженный пробел в исследованиях и определяет направление данной работы.

Материалы и методы исследования

Исследование базируется на комплексном применении методов технико-экономического анализа (Techno-Economic Analysis, TEA), системного инжиниринга и сравнительной оценки инфраструктурных решений. Объектом исследования выступает транспортно-энергетическая инфраструктура действующих и строящихся линий метрополитена Ханоя (линия 2А и линия 3).

В качестве исходных данных для оценки инженерно-градостроительных параметров использовались технические руководства Tokyo Metro Co. по интеграции эстакадных и подземных рельсовых систем в условиях высокой плотности азиатских городов [9]. Данное руководство послужило методологической базой для сравнения требований к габаритам подвижного состава и тоннелей в зависимости от типа применяемой системы электроснабжения (воздушная контактная сеть против третьего рельса). Для анализа энергетической эффективности и параметров тяговых сетей были привлечены официальные данные из Отчета о потреблении и распределении электроэнергии в транспортном секторе, подготовленного Министерством промышленности и торговли Вьетнама (МОИТ) [10].

Сравнительная оценка систем тягового электроснабжения проводилась по следующим ключевым критериям:

- **Безопасность (Электробезопасность):** Оценка рисков поражения электрическим током при нахождении персонала или пассажиров на путях, а также защищенность контактной сети от экстремальных погодных явлений (тайфуны, ливни).

- **Капитальные затраты (CAPEX):** Влияние габаритов токоприёмного оборудования на общую стоимость проходки тоннелей и возведения эстакад.

- **Эстетика и урбанистика:** Визуальное воздействие инфраструктуры на городской ландшафт.

Для проверки гипотезы о том, что система третьего рельса с нижним токосъёмом является оптимальным компромиссом для Ханоя, было проведено теоретическое сопоставление проектных характеристик энергосистем Ханоя с проверенными временем решениями Московского метрополитена, где технология закрытого контактного рельса доказала свою эффективность и исключительную безопасность.

Результаты

Взаимосвязь габаритов инфраструктуры и системы электроснабжения



Рис. 2. Эстакадный участок линии метрополитена Ханоя (линия 3)

Результаты технико-экономического анализа подтверждают прямую зависимость между выбором системы тягового электроснабжения и капитальными затратами на строительство. В условиях Ханоя отказ от традиционной воздушной контактной сети (ВКС) в пользу системы третьего (контактного) рельса позволил существенно оптимизировать инфраструктуру. Во-первых, при эстакадном исполнении отсутствие системы подвеса ВКС полностью освобождает визуальное пространство и защищает энергосистему от обрывов при прохождении тропических тайфунов [11]. Во-вторых, при будущем переходе на подземные участки, отсутствие токоприемников-пантографов на крышах вагонов позволит уменьшить диаметр тоннелей, что критически важно для снижения стоимости проходческих работ ТПМК в сложных грунтах [12].

Электробезопасность и конфигурация токосъёма



Рис. 3. Сравнение конструктивного исполнения системы тягового электроснабжения: Москва (слева); Ханой (справа)

Для ханойских линий метро (2А и 3) было принято напряжение 750 В постоянного тока. Главным технологическим достижением является отказ от систем верхнего контактного рельса (характерных для старых метрополитенов) в пользу технологии «нижнего токосъёма» (Bottom-contact third rail). Сравнительный анализ показывает концептуальное сходство данного решения со стандартами безопасности Московского метрополитена [13]. Контактный рельс располагается сбоку от ходовых путей и накрыт изоляционным защитным кожухом (из

композитных материалов) с трех сторон – сверху и по бокам. Токоприёмник подвижного состава подводится к рельсу снизу. Такая конфигурация решает сразу две задачи:

– *Биологическая безопасность*: Исключается риск поражения электрическим током при случайном падении пассажира на пути (наступление на защитный кожух безопасно).

– *Защита от КЗ*: Падение посторонних предметов (веток, строительного мусора) на пути не вызывает короткого замыкания, так как токоведущая поверхность скрыта снизу.

Уязвимость к тропическим ливням (Метеорологические риски)

Вместе с тем, анализ выявил критическую слабость системы нижнего токосъёма перед климатическими вызовами Ханоя. В отличие от ВКС, контактный рельс располагается на высоте всего 15–20 см от уровня ходовых путей. Несмотря на абсолютную защищенность эстакадных участков от наводнений, зоны наземных депо (Depot) и открытых рамповых участков (переход с эстакады в тоннель) обладают высоким риском затопления. При повышении уровня воды до отметки изоляторов контактного рельса происходит неизбежное короткое замыкание, что требует полного обесточивания системы [11]. Для компенсации этого риска проектами предусмотрено поднятие уровня путей в депо выше исторического максимума затопления Ханоя и установка мощных систем принудительного дренажа (pump stations) на входах в тоннельные участки.

Обсуждение: Результаты проведенного анализа показывают, что выбор эстакадной архитектуры в сочетании с системой контактного рельса является не вынужденным шагом назад, а оптимальным компромиссом для текущего этапа развития транспортной системы Ханоя. Особого внимания заслуживает аспект энергоэффективности данной конфигурации. Специфика ханойского метрополитена заключается в коротких перегонах между станциями (в среднем 1–1,5 км), что требует частых циклов разгона и торможения подвижного состава. В таких условиях внедрение технологии рекуперативного торможения (возврат кинетической энергии в виде электрической обратно в тяговую сеть 750 В) становится максимально эффективным. Как показывают исследования Баранова А. С. и соавторов [14], при грамотной интеграции бортовых систем управления и тяговых подстанций рекуперация позволяет снизить общее энергопотребление линии на 15–20% без необходимости строительства массивных стационарных накопителей энергии. Кроме того, требует обсуждения вопрос надежности изоляции. Климат Северного Вьетнама характеризуется не только ливнями, но и экстремально высокой влажностью воздуха в течение длительных периодов. Использование композитных защитных кожухов для третьего рельса с нижним токосъёмом, согласно данным Соколова В. Н. [15], практически полностью исключает образование токопроводящей водяной пленки на контактной поверхности, что выгодно отличает эту систему от открытых систем верхнего токосъёма, склонных к утечкам тока в условиях тропиков. Таким образом, несмотря на уязвимость перед глубоким затоплением, при нормальной и повышенной влажности данная система демонстрирует высочайшую стабильность.

Заключение: Комплексный анализ инфраструктурных и энергетических решений для городского рельсового транспорта Ханоя свидетельствует о том, что приоритетное возведение эстакадных участков на первых пусковых комплексах стало стратегически обоснованным шагом, позволившим избежать критического перерасхода бюджета и минимизировать инженерно-геологические риски, неизбежно возникающие при проходке тоннелей в сложных водонасыщенных грунтах дельты Красной реки. При этом отказ от традиционной воздушной контактной сети в пользу внедрения системы электроснабжения через контактный рельс напряжением 750 В постоянного тока с нижним токосъёмом оказался не просто техническим компромиссом, а дальновидным решением, концептуально сопоставимым с высокими

стандартами безопасности Московского метрополитена. Данная технология надежно защищает тяговую сеть от разрушительного воздействия тропических тайфунов, гарантирует абсолютную электробезопасность пассажиров и сохраняет визуальную эстетику городского пространства, а единственное уязвимое место системы – подверженность локальным затоплениям – успешно нивелируется за счет грамотного проектирования принудительного водоотвода и повышения уровня путей в электродепо. Более того, выбранная конфигурация создает оптимальные условия для внедрения энергоэффективных технологий рекуперативного торможения на характерных для Ханоя коротких перегонах, что в долгосрочной перспективе, по мере неизбежного углубления линий в исторический центр города, обеспечит дополнительную экономию капитальных затрат за счет существенного уменьшения требуемого габарита прокладываемых тоннелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Премьер-министра Вьетнама № 519/QĐ-TTg от 31 марта 2016 г. «Об утверждении Плана развития транспорта столицы Ханоя до 2030 года и на перспективу до 2050 года». – Ханой, 2016. – 42 с.
2. Asian Development Bank (ADB). Viet Nam: Ha Noi Metro Rail System Project (Line 3: Nhon – Ha Noi Station Section). Project Administration Manual. – Manila: ADB, 2020. – 98 p.
3. Japan International Cooperation Agency (JICA). The Project for Formulation of National Technical Standards for Urban Railway in Vietnam. Final Report. – Tokyo: JICA, 2018. – 240 p.
4. Министерство транспорта Вьетнама (MOT). Государственный стандарт TCVN 11793:2017 «Метрополитен – Требования к проектированию систем электроснабжения». – Ханой: MOT, 2017. – 36 с.
5. Do, N. A. Evaluation of ground settlements induced by EPB shield tunneling of the Hanoi Metro Line 3 / N. A. Do, D. Dias, P. V. Nguyen // *Transportation Infrastructure Geotechnics*. – 2021. – Vol. 8, № 3. – P. 445–462.
6. Маковский, Л. В. Проектирование городских транспортных тоннелей и метрополитенов / Л. В. Маковский. – Москва: ТИМР, 2003. – 421 с.
7. Куренков, П. В. Техничко-экономическое сравнение вариантов трассировки линий скоростного внеуличного транспорта / П. В. Куренков, А. А. Капустин // *Мир транспорта*. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 88–97.
8. World Bank. Urban Rail Transit: Improving Planning and Delivery Outcomes / World Bank Group. – Washington, DC: World Bank, 2018. – 156 p.
9. World Bank. Climate-Resilient Infrastructure in Vietnam: Strategic Directions for Transport Sector / World Bank. – Washington, DC: World Bank, 2020. – 118 p.
10. Electricity Regulatory Authority of Vietnam (ERAV). Vietnam Energy Outlook Report 2021 / ERAV, Danish Energy Agency. – Hanoi: MOIT, 2022. – 134 p.
11. Mariscotti, A. Distribution of Traction Return Current and Electromagnetic Interference in Third Rail and Overhead Line Transport Systems / A. Mariscotti // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2020. – Vol. 6, № 2. – P. 812–823.
12. Шевлюгин, М. В. Цифровой двойник электроподвижного состава в тяговой сети метрополитена / М. В. Шевлюгин, А. А. Королев, А. Е. Голицына, Д. С. Плетнев // *Электротехника*. – 2019. – № 9. – С. 41–46.
13. Шевлюгин, М. В. Цифровая модель тяговой подстанции двух родов тока / М. В. Шевлюгин, А. А. Королев, А. О. Королев, И. А. Александров // *Электротехника*. – 2018. – № 9. – С. 40–44.
14. Клячко, Л. М. Модель совмещенной тяговой подстанции метрополитена с учетом тяговой нагрузки и потребителей собственных нужд / Л. М. Клячко, М. В. Шевлюгин, М. Н. Белов, А. Е. Голицына // *Электротехника*. – 2021. – № 9. – С. 22–25.
15. ГОСТ 32224-2013. Рельсы контактные для метрополитена. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 24 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОТИВО-ЭДС ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

М. В. Шевлюгин, Д. В. Семенова, А. А. Куликов, А. М. Хлопков

Российский университет транспорта (МИИТ)

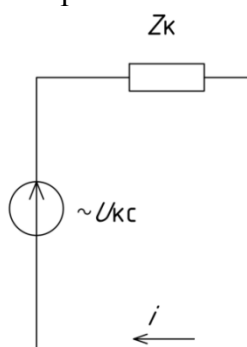
Введение. Исследование и моделирование процесса электроснабжения электроподвижного состава (ЭПС) при питании от контактной сети переменного тока.

В основу работы положены методы теоретической электротехники и численного моделирования на базе эквивалентных схем замещения цепей тягового электроснабжения. Авторами разработана виртуальная модель, которая учитывает комплексное сопротивление контура (включая параметры тяговой подстанции и ЭПС), а также длительность экспериментального промежутка.

При рассмотрении процессов колебания электрической энергии в энергетической паре «электроподвижной состав – тяговая подстанция» в контактной сети переменного тока важным моментом является полнота представления всех элементов на принципиальной электрической схеме. При этом традиционное усложнение расчетных моделей из-за учета изменяющихся во времени параметров тяговых двигателей требует поиска обоснованных инженерных допущений. Обоснование возможности упрощения математических уравнений позволяет существенно снизить вычислительную сложность алгоритмов моделирования без потери точности получаемых результатов, что представляет несомненный интерес для теории и практики тягового электроснабжения.

Главной задачей данной статьи является формирование условий, при которых возможно упрощенное включение противо-ЭДС в уравнение баланса мощностей энергосистемы для повышения эффективности математического аппарата электротехнических систем и комплексов.

В упрощённом общем виде электрическая цепь включает в себя, с одной стороны, источник энергии – тяговую сеть $U_{КС}$, а с другой стороны – потребитель этой энергии, представляющий собой комплексное сопротивление Z_k (рис. 1).



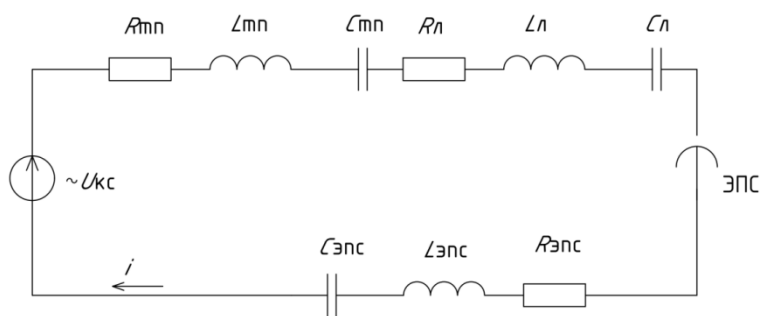
$U_{КС}$ – напряжение контактной сети;

Z_k – комплексное сопротивление контура с ЭПС, ТП и КС

Рис. 1. Упрощенная схема замещения электрической цепи питания
ЭПС переменного тока

В цепях переменного тока необходимо учитывать активную и реактивную составляющую сопротивления контура. При более детальном рассмотрении можно разложить

комплексное сопротивление на активное, индуктивное и емкостное сопротивления [1]. На рисунке 2 представлена схема замещения электрической цепи питания ЭПС переменного тока.



$R_{mn}, R_{л}, R_{эпс}$ – активное сопротивление тяговой подстанции, линии контактной сети, электроподвижного состава; $L_{mn}, L_{л}, L_{эпс}$ – индуктивность тяговой подстанции, линии контактной сети, электроподвижного состава; $C_{mn}, C_{л}, C_{эпс}$ – емкость тяговой подстанции, линии контактной сети, электроподвижного состава; ЭПС – обозначение электроподвижного состава

Рис. 2. Схема замещения электрической цепи питания ЭПС переменного тока

Как видно, сопротивление контура будет состоять из нескольких составляющих, которые в сумме представляют собой комплексное сопротивление

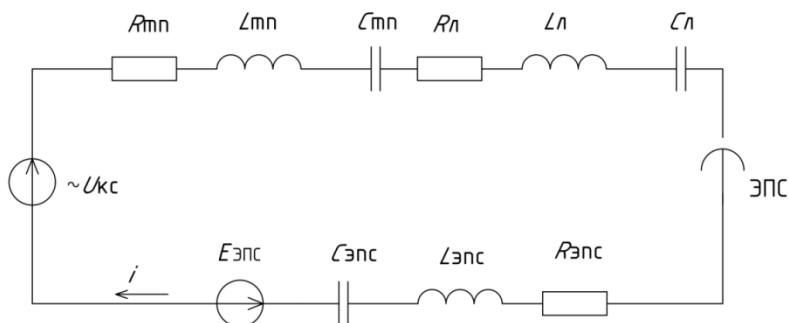
$$Z_k = R_{тп} + \omega L_{тп} + \frac{1}{\omega C_{тп}} + R_{л} + \omega L_{л} + \frac{1}{\omega C_{л}} + R_{эпс} + \omega L_{эпс} + \frac{1}{\omega C_{эпс}}, \quad (1)$$

где Z_k – общее (комплексное) сопротивление контура;

ω – угловая частота.

Помимо указанных параметров электрической цепи для такой крупной и сложной энергетической системы необходимо брать во внимание накапливаемую энергию в тяговых электродвигателях.

В момент, когда ЭПС переходит в режим торможения, тяговые электродвигатели продолжают вращаться и, тем самым, переключаются в режим генераторов с независимым возбуждением и образуют электродвижущую силу, направленную против напряжения тяговой сети. Как только величина противо-ЭДС становится хотя бы немного больше напряжения на выводах трансформатора $U_{кс}$, создаются условия для протекания тока в обратном направлении. В этом случае схема принимает вид как на рисунке 3 с добавлением противо-ЭДС $E_{эпс}$.



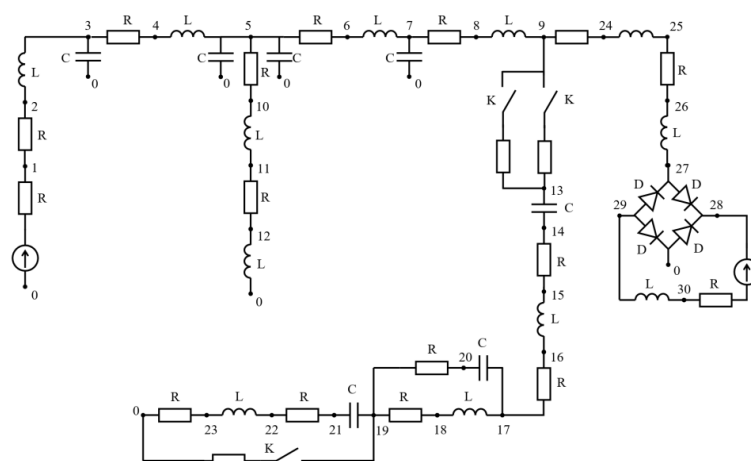
$R_{mn}, R_{л}, R_{эпс}$ – активное сопротивление тяговой подстанции, линии контактной сети, электроподвижного состава; $L_{mn}, L_{л}, L_{эпс}$ – индуктивность тяговой подстанции, линии контактной сети, электроподвижного состава; $C_{mn}, C_{л}, C_{эпс}$ – емкость тяговой подстанции, линии контактной сети, электроподвижного состава; ЭПС – обозначение электроподвижного состава; $E_{эпс}$ – противо-ЭДС от ЭПС

Рис. 3. Схема замещения электрической цепи питания ЭПС переменного тока

Противо-ЭДС обладает способностью мгновенно реагировать на изменение колебания системы, но при рассмотрении противо-ЭДС электродвигателей (ЭД) поезда следует принимать в расчёт зависимость от оборотов двигателя и инерционности ротора [2].

Емкости тяговой подстанции, линии контактной сети, электроподвижного состава, индуктивность линии контактной сети вблизи подстанции можно приравнять к нулю из-за их малых значений [3] и ничтожно малого влияния на результаты расчетов. При этом при значительном удалении точки контакта ЭПС и контактного провода (КП) данные значения могут достигать величин, без которых точность расчетов снижается на несколько процентов.

Для проведения расчета противо-ЭДС была составлена электрическая схема замещения подвижного состава и контактной сети (рис. 4).



R – активные сопротивления контура; L – индуктивные сопротивления контура;

C – емкостные сопротивления контура; D – диоды схемы; K – ключ

Рис. 4. Электрическая схема контура подвижного состава и КС

По результатам виртуального эксперимента было установлено, что при токе в контуре до места сопряжения КП и НВ $I_k = 340$ А противо-ЭДС составляет $E_{эпс} = 19$ кВ (рис. 5).

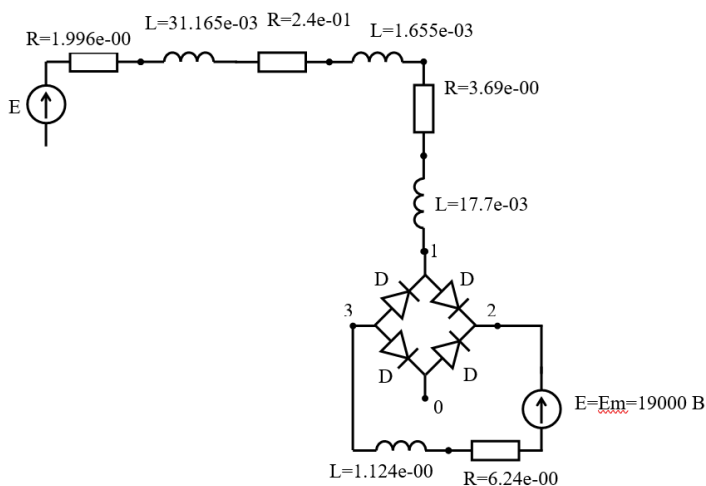


Рис. 5. Участок электрической схемы контура подвижного состава и КС

Для построения математических моделей и отработки виртуальных экспериментов контура тяговой сети переменного тока с ЭПС отправным моментом является составление

баланса мощностей (БМ) между потребителями и источниками электрической энергии. Для контура с рисунка 3:

$$U_m \sin(\omega t + \psi) * i(t) = i(t)^2 R_k + L_k * i(t) \frac{di(t)}{dt} + E_{\text{эпс}}(t) * i(t), \quad (2)$$

где $U_m \sin(\omega t + \psi) = U_{\text{кв}}$;

$i(t)$ – ток контура.

По формуле 2 можно заметить, что при рассмотрении продолжительного процесса (несколько секунд), например, торможения, необходимо учитывать динамическую составляющую от противо-ЭДС $E_{\text{эпс}}$. При интегрировании это особенно важно, так как в зависимости от типа двигателя расчет производится разными методами [4].

Но в процессе моделирования могут также возникать такие моменты, когда время рассматриваемого экспериментального промежутка будет составлять десятые доли секунды. В этом случае скорость вращения ротора тягового электродвигателя изменится на ничтожно малую величину, магнитное поле внутри двигателя физически не успеет ни затухнуть, ни измениться по величине. В этом случае противо-ЭДС для уравнения 2 можно представить как постоянную величину

$$U_m \sin(\omega t + \psi) * i(t) = i(t)^2 R_k + L_k * i(t) \frac{di(t)}{dt} + E_{\text{эпс}} * i(t), \quad (3)$$

Физически противо-ЭДС успевает повлиять на параметры цепи, но система управления алгоритмически не способна среагировать на этот сверхбыстрый процесс.

Понимание этого процесса способствует созданию эффективной расчетной методики для программного комплекса виртуального моделирования систем тягового электроснабжения переменного тока. Обоснование постоянства величины противо-ЭДС на коротких временных интервалах позволяет упростить исходное уравнение баланса мощностей, заменяя сложную функцию фиксированной константой. Это упрощает структуру математических моделей и минимизирует затраты на расчеты, обеспечивая при этом высокую точность.

Выводы. Разработана комплексная электрическая схема замещения контура и экспериментально получены значения противо-ЭДС $E_{\text{эпс}}$; на коротких интервалах времени параметры вращения ротора и магнитного поля тяговых двигателей практически не меняются, в силу чего противо-ЭДС в уравнении баланса мощностей допустимо принимать в качестве постоянной величины $E_{\text{эпс}} = \text{const}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марквардт, К. Г. Контактная сеть : учебник для вузов железнодорожного транспорта / К. Г. Марквардт. – 4-е изд. – Москва : Транспорт, 1994, с. 263.
2. Щербаков, В. Г. Тяговые электрические машины : учебник / В. Г. Щербаков – Москва : ФГБОУ "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2016. – 641 с. – ISBN 978-5-89035-926-1
3. Куликов, А. А. Методика эффективного электроснабжения на основе транспозиционной геометрии подвеса проводов воздушной высоковольтной линии переменного тока : специальность 2.9.3. «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Куликов Андрей Андреевич; Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)). – Москва, 2024. – 177 с.
Постол, Б. Г. Тяга поездов : учеб. пособие / Б. Г. Постол, Е. Н. Кузьмичев. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2011. – 74 с.).

2026 г.

Научное издание

ИННОВАЦИИ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, ПОСВЯЩЁННОЙ
50-ЛЕТИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА
И 50-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ «АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»

ТОМ 1

Самара, 24–25 сентября 2026 г.

Подписано в печать 09.09.2026. Формат 60×90 1/8.
Усл. печ. л. 23,1. Тираж 500 экз. (1-й завод 75). Заказ 146.

Издательско-полиграфический центр ПривГУПС.
443022, Самара, Заводское шоссе, 18.
Тел.: 8 (846) 200-21-10.

Отпечатано в Приволжском государственном университете путей сообщения.
443022, Самара, Заводское шоссе, 18.
Тел.: 8 (846) 200-21-10.