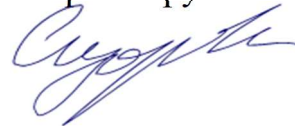


Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный государственный университет
путей сообщения»

На правах рукописи



СИДОРОВИЧ Максим Анатольевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯМ

Специальность – 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация

Научный руководитель
кандидат технических наук, профессор

САВИН Евгений Зиновьевич

Хабаровск

2025

Содержание

Введение.....	4
1 ОТКАЗЫ И НАРУШЕНИЯ РАБОТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ, МЕТОДЫ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ	9
1.1 Классификация отказов и нарушений работы контактной сети	9
1.2 Мешающее влияние от поверхностных частичных разрядов и нарушения условий токосъема на системы управления движением поездов	13
1.3 Зарубежный опыт контроля и диагностики состояния элементов контактной сети.....	18
1.4 Анализ статистики отказов контактной сети на полигонах ОАО «РЖД»	20
1.5 Влияние поверхностных частичных разрядов и нарушения условий токосъема на системы управления движением поездов	28
1.6 Постановка задач исследования	31
2 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ И НАРУШЕНИЙ УСЛОВИЙ ТОКОСЪЕМА.....	33
2.1 Алгоритмы локализации источников нештатного электромагнитного излучения на железнодорожной станции	34
2.2 Локализация источников нештатного электромагнитного радиоизлучения на перегоне.....	48
2.3 Классификация источников электромагнитного излучения с использованием методов машинного обучения	56
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭЛЕМЕНТАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ, КАК ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	73
3.1 Применение методики Мидлтона для моделирования излучения от электродугового процесса	73
3.2 Моделирование электромагнитного излучения при нарушении условий токосъема в контактной сети переменного тока.....	79

3.3 Моделирование электромагнитного излучения от поверхностных частичных разрядов на изоляторах контактной сети.....	83
4 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОВОЛНОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ.....	91
4.1 Обеспечение внедрения и эксплуатации метода радиоволновой диагностики контактной сети.....	91
4.2 Анализ технологического аспекта эффективности диагностики изоляторов контактной сети по радиоизлучениям.....	96
4.3 Анализ экономической эффективности диагностики контактной сети по радиоизлучениям.....	103
Заключение	105
Список использованных источников	108
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Инструкция по эксплуатации программно-аппаратного комплекса локализации и классификации отказов элементов контактной сети на железнодорожных станциях.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Инструкция по эксплуатации программно-аппаратного комплекса локализации и классификации отказов элементов контактной сети на перегонах.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Талон результатов диагностики.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Акт внедрения результатов исследования в АО «ДГК»	127
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Акт внедрения результатов исследования в АО «СвязьТранснефть».....	128

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, которая подчеркивает важность повышения безопасности и надежности железнодорожных перевозок при растущей пропускной способности Восточного полигона ОАО «РЖД». Системы электрификации являются ключевыми драйверами увеличения транспортного потока. При этом отказы ключевых элементов систем электрификации – изоляторов, обеспечивающих подвеску контактного провода, составляют за 2023 год 35,2 % от отказов технических средств хозяйства электроснабжения Дальневосточной железной дороги (ДВОСТ ж. д.), что в свою очередь, приводит к задержкам 1092 поездов на 960 часов. Диагностика состояния изоляторов контактной сети является трудоёмкой задачей, в которую вовлечены как хозяйства электроснабжения, так и остальные предприятия отрасли. Современные методы анализа данных и алгоритмы локализации позволяют эффективно собирать и анализировать данные о состоянии инфраструктуры электрифицированных железных дорог радиоволновым способом, что позволяет локализовать и классифицировать неисправные изоляторы, тем самым снижая их влияние на перевозочный процесс и ускоряя процедуру диагностики.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационное исследование выполнено на основе работ ученых, которые занимались вопросами исследования отказов электрооборудования локомотивов и элементов системы тягового электроснабжения; физикой электромагнитного излучения, порождаемого электрическими элементами и машинами, и методами диагностики состояния электрооборудования по характеру излучений: В. П. Михеева, К. Г. Марквардта, Г. П. Маслова, В. Н. Зажирко, Д. В. Разевига, П. М. Сви, А. В. Ефимова, Г. С. Кучинского, в МИИТ в работах М.П. Бадера и И.М. Горевского; в РГУПС в работах Ю.И Жаркова, Ю.Г. Семенова и Д.В. Колосова; в ОмГУПС в работах А.Н. Смердина, в ИрГУПС в работах С.М. Куценко; в ДВГУПС В.Н. Ли и

Е.А. Титова; зарубежных исследователей Д. Мидлтона, М. Гонзе-Гонсалеса, Ф. Вана и А. Марискотти.

Объект исследования – элементы системы тягового электроснабжения переменного тока.

Предмет исследования – методы и алгоритмы технической диагностики отказов элементов системы тягового электроснабжения переменного тока.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности диагностики состояния системы электроснабжения поездов на основе искусственных нейронных сетей и принципов мультилатерации.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- проведен анализ отказов элементов системы электроснабжения железной дороги, которые возможно диагностировать радиоволновым способом;
- дано обоснование адекватности выбранных диагностических признаков, сопровождающих неисправные режимы работы инфраструктуры контактной сети;
- теоретически и экспериментально исследованы характеристики сигналов, несущих полезную информацию об отказах элементов системы электроснабжения, и мешающих сигналов, определены их особенности для дальнейшего архивирования и использования в процессе обработки;
- разработан новый радиоволновый метод локализации зоны нарушения условий токосъема и поверхностного частичного разряда изоляторов;
- предложен усовершенствованный способ классификации отказов элементов контактной сети, основанный на регистрации электромагнитных излучений, и произведена оценка влияния диагностики системы электроснабжения на эффективность мероприятий по техническому обслуживанию инфраструктуры железных дорог.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен комплексный подход к проведению диагностики отказов элементов контактной сети тягового электроснабжения, заключающийся в

уточнении методики разностно-временного позиционирования радиоизлучающих объектов применительно к источникам электромагнитных возмущений;

- разработан способ классификации нарушений в работе системы электроснабжения по данным радиоволнового анализа на основе методики временного сжатия и дальнейшей обработки с помощью рекуррентной нейронной сети.

Научные положения, выносимые на защиту:

- метод обнаружения и локализации объектов инфраструктуры тягового электроснабжения с нарушенным техническим состоянием;
- методика моделирования электромагнитного излучения при нарушении штатной работы изолятора контактной сети переменного тока;
- комплекс технических средств и вычислительных алгоритмов для реализации предложенного способа диагностики состояния сети электроснабжения на основе электромагнитного излучения.

Практическая ценность работы состоит в возможности использования полученных результатов для диагностики состояния элементов тяговой электрической сети. Своевременная локализация и классификация отказов элементов сети позволит повысить эффективность системы технического обслуживания и ремонта оборудования по его реальному состоянию. Высокий уровень информационной совместимости разработанных средств диагностики обеспечивает интеграцию с другими системами, используемыми в хозяйстве электроснабжения железной дороги.

Методы исследования. Для решения исследовательских задач использованы следующие методы: анализ тенденций развития исследуемой предметной области; математическое, компьютерное моделирование сигналов, помех и процессов с использованием методов и средств машинной обработки, статистического анализа и искусственного интеллекта; натурные исследования физических процессов, формирующих диагностические признаки нештатной работы объектов.

Степень достоверности научных результатов. Достоверность научных положений и достижений, изложенных в диссертации, обоснована результатами компьютерного моделирования, а также экспериментального исследования, проведенного как на лабораторном оборудовании, так и на участке Дальневосточной железной дороги. Близость полученных результатов компьютерного моделирования и экспериментального исследования говорят об адекватности применения предлагаемых методов.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты работы доложены: на XXI Краевом конкурсе молодых ученых Хабаровского края (г. Хабаровск, 18 января 2019 г., ТОГУ), на конкурсе Фонда содействия инновациям «У.М.Н.И.К.-2019» (г. Хабаровск, 6 ноября 2019 г., АСИ ДАСО), XXII Краевом конкурсе молодых ученых Хабаровского края (г. Хабаровск, 21 января 2020 г., ТОГУ), на корпоративном конкурсе ОАО РЖД «Новое звено 2020» (г. Москва, 27 ноября 2020 г., КУ ОАО РЖД), на XXIII Краевом конкурсе молодых ученых Хабаровского края (г. Хабаровск, 14 января 2021 г., ТОГУ), на конференции Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи «Научно-техническое и социально-экономическое развитие транспорта и промышленности стран АТР» (г. Хабаровск, 22 апреля 2021 г., ДВГУПС), на Всероссийском инженерном конкурсе (г. Москва, 30 мая 2021 г., МИФИ), на научно-техническом семинаре кафедры «Электрическая связь» (г. Санкт-Петербург, 27 апреля 2021 г., ПГУПС), на Всероссийском инженерном конкурсе (г. Москва, 30 мая 2021 г., МИФИ), на конкурсе «Внедрение искусственного интеллекта в промышленности» (г. Москва, 6 октября 2022 г., Экспонента), на конкурсе Хабаровского края на предоставление грантов в 2023 году в области прикладных научных исследований (г. Хабаровск, 15 декабря 2023 г.), на международной конференции 7th Asia Conference on Cognitive Engineering and Intelligent Interaction (CEII2024) December 14-16, 2024 Nanyang Technological University, Singapore, на XXVII Краевом конкурсе молодых ученых и аспирантов Хабаровского края (г. Хабаровск, 17 января 2025 г., ТОГУ).

Личный вклад автора заключается в разработке методики диагностики и локализации нарушений в работе систем тягового электроснабжения; проведении моделирования и анализа процессов сбора данных и обработки в исследуемой системе; разработке технических и технологических мероприятий для интеграции предложенных методик в систему эксплуатации хозяйства электроснабжения; технико-экономической оценке внедрения методики.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе 5 печатных работ в периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки для представления работ соискателей ученых степеней.

Исследования выполнялись при финансовой поддержке грантов Хабаровского края в 2023 году в области прикладных научных исследований и Фонда содействия инновациям «У.М.Н.И.К.-2019», Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (2023-2024 гг.).

Соответствие паспорта специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности «2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: п. 3. – «Техническая диагностика подвижного состава и систем электроснабжения. Критерии оценки технического состояния подвижного состава и систем электроснабжения железных дорог и метрополитенов. Автоматизация процессов технической диагностики и мониторинга технического состояния этих объектов, бортовые, мобильные и встроенные устройства диагностики»; п. 9. – «Электромагнитная совместимость и электробезопасность систем электроснабжения, подвижного состава электрифицированных железных дорог и метрополитенов со смежными системами автоблокировки, телемеханики и связи».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 84 источников, 5 приложений, содержит 117 страниц основного текста, включая 9 таблиц и 69 рисунков.

1 ОТКАЗЫ И НАРУШЕНИЯ РАБОТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ, МЕТОДЫ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ

1.1 Классификация отказов и нарушений работы контактной сети

Контактная сеть является драйвером роста эффективности перевозочного процесса Восточного полигона железных дорог России. Электрификация снижает углеродный след и трудозатраты, обеспечивает ритмичность транспортного процесса и повышает экономические показатели железнодорожного транспорта. Однако из-за отсутствия резервирования контактной сети, диагностика состояния её элементов и предиктивное устранение выявленных нарушений является гарантом бесперебойной работы. Понимая важность электрификации, Правительство РФ и Правление ОАО «РЖД» ставят задачи, определенные в «Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая Книга)», направленные на повышение пропускной и провозной способности Восточного полигона при обеспечении высокого коэффициента готовности устройств контактной сети. Для выявления критических изменений состояния систем электрификации необходима систематическая работа по организации контрольных мероприятий, а также соответствующий задачам инструментарий [1, 2]. Согласно «Стратегии», основными мерами, направленными на снижение количества отказов технических средств и сокращение задержек поездов по вине хозяйства электроснабжения, являются:

- оптимизации процессов мониторинга состояния устройств контактной сети;
- повышение качества и снижение трудоемкости ремонтных работ технических устройств через применение современных методов и инструментов технической диагностики для стационарных и мобильных устройств;
- переход к ремонту оборудования контактной сети, тяговых подстанций и стационарной энергетики, основываясь на реальном состоянии этих систем [1].

Контактная сеть электрифицированных железных дорог представляет собой сложную и распределенную систему, требующую тщательной диагностики. Эта система непрерывна в пределах каждой зоны секционирования и функционирует в условиях интенсивных динамических нагрузок. Она также подвергается влиянию ветровых нагрузок, обледенения, грозových разрядов, а также резким колебаниям температур окружающей среды и значительным вибрациям. Исследования методов диагностики контактной сети показывают широкую номенклатуру существующих методов диагностики изоляторов контактной сети и нарушений условий токосъема, которые приведены в таблице 1.1 [3, 4].

Таблица 1.1 – Методы диагностики изоляторов контактной сети и нарушений условий токосъема [4]

Метод	Принцип действия	Преимущества	Недостатки
Электрический	Регистрация параметров электрического поля	Позволяет диагностировать электрические параметры и изоляцию	Зависит от качества контакта и окружающих условий
Вихретоковый	Взаимодействие электромагнитного поля с вихревыми токами	Выявляет трещины и коррозии в электропроводящих материалах	Зависимосим от проводимости и частоты
Радиоволновой	Взаимодействие электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом	Эффективен для дистанционного обнаружения и анализа состояния объектов	Подвержен влиянию внешних электромагнитных помех
Тепловой	Регистрация тепловых или температурных полей	Выявляет перегрев и дефекты в электрических компонентах	Зависим от тепловых условий и наличия тепловых аномалий
Оптический	Взаимодействие оптического излучения с объектом	Высокая точность визуального осмотра, применим для анализа поверхности	Ограничен видимостью и доступностью объекта, требует квалифицированных специалистов
Акустический	Применение упругих колебаний	Демонстрирует высокую эффективность для выявления трещин и пустот, может применяться для различных материалов	Зависимость от акустических свойств материала и окружающих условий

В серии исследований, выполненных в Ростовском государственном университете путей сообщения исследователями Ю.И. Жарковым, Ю.Г. Семеновым, проверены гипотезы о диагностике нарушений условий токосяема в контактной сети с использованием радиосистем и охватывают различные аспекты обнаружения и классификации аномалий, связанных с дуговым токосяемом. Работа акцентирует внимание на точности выбора сигналов для идентификации специфических сбоев, таких как нарушения из-за гололеда. Исследователи из РГУПС обобщили разнообразные методы диагностики, включая диагностику по радиосигналам. В своих работах они рассматривают различные сегменты электроснабжения транспортной подсистемы и формируют комплексные методы обнаружения предотказных состояний, проводят исследование физических процессов в плазме дуги и оценку влияния на радиоизлучение в работах [5, 6]. В последующих исследованиях, также проанализированы подходы к настройке параметров системы радиомониторинга, что позволяет повысить точность и эффективность системы путем предварительной фильтрации и классификации сигналов [7, 8]. Таким образом, обзор работ, выполненных в Ростовском государственном университете путей сообщения, позволяет углубить понимание механизмов и методов диагностики нарушений в системах токосяема, а также подчеркивает важность развития и оптимизации технологий радиомониторинга для обеспечения надежности контактной сети железнодорожного транспорта.

В диссертационной работе С.М. Куценко исследование направлено на создание методики дистанционного контроля напряжения, которая позволяет определить условия для проведения диагностики изоляции. Выявлена зависимость частоты следования акустических и электромагнитных импульсов от количества неисправных изоляторов в гирлянде, что служит диагностическим признаком. В ходе работы были проведены оценки величины заряда, токов, мощности, выделяемой при электромагнитных импульсах, и мощности, расходуемой на электромагнитное излучение. В своём исследовании [9] С.М. Куценко усовершенствовал методику дистанционной диагностики, выявив новые возможности для оперативного контроля состояния железнодорожной

инфраструктуры. В следующем исследовании [10] выделено, что одним из постоянных источников высокочастотных излучений, которые нарушают стабильную работу железнодорожной радиосвязи, являются разряды, возникающие в высоковольтной изоляции линий электропередач, в том числе в изоляции контактной сети. В работе рассматриваются искровые разряды, как вызванные поверхностными частичными разрядами (ПЧР), так и частичными разрядами (ЧР), возникающие на изоляторах. Изоляторы, подверженные поверхностным частичным разрядам (ПЧР), классифицируются как дефектные. Существующая регистрация разрядов проводится в видимом и ультрафиолетовом диапазонах, а также существуют акустические методы регистрации ЧР и ПЧР. В исследовании предложено регистрировать разряды в диапазоне электромагнитных частот. Для оперативного обнаружения неисправностей радиоволновым методом рекомендуется установка антенн на лабораторном вагоне и совмещение измерений с текущей диагностикой высоковольтной изоляции, что позволит повысить надежность получаемых результатов диагностики. В исследовании [11] предложен усовершенствованный метод диагностики высоковольтной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта с использованием разнесённых антенн. Этот подход позволяет записывать радиосигналы излучения с нескольких антенн, что повышает точность локализации дефектной строки изоляторов.

Неразрушающий контроль элементов подвеса воздушных линий отмечен существенным количеством исследований в разделе общей энергетики. В диссертационном исследовании Г.С. Федорова подробно излагается метод и измерительная система для оценки состояния высоковольтных изоляторов на основе анализа частичных разрядов. Исследование акцентирует внимание на возможности определения ПЧР в изоляторах через анализ дополнительных гармоник в высоковольтной сети. Этот метод позволяет выявлять неисправности в изоляторах, что является критически важным для обеспечения надежности и безопасности энергетических систем [12]. В другом исследовании, представленном Д.К. Зариповым, описываются методы дистанционного контроля состояния многоэлементных изолирующих конструкций электрифицированных

железных дорог. Автор подчеркивает, что изоляторы на контактных сетях железных дорог могут составлять до 25 % всех отказов. Для диагностики изоляторов предложен метод теплоультразвукового контроля, который позволяет обеспечить высокую точность и эффективность диагностики, минимизируя риски и последствия потенциальных отказов [13]. В исследовании группы Э.Ф. Хакимзянова, Ю.В. Пискавацкого, Р.Г. Мустафина и Д.Ф. Губаева представлена методика выбора адаптивных уставок для раннего обнаружения гололеда на проводах линий электропередачи. Особенностью предложенной методики является её адаптивность, которая заключается в возможности коррекции уставок задержки сигнала, что предотвращает возможные аварии [14].

Данные исследования отражают значимость развития и применения новых технологий для мониторинга и диагностики критически важных компонентов инфраструктуры электроснабжения железнодорожного транспорта, обеспечивая тем самым улучшение безопасности и надежности в работе транспортных систем.

1.2 Мешающее влияние от поверхностных частичных разрядов и нарушения условий токосъема на системы управления движением поездов

На текущий момент ключевыми документами для проведения неразрушающего контроля изоляторов и выявления поверхностных частичных разрядов являются «Правила технического содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи» от 18.08.2021 г. № 1812/р и «Методики определения балльной оценки состояния контактной сети в Трансэнерго» от 21.02.2018 № 348/р. Эти документы, сформированные в рамках технологического сопровождения ремонтных и эксплуатационных работ по содержанию в надлежащем виде контактной сети и воздушных линия, применяемых в структуре Российских железных дорог, были введены взамен технологических карт, которые входили в приложение к Приказу МПС России № ЦЭ-197. По методике на полигоне железных дорог применяется балльная система диагностирования состояния контактной

сети, а изоляторы диагностируются ультрафиолетовыми камерами, установленными на вагонах-измерителях контактной сети [16]. Тем не менее, на полигоне железных дорог применяются следующие способы диагностирования изоляторов контактной подвески переменного тока:

- ультразвуковой (прибором типа «УД») [17];
- электронно-оптический (прибором типа «Филин») [17];
- камерой ультрафиолетового диапазона [16].

Ультразвуковой и электронно-оптический методы не включены в бальную оценку и, в связи с отменой технологических карт, считаются устаревшими. Однако благодаря наличию соответствующего оборудования, они продолжают применяться в ходе обходов и при взаимодействии со смежными предприятиями. Предприятия связи, входящие в состав ОАО «РЖД», осуществляют поиск неисправных элементов контактной сети по методике, представленной в журнале «Автоматика, связь, информатика» руководителем группы радиолaborатории Читинской дирекции связи – Центральной станции связи – филиала ОАО «РЖД». Методика включает три этапа.

1. Определить перегон, на котором находится источник радиоизлучения по штатным индикаторам радиостанций. Следует принять во внимание замечания, полученные от машинистов поездов (ТЧМ) и дежурных по станции (ДСП).

2. Найти точный район источника радиоизлучения, используя радиопеленгатор Алтай-145 (или его аналог).

3. Уточнить источник излучения на расстоянии 20 м с помощью ультразвукового детектора УД-8М или аналогов [18].

Особенно часто источниками излучения на железнодорожных станциях являются случаи искрения в разъединителях трансформаторов, в окислившихся контактах плашек СК-6, установленных в местах присоединения тросов группового заземления к рельсу, рельсовых соединителях. Источниками помехи являются изоляторы с большим током утечки, имеющие трещины, сколы, загрязнения и системы освещения, если они содержат галогеновые лампы.

В работах Бадера М.П. и Горевго И.М. проведен анализ влияния энергетической инфраструктуры на работу линий связи, железнодорожной автоматики и телемеханики, а также средств радиосвязи. Рассмотрены подходы к получению данных с реальных объектов железнодорожной инфраструктуры, определена методика компьютерного моделирования процессов, возникающих при дуговом токоосеке в устройствах питания подвижного состава от контактной и работы рельсовых цепей. При этом собраны данные в различных погодных условиях, на разных типах питающей контактной сети и при различной грузонапряженности участков. Апробирован способ квадратурного сжатия сигналов по методике I/Q и дальнейшая обработка посредством цифровых пакетов MATLAB, MathCad или других [19,20]. Авторы предложили для использования компьютерную методику на основе программного комплекса LabVIEW/Multisim от National Instrumentals, в которой для описания модели дугового разряда используются модели Майера и Касси, из которых выделена как лучшая модель Майера. В работах исследователей Васильевой К.С. и Башкатова С.П. был произведен анализ существующих систем моделирования радиосигналов и получены цифровые модели радиоизлучения от различных источников, что позволяет использовать уже готовые функциональные блоки в различных исследовательских средах. Такое решение позволяет предсказывать место наиболее вероятной зоны электромагнитного влияния [21].

Анализ воздействия систем повышения интенсивности движения поездов на системы энергоснабжения и, как следствие, на радиосвязь, получил значительное внимание в научном сообществе, что отражено в многочисленных исследованиях и научных публикациях. В статье «Оценка совместимости системы тягового электроснабжения при внедрении интервального регулирования движения поездов по технологии виртуальная сцепка» авторов Н. П. Асташкова, В. А. Оленцевича, Ю. И. Белоголова и В. В. Кашковского исследуется влияние внедрения технологии виртуальной сцепки на систему тягового электроснабжения. Авторы дают анализ, как данная технология, позволяющая определять расстояние между поездами на основе их текущего местоположения, влияет на пропускную и провозную

способности железнодорожных линий. На основе математического моделирования в исследовании показано, что виртуальная сцепка обеспечивает более низкий расход энергии и потери в тяговой сети по сравнению с традиционными методами, делая её более эффективной и предпочтительной для использования на железных дорогах [22].

В исследовании Е.Ю. Пузина «Моделирование ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск при реализации систем интервального регулирования» рассмотрено внедрение систем интервального регулирования, которое приводит к увеличению нагрузок на системы тягового и внешнего электроснабжения, что может вызвать снижение напряжения в контактной сети до недопустимых уровней. Особенно остро эта проблема проявляется в ремонтных режимах системы внешнего электроснабжения, когда отключение отдельных ее элементов усиливает нагрузку на оставшиеся в работе линии электропередачи и трансформаторы подстанций, снижая напряжение в контактной сети. Особенно важным данное исследование делает тот факт, что при работе устройств контактной сети в вынужденном режиме снижаются показатели обеспечения электромагнитной совместимости между системами электрификации железных дорог и радиосвязью [23].

В работе К. Ю. Долинского, А. А. Лыкова, В. А. Соколова, В. Б. Соколова, Г. В. Осадчего из Петербургского государственного университета путей сообщения рассматривается вопрос создания системы удаленного мониторинга состояния железнодорожной контактной сети. Особое внимание в данной работе уделяется разработке методики диагностирования контактной сети, основанной на измерении натяжения с применением подсистем радио и волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), которая позволяет проводить диагностику также по вибрации и влажности. Предложения по сбору данных и концентрации опыта в единую систему представляют собой основную ценность исследования, учитывая высокие требования к надежности объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях растущих скоростей движения поездов и высоких рисков, связанных с возможными отказами устройств.

Помехи как мешающие воздействия для систем радиолокации были рассмотрены в монографии В.С. Кондратьева, А.Ф. Котова и Л.Н. Маркова «Многопозиционные радиотехнические системы» [24]. В данной монографии на основе теории оптимального управления и оптимальной нелинейной фильтрации был произведён статистический синтез и анализ систем измерения положения и скорости. Монография содержит различные алгоритмы и аппаратные решения для реализации устройств многопозиционных радиотехнических систем для поиска и наблюдения. Анализ и разработка алгоритмов поиска на базе многопозиционных радиотехнических систем продолжила находить своё отражение и в современных работах. Так системы поиска через разностно-дальномерные системы нашла своё отражение в диссертационном исследовании В.А. Симакова [25], который предложил совместить различные методы определения местоположения источников радиоизлучения. В работе рассмотрены как разностные, так и угломерные системы. Приводятся их сильные и слабые стороны, а также рассмотрена возможность адаптивного применения двух методов для повышения качества определения радиопомех. Проведено сравнение среднеквадратического отклонения системы при использовании различных методов поиска местоположения. Приведено сравнение экономических показателей различных систем и проведено математическое моделирование эффективности двухэтапного алгоритма обнаружения движущихся объектов.

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для определения местоположения источника радиоволнового излучения рассмотрено в диссертации Аль-Одхари Абдулвахаба Хуссейна Али [26]. В работе исследуется возможность поиска источников радиоизлучения с применением БПЛА, включая их использование в условиях сложного рельефа местности. Проведены оценки точности определения координат источника в зависимости от траектории пролёта БПЛА, а также от скорости движения объектов радиоизлучения. Оценивается эффективность алгоритма NLOS для снижения воздействия сложного рельефа на определения местоположения. Руководитель диссертации Г.Ф. Фокин также проводит исследования на базе Санкт-Петербургского государственного

университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. В его работах рассматриваются предельные оценки точности позиционирования источников радиоизлучения с использованием разностно-дальномерного и/или угломерного метода. Разработан комплекс моделей и методов для оценки точности позиционирования по метрике эллипсоида рассеяния нижней границы Крамера–Рао. На основе предложенного инструментария выполнен количественный и качественный анализ сценариев позиционирования в различных радиосетях, включая LTE и 5G. В исследованиях также изучены особенности построения и функционирования сети радиодоступа 5G как системы определения местоположения устройств. Анализ новых технологий радиоинтерфейса 5G, значимых с точки зрения задач геолокации, позволил выявить новые возможности повышения точности позиционирования. Проведенный анализ подтверждает роль сетевого позиционирования как инструмента повышения эффективности работы радиостанций в составе сетей радиодоступа 5G за счет пространственной фильтрации радиосигналов при наличии и отсутствии прямой видимости [27–29]. Применение БПЛА для диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог предложено С.А. Фроленковым как часть сквозной цифровой технологии [30].

В исследованиях, посвящённых влиянию помех на радиосистемы и локализации радиоизлучений, широко рассматривается опыт определения местоположения источников излучений. Для этих целей активно используются различные типы беспилотных летательных аппаратов, что позволяет повысить точность и эффективность локализации.

1.3 Зарубежный опыт контроля и диагностики состояния элементов контактной сети

Зарубежные исследователи также накопили существенный опыт в анализе и методах диагностики контактной сети через анализ радиоволновых излучений. Также шведские исследователи по результатам измерений и анализа данных на

полигонах шведской (SJ), французской (SNCF) и испанской (RENFE) железных дорогах провели факторный анализ и составили диаграмму факторов риска на отказы радиосвязи по причине высокого уровня помех от дуговых процессов и ПЧР в инфраструктуре контактной сети. Исследователи М. Рашид и Т. Тади в статье рассматривают проблемы дугового разряда токоприемника. В исследовании подробно описываются дуговой разряд токоприемника и его воздействие на железнодорожные транспортные средства и скользящий контакт между контактными лентами токоприемника и контактным проводом, с особым акцентом на дуговой разряд. В ходе исследования определены методы образования дуги, затухание и восстановление [31]. В исследовании, проведенном Д. Букка, А. Коллиной и Э. Танци, анализируется влияние электрической дуги на износ пантографа и контактного провода в системах переменного тока. Проведен эксперимент для анализа степени износа и температурных характеристик в лабораторных условиях. Экспериментальные данные позволяют лучше понять влияние дуги на компоненты системы и разрабатывать методы для увеличения ее надежности [32]. В исследовании Ф. Фана, А. Ванка, Ю. Сифери и Б. Стюарта представлена методика точной локализации дуговых разрядов от токоприемников в системах электрификации железных дорог постоянного тока. Авторы предложили метод позиционирования дуги, основанный на сопоставлении резонансных частот, зависящих от местоположения вдоль контактного провода, с резонансными частотами, извлеченными из измерений напряжения во время дугового разряда. В результате была сформирована кривая, которая локализует местоположение разрядов [33]. Исследователи А. Ларсон и Д. Борман провели исследование скользящего контакта между токоприемником и контактным проводом, в ходе которого были собраны материалы по форме дуги, особенностях её длительного воздействия [34].

В диссертации С. Мидьи, посвященной исследованию радиоизлучений, возникающих при взаимодействии токоприемника с контактным проводом на электрифицированных железных дорогах, во второй фазе работы были проанализированы и представлены различные характеристики этих

высокочастотных излучений и влияющие на них параметры. Подтверждено наличие широкополосных компонентов высокой частоты в диапазоне от нескольких десятков кГц до нескольких сотен МГц. Несмотря на различия, фронты сигналов имеют схожую форму и коррелируют с более высокими частотами [35].

В статье исследователя А. Марискотти рассматривается явление электрической дуги и ПЧР в электрифицированных транспортных системах, таких как железные дороги и метрополитены. В данной работе освещены различные параметры, влияющие на возникновение дуги, ЧР и ПЧР, включая тип материалов, интенсивность тока, вид питающего напряжения (постоянное или переменное), относительную скорость и температуру [36].

Анализ изученных источников подчеркивает высокую актуальность диагностических средств, основанных на радиоволновом излучении, в зарубежных исследованиях. Особое внимание уделяется вопросам локализации и классификации источников радиоволнового излучения при техническом обслуживании контактной сети железнодорожного транспорта.

1.4 Анализ статистики отказов контактной сети на полигонах ОАО «РЖД»

Внедрение сквозных цифровых решений в сфере транспортной инфраструктуры играет ключевую роль в повышении производительности и точности учета отказов. Это включает в себя использование передовых технологий для сбора и анализа данных, что позволяет перейти к системам предиктивной аналитики. Предиктивная аналитика на основе автоматизированной системы учета, контроля устранения отказов технических средств и анализа их надежности (КАСАНТ) применяется для прогнозирования потенциальных неисправностей и оптимизации планов технического обслуживания, что, в свою очередь, позволяет осуществлять ремонт транспортной инфраструктуры на основе фактической потребности, а не по графику. Этот подход к обслуживанию по необходимости помогает существенно сократить простои и увеличить надежность работы оборудования, а также способствует более эффективному распределению

ресурсов. В результате становится возможным не только повышение эффективности использования транспортной инфраструктуры, но и оптимизация графиков движения поездов.

Дополнительно, интеграция обслуживания и ремонта в рамках технологических окон дает возможность более гибкого и экономичного управления техническим обслуживанием. Это включает в себя способность быстро реагировать на изменения в состоянии инфраструктуры, адаптируя графики работы поездов таким образом, чтобы минимизировать влияние на общий график движения и повысить общую производительность транспортной системы. Таким образом, цифровая трансформация в области управления транспортной инфраструктурой предоставляет возможности для значительного повышения эффективности, сокращения издержек и улучшения качества обслуживания, что является критически важным для устойчивого развития в условиях постоянно растущих требований к безопасности и надежности транспортных систем.

Рассмотрим отказы в работе технических средств хозяйства электроснабжения по системе КАСАНТ за период с 2020 по 2023 год, которые сведены в диаграмму на рисунке 1.1. Отмечается рост отказов технических средств в хозяйстве электроснабжения ДВОСТ ж. д.

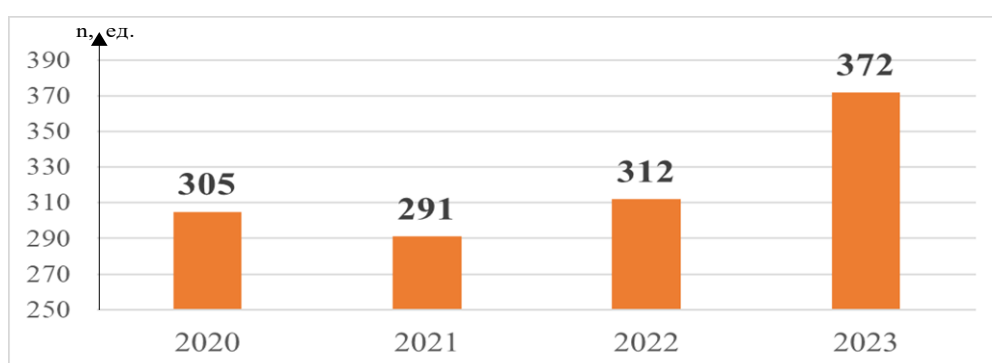


Рисунок 1.1 – Отказы в работе технических средств хозяйства электроснабжения

Основные отказы технических средств группируются по основным задачам работы хозяйства. Данные КАСАНТ учитывают пять ключевых категорий отказов:

контактная сеть, автоблокировка, тяговые подстанции, самоходный подвижной состав (ССПС) и нетяговые потребители. Распределение отказов по категориям представлено на рисунке 1.2.

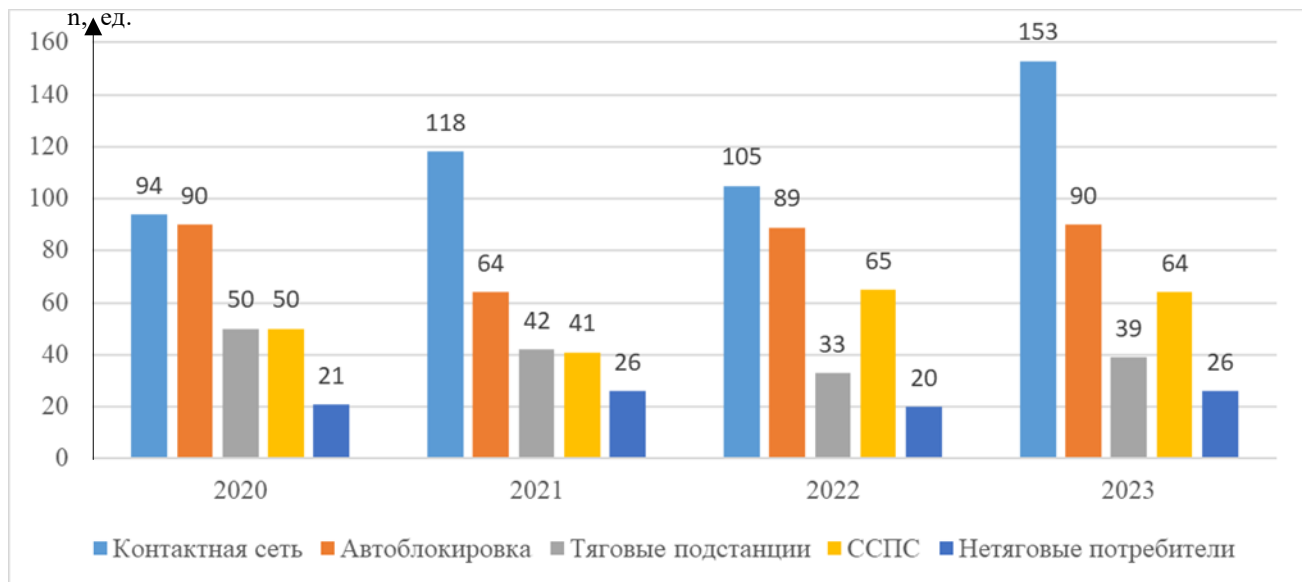


Рисунок 1.2 – Распределение отказов по категориям

Для того чтобы адекватно анализировать потребность в диагностике элементов контактной сети, крайне важно также оценить время задержки подвижного состава, вызванное различными категориями источников отказов. Это включает в себя детальное исследование времени задержки движения поездов, связанного с каждой категорией отказов технических средств. Данный подход позволяет не только выявить наиболее частые причины задержек, но и определить критические элементы инфраструктуры, требующие повышенного внимания в рамках профилактического обслуживания и ремонта. Для анализа потребности в диагностике элементов контактной сети, также существенно оценить время задержки подвижного состава по различным категориям источников отказов по рисунку 1.3. Данные по часам задержек показывают существенное влияние задержек именно от контактной сети железных дорог. Нарушения в работе контактной сети приводят к наибольшим задержкам в движении поездов и нарушению графика движения.

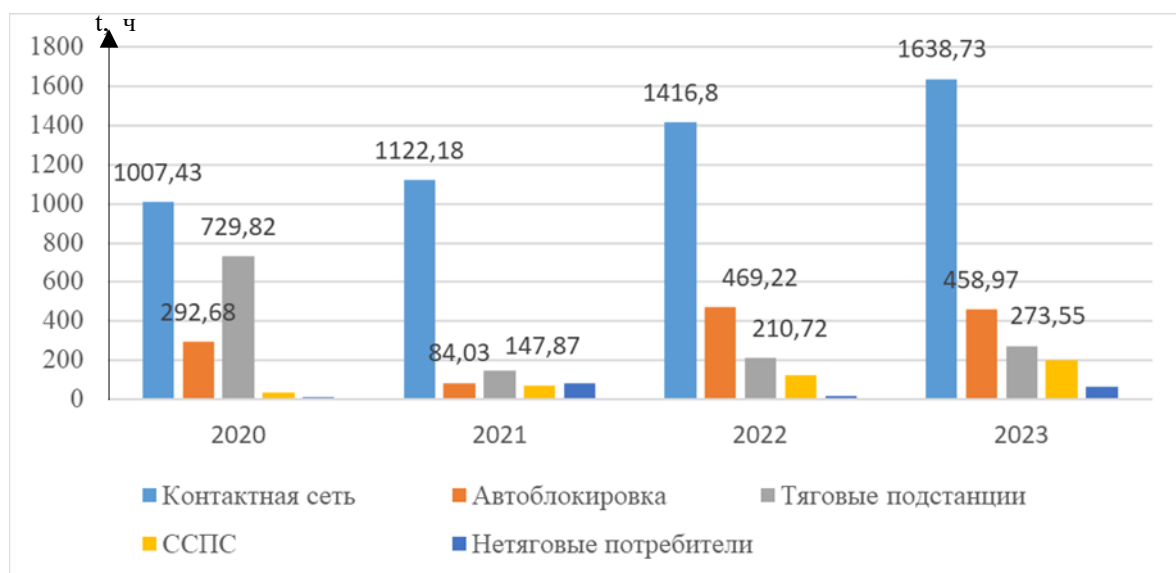


Рисунок 1.3 – Распределение времени отказов по категориям

Для глубокого понимания причин отказов в контактной сети проведен сравнительный анализ инцидентов 2023 года по сравнению с данными 2020 года, результаты которого представлены на рисунках 1.4 и 1.5.



Рисунок 1.4 – Доля каждой категории в общем количестве задержек за 2023 год



Рисунок 1.5 – Доля каждой категории в общем количестве задержек за 2020 год

Изоляторы контактной сети подвергаются большему количеству повреждений по сравнению с изоляторами воздушных линий из-за меньших пролетов и более сложных условий эксплуатации, включая дополнительные вибрации и загрязнения. Это требует принятия дополнительных мер для повышения надежности изоляции контактной сети. Хотя поверхностные перекрытия могут не привести к разрушению изоляторов, они могут вызвать отключения, нарушая график движения поездов. Таким образом увеличивается влияние отказов от изоляторов и рост доли отказов по их вине до 35 %, что сигнализирует о росте влияния изоляторов, как фактора отказов контактной сети. На рисунке 1.6 отображены статистические данные по количеству задержанных поездов по различным категориям отказов за период с 2020 по 2023 год. Анализ этих данных позволяет выявить ключевые проблемные области в инфраструктуре

железнодорожного транспорта и оценить эффективность внедренных мер по устранению отказов за указанный период. График демонстрирует динамику изменения количества задержек, связанных с каждой категорией отказов, что важно для планирования технического обслуживания и улучшения надежности железнодорожной сети. Данный анализ является инструментом для оптимизации процессов обслуживания и повышения общей производительности железнодорожной системы.

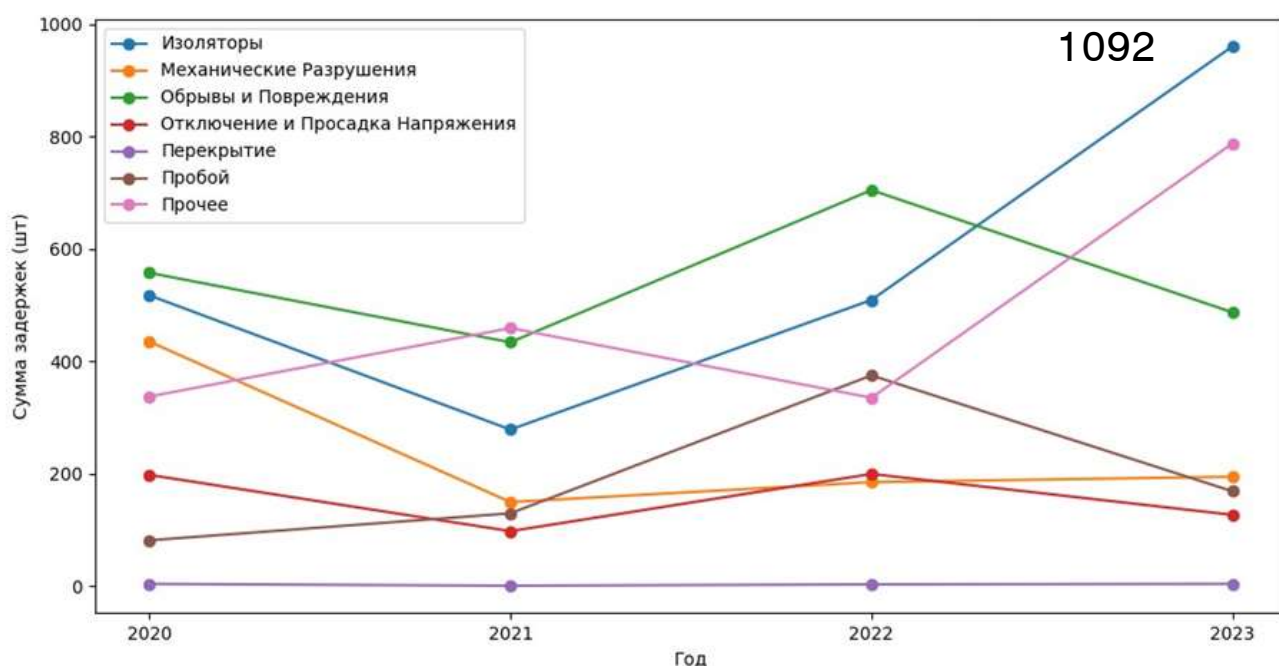


Рисунок 1.6– Количество задержанных поездов по категориям отказов

На графике рисунка 1.7 представлен объем потерь поездо-часов, разбитых по категориям отказов за период с 2020 по 2023 год. Графический анализ позволяет оценить не только количество задержек, но и их продолжительность, что дает расширенное представление о влиянии различных типов отказов на операционную эффективность железнодорожного транспорта. Данная группировка позволяет уделить особое внимание на категории, вызывающие максимальные задержки, что критически важно для разработки стратегий по улучшению надежности и своевременности железнодорожных перевозок. Изучение этих данных помогает выявить ключевые направления для технического усовершенствования и

корректировки процессов технического обслуживания изоляторов, задержки из-за которых по суммарному времени превышают показатели других отказов.

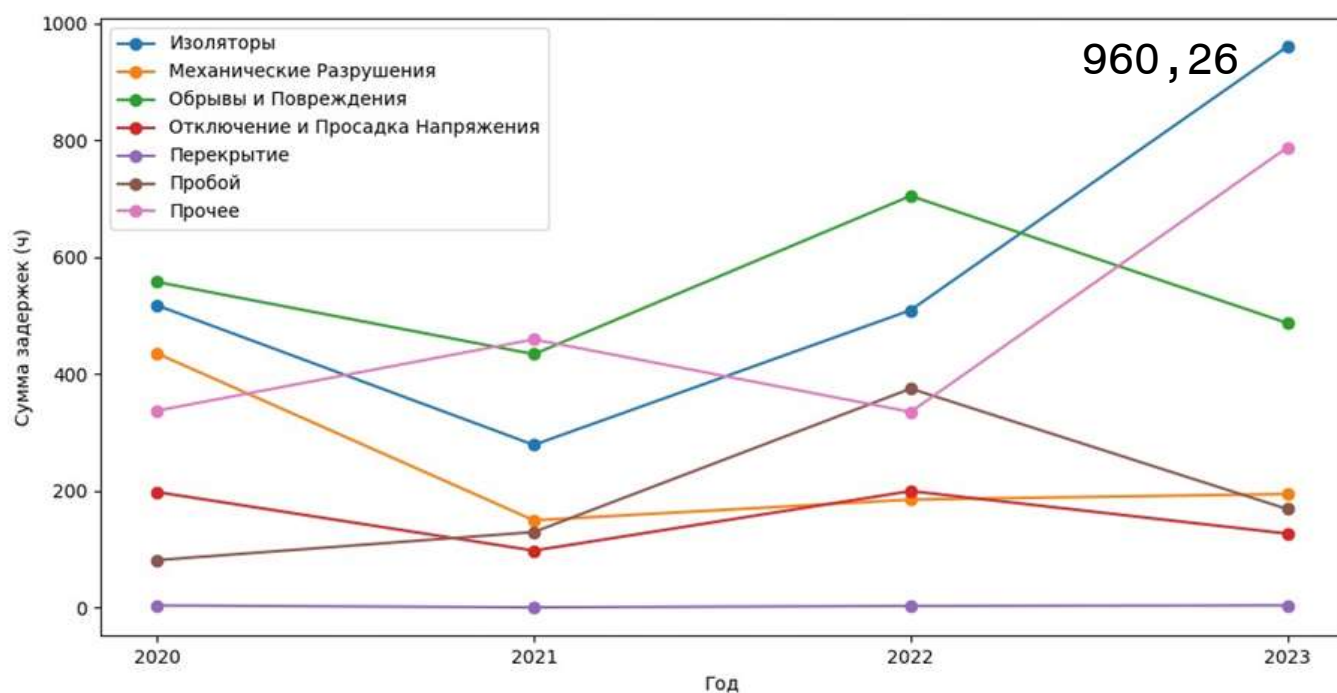


Рисунок 1.7 – Объём задержек поездов (в часах) по категориям отказов

На рисунке 1.8 отражено среднее время, необходимое для восстановления работы после отказов изоляторов в железнодорожной контактной сети за период с 2020 по 2023 годы.

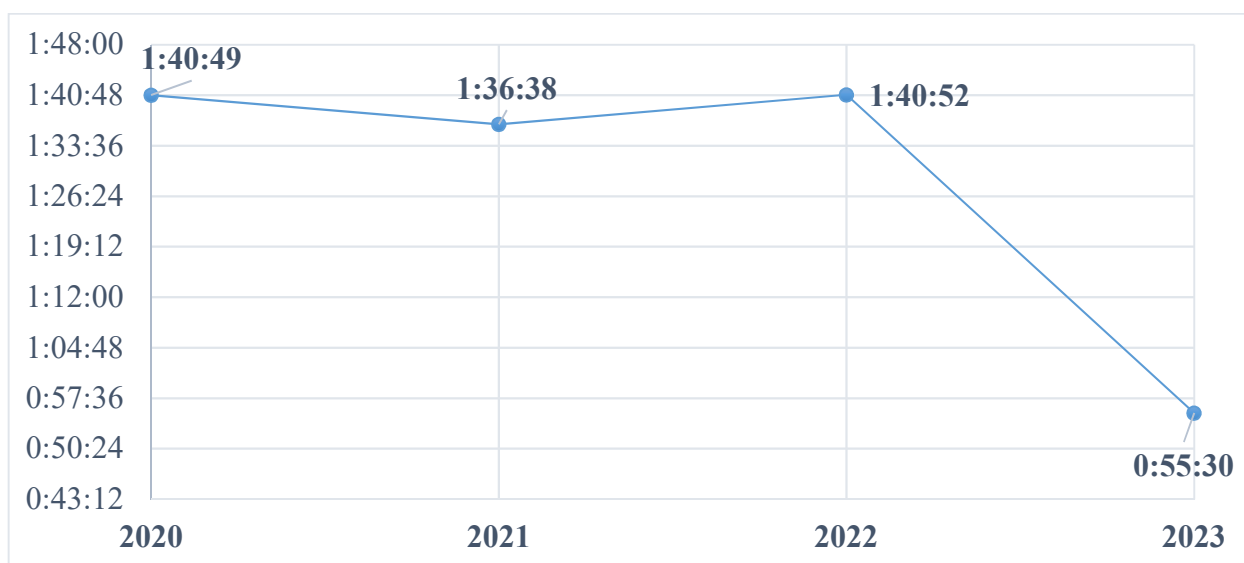


Рисунок 1.8– Среднее время на восстановления отказов от изоляторов

Этот анализ, проведенный по данным в системе КАСАНТ, важен для оценки эффективности текущих методов ремонта и обслуживания изоляторов. Данные позволяют выявить тенденции сокращения времени восстановления после отказов изоляторов контактной сети. Анализ обеспечивает информацию для планирования мероприятий по повышению надежности и снижению времени простоя, что напрямую влияет на эффективность функционирования железнодорожной инфраструктуры.

Таким образом, данные показывают положительную динамику по сокращению времени ремонта изоляторов контактной сети. На графике рисунка 1.9 представлена статистика количества отказов изоляторов, в разрезе места отказа: на железнодорожных станциях или перегонах за рассматриваемый период. Этот анализ позволяет выявить участки, где изоляторы демонстрируют повышенную склонность к неисправностям, что является критическим для оптимизации стратегий технического обслуживания и ремонта. Представленные данные позволяют сделать вывод о значительно большем количестве отказов на перегонах.

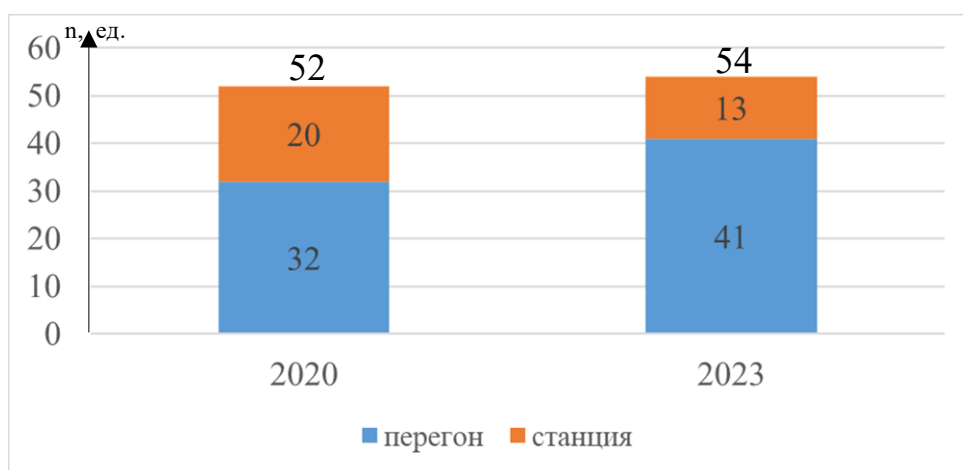


Рисунок 1.9 – Количество отказов изоляторов на перегоне и станции

Анализ данных системы учета отказов технических средств КАСАНТ показывает, что отказы изоляторов составляют значительную часть отказов технических средств хозяйства электроснабжения как на станциях, так и на перегонах. Восстановление движения после отказов, связанных с изоляторами

приводит к многочисленным задержкам в движении поездов, что негативно влияет на обеспечение ритмичности транспортных процессов. Количество и время задержки поездов из-за отказов изоляторов показывают негативную динамику и, в перспективе, могут стать одним из факторов снижения пропускной и провозной способности Дальневосточной железной дороги.

1.5 Влияние поверхностных частичных разрядов и нарушения условий токосяема на системы управления движением поездов

При рассмотрении вопроса актуальности данной проблемы для предприятий транспортной отрасли Дальнего Востока был проведён разносторонний анализ различных данных в т. ч. и от смежных предприятий. Ключевыми предприятиями по детектированию электромагнитных радиоизлучений является региональные центры связи – филиалы Центральной станции связи. Анализ данных системы мониторинга Сигнал/Шум, предоставленных Хабаровской дирекцией связи ДВОСТ ж. д., сведён в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты расследований случаев зашумления радиоканала

Причины	Количество событий			
Год	2015	2016	2017	2018
Аварии по устройствам ЭЧ	18	12	10	11
Плановые работы ЭЧ	23	16	16	13
Радиопомехи на устройствах ЭЧ	41	43	39	46
Устройства радио	30	14	17	20
Всего событий	112	85	82	90
Из них из-за устройств ЭЧ «РЖД»	37 %	51 %	48 %	51 %

Доля помех, вызванных устройствами хозяйств электроснабжения (ЭЧ) ОАО «РЖД» от общего числа отказов, приведена на рисунке 1.10. Анализ отказов по системе Сигнал/Шум показывает, что за 2020 год большая часть зашумлений радиоканала связана с авариями и некорректной работой устройств

энергоснабжения. В случае возникновения нарушений безопасности движения поездов они были бы отнесены за дирекцией по энергообеспечению ОАО «РЖД».

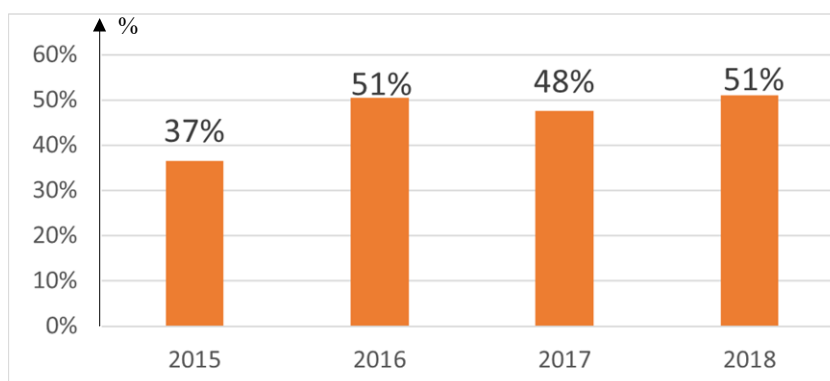


Рисунок 1.10 – Зашумления радиоканала от устройств электроснабжения

Распределение причин повышенного зашумления каналов поездной радиосвязи представлено на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – Результаты расследований наличия импульсных помех в канале радиосвязи

Анализ времени реагирования показывает, что в январе 2019 года средняя скорость реакции на повышенный уровень шума в канале составляет 130 часов. Стоит отметить, что данные электромагнитных радиоизлучений не привели к отказам, которые учтены в системах КАСАНТ, т.е. отказы не привели к нарушениям в графике движения поездов. График реагирования на каждый случай приведён на рисунке 1.12.

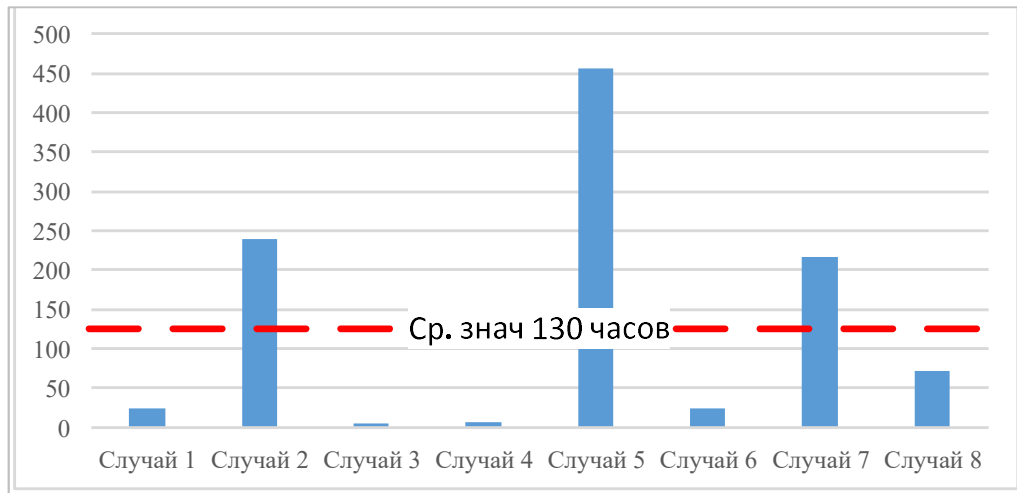


Рисунок 1.12 – Время реагирования на повышенный уровень шума в канале

Из рассмотрения результатов расследований занижения результатов системы Сигнал/Шум наиболее затруднительной частью снижения уровня шума является поиск источника мешающего электромагнитного влияния и именно в этот момент помеха может стать причиной нарушения безопасности движения поездов [37].

Анализ одного из наиболее опасных нарушений безопасности движения поездов, а именно проезда запрещающего сигнала светофора за 4 месяца 2020 года показывает, что из семи случаев проезда запрещающего сигнала, в четырёх случаях сопутствующим нарушениям было нарушение регламента переговоров между машинистом, составителем и руководителем движения (ДСП или ДНЦ). Рассмотрим эти случаи подробнее.

1. 25.12.2019 г. ст. Барнаул Западно-Сибирская ЖД. При маневровой работе был изменён канал радиосвязи на нерегистрируемый, что по совокупности причин привело к проезду предельного столбика и взрезу стрелочного перевода. Ответственность за локомотивной бригадой [38].

2. 29.12.2020 г. ст. Абакан Красноярская ЖД. При маневровой работе из-за нарушения регламента переговоров и ложного принятия команды составителя поездов произошёл проезд запрещающего сигнала и взрез стрелки. Ответственность за составителем и локомотивной бригадой [39].

3. 11.01.2020 г. ст. Сибирцево ДВОСТ ж. д. При маневровой работе из-за нарушения регламента переговоров и нарушений при передаче машинисту

команды на движение при неполной готовности маршрута произошёл проезд запрещающего сигнала и взрез стрелки. Ответственность за дежурным по станции и маневровым диспетчером.

4. 04.02.2020 г. ст. Бургыш Горьковской ЖД. При маневровой работе из-за нарушения регламента переговоров и нарушений при передаче машинисту команды на движение при неполной готовности маршрута произошёл проезд запрещающего сигнала и взрез стрелки. Ответственность за ДСП [40].

Причины, ведущие к нарушению безопасности движения поездов, для локомотивного комплекса и хозяйства управления движением поездов нарушение регламента, являются одним из ключевых факторов нарушений безопасности движения поездов [41]. В настоящее время применяется следующая система поиска электромагнитных радиоизлучений на крупных железнодорожных станциях в условиях повышенного электромагнитного влияния. Данный метод обладает рядом недостатков: он испытывает затруднения в идентификации электромагнитных возмущений, не способен адекватно реагировать на разнообразные изменения во внешней среде, такие как грозы, осадки и туман, не учитывая их воздействие.

1.6 Постановка задач исследования

Анализ актуальности, проработанности темы и потребности реального производственного сектора позволил сформировать гипотезу, что сбор данных о радиоизлучениях с последующей обработкой позволит выявлять, локализовать и классифицировать нарушения условий токосъема и нарушения в работе изоляторов контактной сети. В ходе апробации была выявлена необходимость в дополнении инструментария сбора информации устройством, которое способно решать задачи контрольной проверки железнодорожных станций и перегонов. После апробации гипотезы появилась расширенная методика применения комплекса локализации и классификации источников радиоволнового излучения для диагностики изоляторов в трех исполнениях:

1) станционном – аппаратные части комплекса позволяют проводить диагностику инфраструктуры контактной сети на железнодорожной станции с возможностью локализовать и классифицировать неисправный элемент;

2) перегонном – аппаратные части комплекса могут быть носимыми, размещены на автомобиле, локомотиве или на ВИКС;

3) агрегирующем – программно-аппаратной инфраструктуре для диспетчерского и удаленного контроля и обучения классификатора.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности диагностики состояния системы электроснабжения подвижного состава на основе методов теории искусственных нейронных сетей и принципов мультилатерации.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- провести анализ отказов элементов системы электроснабжения железной дороги, которые возможно диагностировать радиоволновым способом;

- дать обоснование адекватности выбранных диагностических признаков, сопровождающих неисправные режимы работы инфраструктуры контактной сети;

- теоретически и экспериментально исследовать характеристики сигналов, несущих полезную информацию об отказах элементов системы электроснабжения, и мешающих сигналов, определить их особенности для дальнейшего архивирования и использования в процессе обработки;

- разработать новый радиоволновой метод локализации зоны нарушения условий токосъема и поверхностного частичного разряда изоляторов;

- предложить усовершенствованный способ классификации отказов элементов контактной сети, основанный на регистрации электромагнитных излучений, и произвести оценку влияния диагностики системы электроснабжения на эффективность мероприятий по техническому обслуживанию инфраструктуры железных дорог.

2 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ И НАРУШЕНИЙ УСЛОВИЙ ТОКОСЪЕМА

В ходе анализа потребностей сотрудников реального производственного сектора сформулирована гипотеза, предполагающая разработку методов и алгоритмов локализации и классификации источников импульсных помех, вызванных неисправными элементами системы электроснабжения. Для сокращения количества предотказных и отказных состояний, а также снижения затрат на диагностику, необходимы меры по повышению эффективности поиска ПЧР на изоляторах и нарушений условий токосъема при локализации и классификации электромагнитных радиоизлучений от контактной сети железных дорог. Данное решение должно быть адаптировано как железнодорожные станции, так и перегоны между ними для универсальности метода диагностики. Структура метода диагностики контактной сети радиоволновым способом представлена на рисунке 2.1.

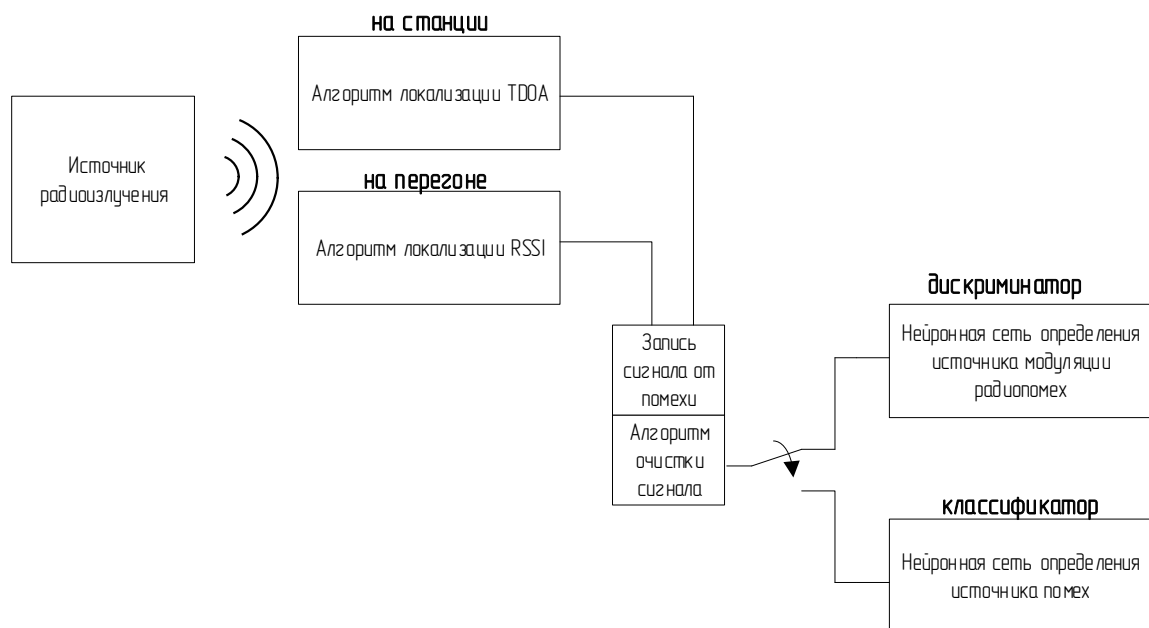


Рисунок 2.1 – Структурная метода диагностики контактной сети радиоволновым способом

Данные сигналов от источника радиоизлучения передаются в программные блоки обработки, реализующие собственные функции и зависят от локации поиска и имеют следующее назначение:

- локализаторы для станции и перегона. Метод поиска по времени задержки между приходом сигнала (TDOA) локализует его источник радиосигнала. Алгоритм поиска RSSI для перегона позволяет по уровню радиоизлучения локализовать его источник вдоль пути;
- дискриминатор. Нейронная сеть для классификации модуляции – идентифицирует источник мешающих влияний от радиостанций и систем беспроводной передачи данных;
- классификатор. Нейронная сеть для классификации электромагнитных возмущений, которая обучена на поиск паразитных и мешающих влияний от железнодорожной инфраструктуры и других источников мешающих влияний.

2.1 Алгоритмы локализации источников нештатного электромагнитного излучения на железнодорожной станции

Задачу локализации источников радиоизлучения целесообразно разбить на отдельные компоненты на этапе разработки алгоритма. Это позволит снизить требования к вычислительной мощности и улучшить производительность разработчиков. Такой подход не только сократит затраты на производство конечного устройства, но и укрепит его конкурентные преимущества на рынке систем, направленных на повышение качества радиосвязи. Таким образом, можно выделить два основных этапа снижения влияния электромагнитных радиоизлучений: обнаружение местоположения и идентификация её источника. Основной задачей при диагностике радиоволновым методом источника помехи как источника радиоизлучения является определение его координат с максимальной точностью при минимальной стоимости необходимого для поиска оборудования. Алгоритм для данной реализации представлен на рисунке 2.2.

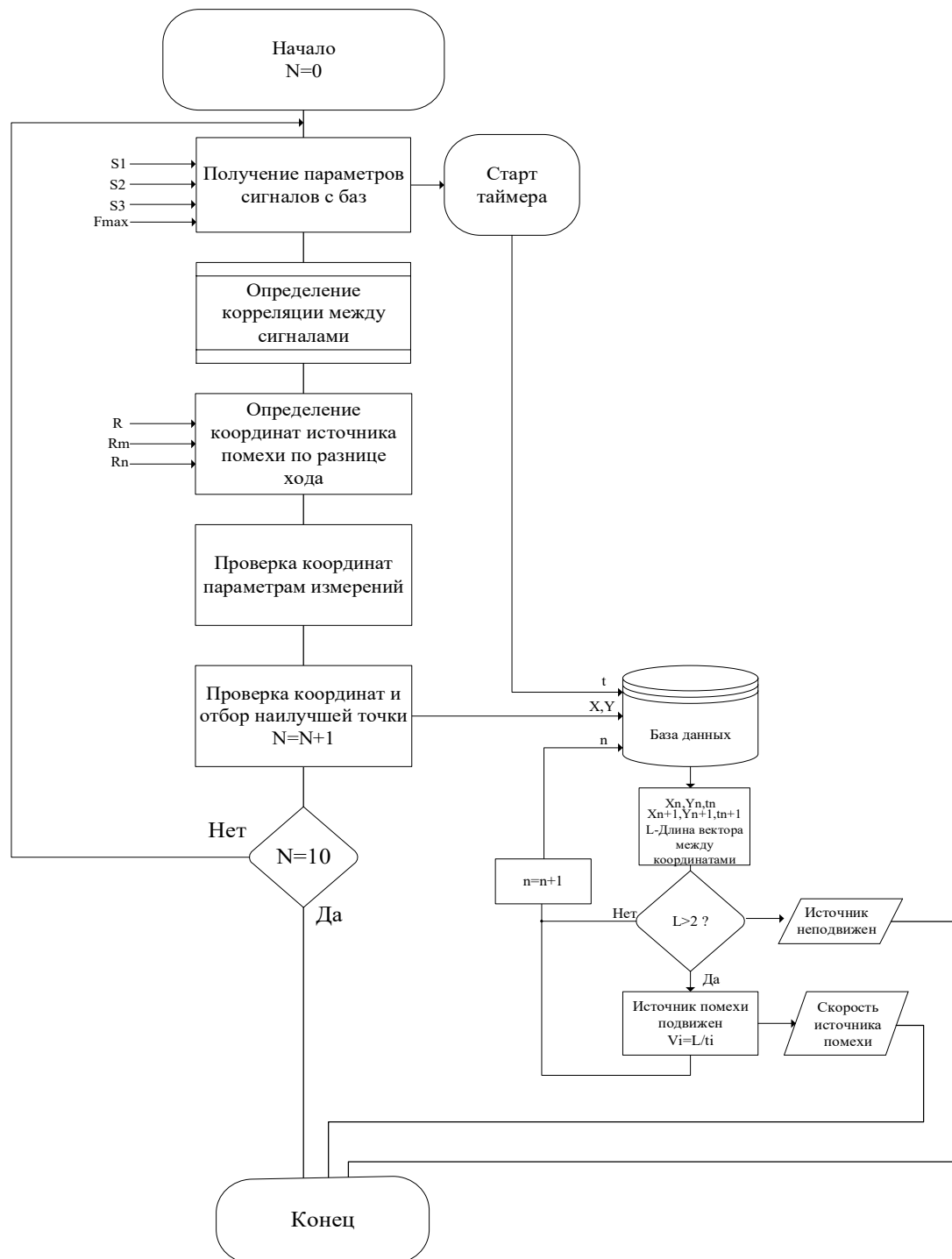


Рисунок 2.2 – Диаграмма алгоритма поиска источников электромагнитного радиоизлучения

Существующие пассивные схемы поиска радиоизлучений, как сигналов, могут быть классифицированы следующим образом:

- 1 угломерная (триангуляционные);
- 2 разностно-дальномерно-угломерные;

- 3 угломерно-разностно-дальномерные;
- 4 разностно-дальномерная (гиперболические);
- 5 разностно-доплеровские.

Методы накладывают особенности на реализацию аппаратной части, необходимой для реализации алгоритмов. Например, методы 1-4 требуют для получения результатов на плоскости, как минимум, четырех баз измерения [42], а результатов в пространстве как минимум четырех точек измерения, а разностно-доплеровский метод позволяет провести измерения с применением одной базы. [43]. Однако однобазовые методы не подходят для пассивной радиолокации по причине необходимости в излучающем устройстве. Рассмотрим модель разностно-дальномерной системы: пусть $S(t)$ – сигнал, генерируемый источником радиоизлучения, а $S_1(t_1)$ и $S_2(t_2)$ – сигналы, принятые на приёмных устройствах, расположенных на расстоянии R друг от друга. Расположение источника излучения и принимающих устройств представлено на рисунке 2.3

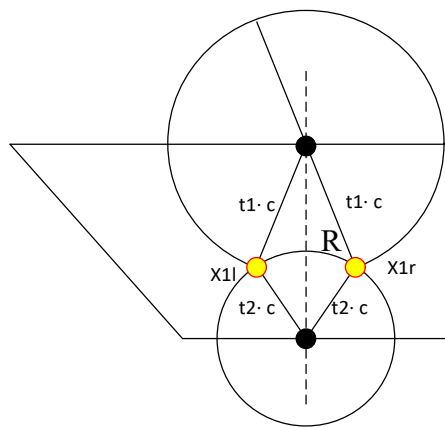


Рисунок 2.3 – Точки измерения уровня радиоизлучения

где t_1 – время хода сигнала от источника излучения до первой базы приёма; t_2 – время хода сигнала от источника до второй базы приёма.

Тогда разницу времени хода сигнала от источника радиоизлучения до точек измерения можно представить в виде системы уравнения 1.

$$|t_1 - t_2| = \Delta. \quad (1)$$

Для определения Δ воспользуемся функцией взаимной корреляции сигналов $S_1(t_1)$ и $S_2(t_2)$.

$$B_{ss}(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_1(t_1) \cdot S_2(t_2) dt. \quad (2)$$

При дальнейшей работы с программными средствами необходимо дискретизировать сигнал, что переносит расчёт ВКФ в дискретную форму:

$$B_{ss}(n) = \sum_{j=-\infty}^x S_1(j) \cdot S_2(j - n). \quad (3)$$

Переход от аналогового сигнала к дискретному описан теоремой Уитакера-Шенона-Котельникова, которая гласит, что для сигнала, представленного последовательностью дискретных отсчетов, точное восстановление возможно, только если частота дискретизации более чем в 2 раза выше максимальной частоты в спектре сигнала. Визуализация ВКФ представлена на рисунке 2.4. Таким образом взаимосвязь между Δ и n можно установить через частоту дискретизации F_s :

$$F_s = 2 \cdot F_{max}. \quad (4)$$

Тогда период дискретизации составит:

$$T_s = \frac{1}{F_s}. \quad (5)$$

Взаимосвязь задержки по времени и отсчётов дискретизации равна:

$$\Delta = T_s \cdot n. \quad (6)$$

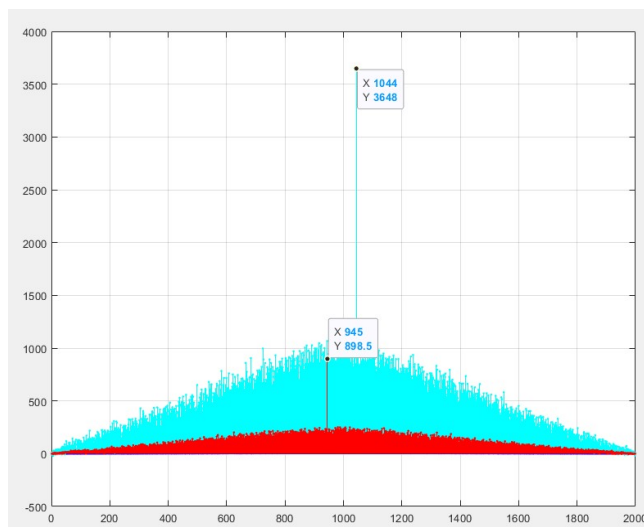


Рисунок 2.4 – Визуализация функции взаимной корреляции

При оценке возможности реализации измерений и последующего определения корреляции выявлено, что усложнение системы и введение третьего сигнала приводит к упрощению системного кода. Так при оценке двух сигналов, использовалась величина разницы времени прихода между ними – дельта, через которую по системе уравнений с модулем получалось находить величину пути сигнала до точек и его конечные координаты. Поиск пиков функции, т.е. отсчётов, при которых значение ВКФ максимально, осуществляется через алгоритм перебора массива данных с поиском максимального значения ВКФ. Этот процесс можно описать как отбор максимального значения в ряде данных с сохранением номера отсчёта, при котором оно достигается. В случае, если источник находится за пределами измерительных станций (баз), необходимо применять гиперболические методы, которые в зарубежной литературе именуются TDOA Hyperbolic Methods [44]. Иллюстрация такого метода приведена на рисунке 2.5.

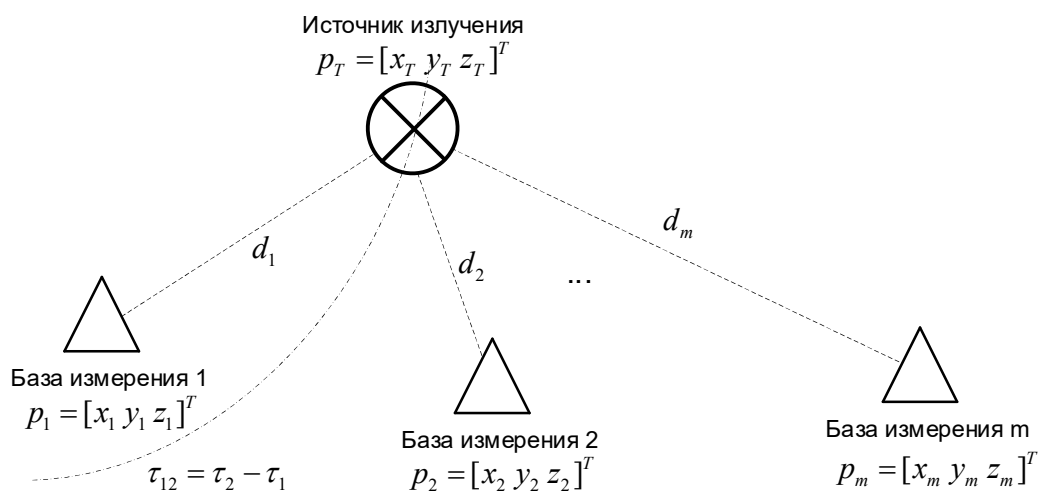


Рисунок 2.5 – Гиперболическая модель TDOA [44]

Формально определение координат источника электромагнитных возмущений сводится к решению системы нелинейных уравнений:

$$\tau_{12} = \frac{\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2}}{c} - \frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}}{c}, \quad (7)$$

$$\tau_{1M} = \frac{\sqrt{(x-x_M)^2+(y-y_M)^2+(z-z_M)^2}}{c} - \frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}}{c}, \quad (8)$$

где τ – разница во времени прихода сигнала на базу измерения; $x_1, y_1, z_1, x_M, y_M, z_M$ – координаты расположения измерительных баз; c – скорость света.

В ряде источников описывается методика получения значений τ_{21} и τ_{23} , которая основывается на технике взаимной корреляции сигналов, поступающих на различные базы измерений. Однако следует учитывать, что в программном виде решение этих уравнений имеет определённые трудности, как сложность реализации для автоматизированных расчётов. Существуют несколько алгоритмов, позволяющих осуществить переход к автоматизированным системам через разложение в ряд Тейлора [45]; по методу Gibbs-GLMB [46]; эмпирические алгоритмы [24, 44, 47]. Наибольшую эффективность показало решение через разложение в ряд Тейлора. Если принять местоположение источника радиоволнового излучения:

$$p_{T_0} = [x_{T_0}, y_{T_0}, z_{T_0}]^T, \quad (9)$$

$$f(x) = f(x_{T_0}) + \frac{f'(x_{T_0})}{1!} (x_T - x_{T_0}) + \frac{f''(x_{T_0})}{2!} (x_T - x_{T_0})^2, \quad (10)$$

$$P_i = c\tau_{1i} = f_i(p_T) = d_i - d_1 = \|p_T - p_i\| - \|p_T - p_1\|, \quad (11)$$

где P_i – позиции баз измерений, которые заранее известны. Функции $f_i(\cdot)$ линеаризованы через ряд Тейлора с первоначальной позицией цели:

$$P_i - f_i|_{p_{T_0}} = \frac{\partial f_i}{\partial x_T} \Big|_{p_{T_0}} (x_T - x_{T_0}) + \frac{\partial f_i}{\partial y_T} \Big|_{p_{T_0}} (y_T - y_{T_0}) + \frac{\partial f_i}{\partial z_T} \Big|_{p_{T_0}} (z_T - z_{T_0}), \quad (12)$$

$$\Delta x_T = x_T - x_{T_0},$$

$$\Delta y_T = y_T - y_{T_0},$$

$$\Delta z_T = z_T - z_{T_0}.$$

Уравнения для матриц размерностью $i=2,3,\dots,M$ (количество баз измерения):

$$\begin{bmatrix} P_2 - f_2 \\ P_3 - f_3 \\ \vdots \\ P_M - f_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial x_T} & \frac{\partial f_2}{\partial y_T} & \frac{\partial f_2}{\partial z_T} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_T} & \frac{\partial f_3}{\partial y_T} & \frac{\partial f_3}{\partial z_T} \\ \frac{\partial f_M}{\partial x_T} & \frac{\partial f_M}{\partial y_T} & \frac{\partial f_M}{\partial z_T} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Определение трёхмерных координат возможно при наличии не менее четырёх базовых точек и осуществляется по следующим формулам:

$$\widehat{\Delta x} = (A^H A)^{-1} A^H P, \quad (14)$$

$$\hat{x} = \widehat{\Delta x} + p_{T_0}. \quad (15)$$

Результативность измерений в случае поиска источника радиоволнового излучения на этапе алгоритма и математической модели можно оценить по методу минимизации среднеквадратического отклонения от первоначального значения (RMSE). Оценить ошибку, найти её математическое ожидание, дисперсию и среднеквадратическое отклонение по формулам:

$$M(X) = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n}, \quad (16)$$

$$D(X) = M(X - M(X))^2, \quad (17)$$

$$\sigma = \sqrt{D_x}. \quad (18)$$

Для реализации разностно-временного способа определения местоположения источника радиосигналов предложен алгоритм на основе разложения функции в ряд Тейлора. Результат представлен на рисунке 2.6.

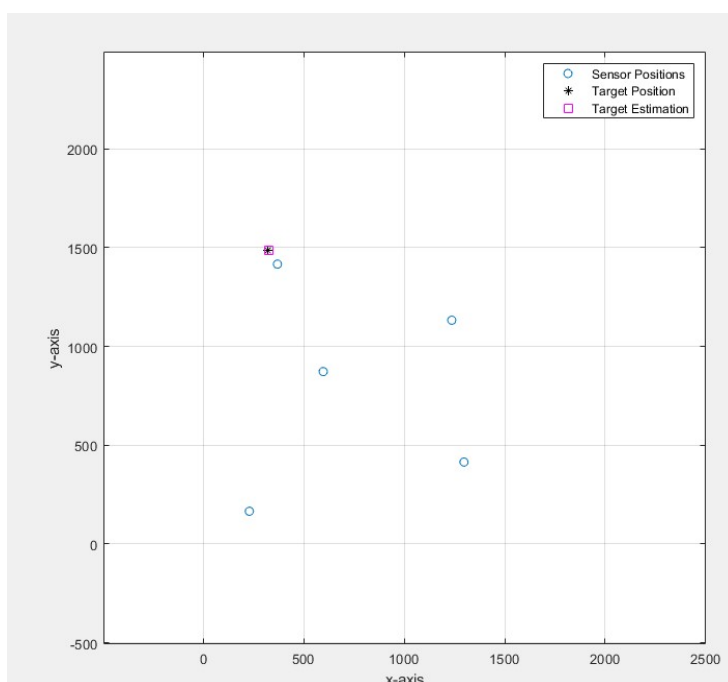


Рисунок 2.6 – Результат работы алгоритма поиска источника излучения через разложение в ряд Тейлора

Моделирование результатов работы комплекса показало низкую точность алгоритмов, однако, замена алгоритма на разложение в ряд Тейлора позволила снизить ошибку до приемлемых 2,5 м при 5 км радиуса разнесения станций. Оценка точности локализации проводилась методом усреднения значений отклонения фактического значения от определенного на 10 измерениях в близости от радиуса измерения. Необходимо заметить, что данная совокупность уравнений не является системой, так как каждое уравнение является независимым. Результат представлен на рисунке 2.7. Для определения разницы между фактической и определенной координатой источника электромагнитных радиоизлучений применяется метод ближайших соседей, который описывается формулой Евклидова расстояния:

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2}, \quad (19)$$

где $d(p, q)$ представляет собой евклидово расстояние между двумя точками p и q . Это расстояние вычисляется как квадратный корень из суммы квадратов разностей соответствующих координат точек p и q . В формуле, суммирование проводится по всем измерениям от 1 до n , где n – это количество измерений пространства, в котором находятся точки; q_i и p_i обозначают i -ю координату точек q и p соответственно. Таким образом, для каждого измерения i , вычисляется квадрат разности координат q_i и p_i , и все эти значения суммируются.

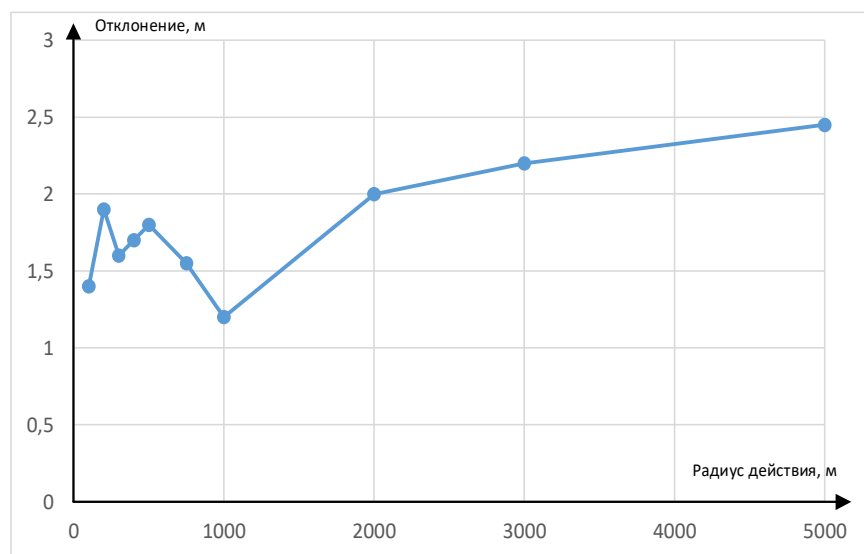


Рисунок 2.7 – Отклонение от координат источника радиоизлучения

Определение местоположения возможно при применении синхронизации времени, что обеспечивается модулем GPS/ГЛОНАСС с точностью $1 \cdot 10^{-9}$ с, что достаточно для определения местоположения с максимальной точностью, не превышающей допустимый порог. Точность данного метода моделирования оценивалась в зависимости от размера поля измерения, которое представляет собой стороны квадрата с центром в нулевой точке, которая, в свою очередь представляет собой координаты одной из баз измерения.

Немаловажной проблемой при работе с методом TDOA или методом разности времени прихода, является отражение сигнала, которое может вносить значительные искажения и вызывать ошибки в определении местоположения. Данная проблема возникает из-за того, что отраженный сигнал следует более длинному пути, чем прямой сигнал, и поэтому приходит позже, что может быть ошибочно интерпретировано как указание на более дальнее расположение источника сигнала. Однако в литературе описано несколько подходов, которые могут использоваться для учета или минимизации влияния отражений:

- методы устранения многолучевого распространения: эти методы пытаются обнаружить и устранить влияние отраженных сигналов на измерения. Они могут включать сложные алгоритмы обработки сигналов и могут быть сложными в реализации;
- использование дополнительной информации: если известны характеристики окружающей среды (например, местоположение зданий или других объектов, которые могут отражать сигналы), это может быть использовано для улучшения оценки местоположения;
- использование большего количества приемников: наличие большего количества приемников позволит системе лучше обрабатывать отраженные сигналы и делать более точные оценки местоположения.

Эффективность каждого подхода зависит от конкретных условий, включая характеристики сигнала и окружающей среды. Координаты источника задаются в случайном порядке, как и местоположение баз измерения. Программный комплекс позволяет использовать реальные геометрические характеристики с сервиса

OpenStreetMap зданий и сооружений для построения многолучевой модели отражения сигналов от источников радиоволнового излучения с учетом конструкционных материалов этих зданий и сооружений. Широкая номенклатура возможных объектов позволяет учесть затухание сигнала при отражении и получить точный уровень сигнала и времени хода для модели. Такая модель представлена на рисунке 2.8. Она имитирует распространение радиоволнового излучения от ПЧР на изоляторах контактной сети на станции Хабаровск-2 с учетом отражений.

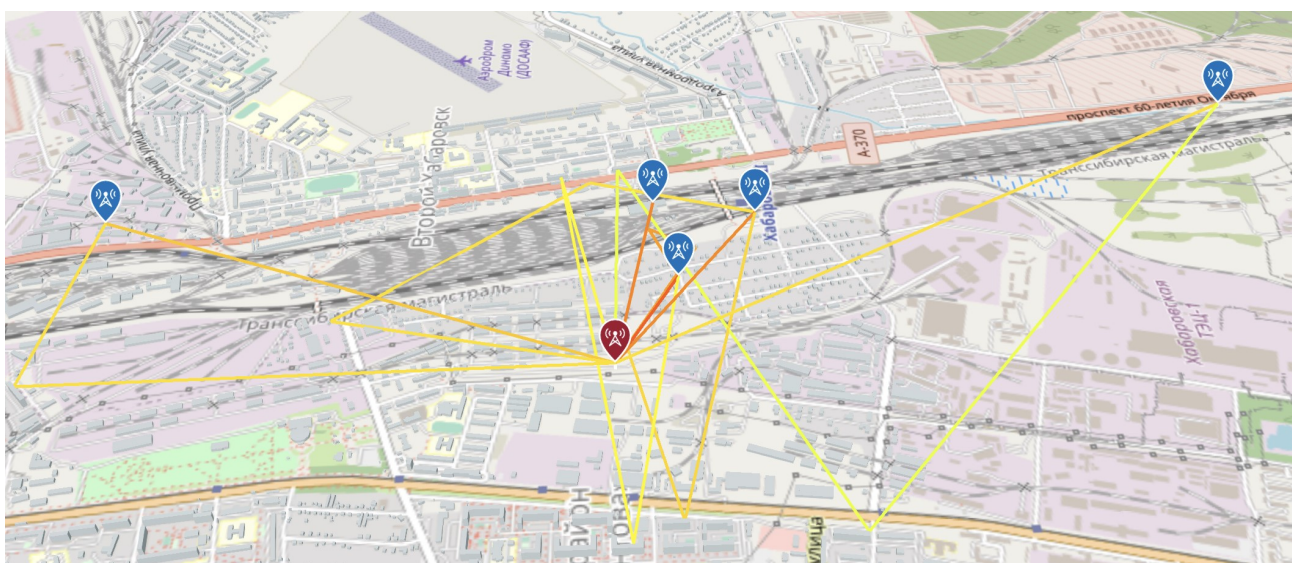


Рисунок 2.8 – Моделирование отражения лучей от объектов и рельефа местности

Поскольку для определения местоположения применяется автокорреляционная функция, то возможно использовать принципы снижения влияния многолучевого отраженного сигнала на точность определения местоположения. Данные, внесенные в системы мониторинга, диагностирования и учета отказов, такие как ЕСМА или системы других подразделений, часто содержат координаты объектов инфраструктуры, которые подлежат обслуживанию и ремонту. На ДВОСТ ж. д. широко распространена практика применения мобильных терминалов для учета работ по географическим координатам. Используя эти данные, можно дать предварительную оценку объектов

инфраструктуры, попадающих в интервал ближайших устройств. Для этого применяется метод поиска ближайших соседей (k-NN) в многомерном пространстве, основанный на приведенной выше формуле расчета Евклидова расстояния, результат которого представлен на рисунке 2.9.

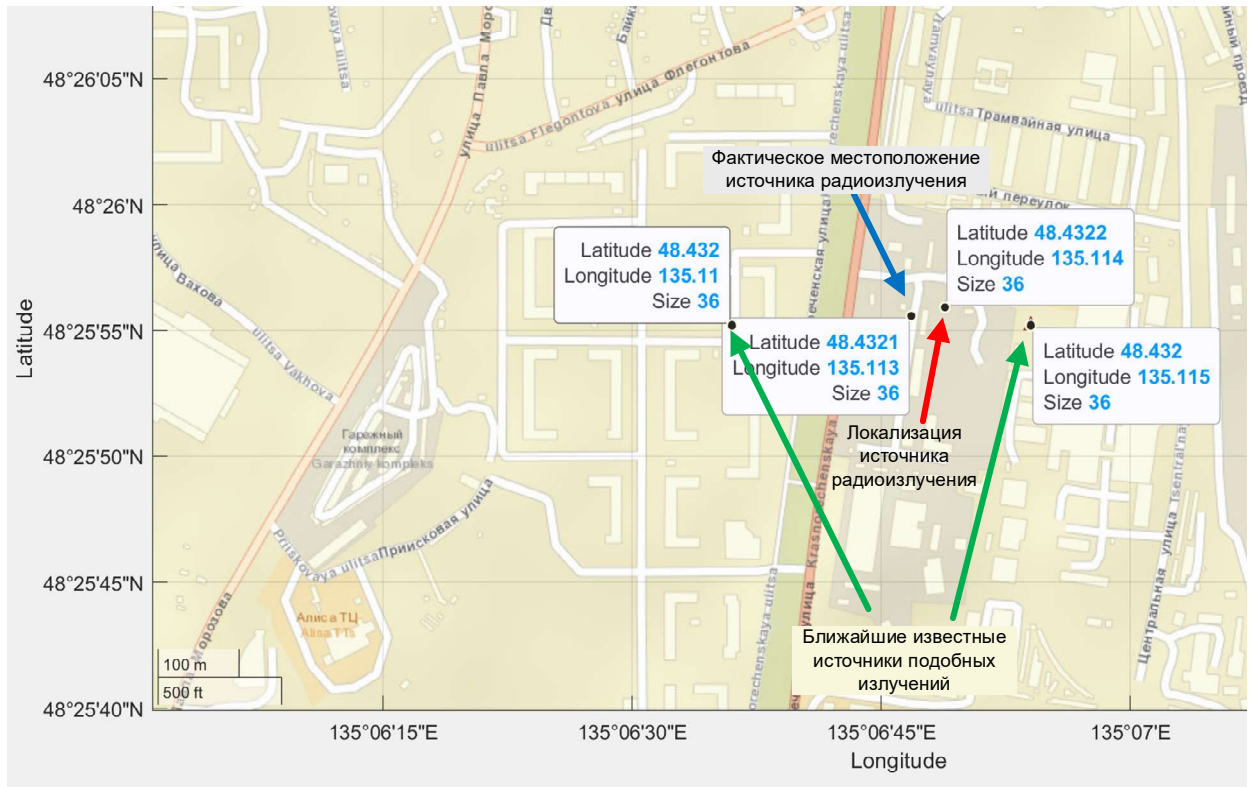


Рисунок 2.9 – Моделирование поиска «Ближайших соседей»

Апробация алгоритма и оборудования проводилась на базе Хабаровского техникума железнодорожного транспорта. Полигон техникума позволил проверить возможность практической реализации метода мультилатерационной техники локализации источника радиоизлучения через 5 баз измерения на основе программно-определяемых раиоприемников RTL-SDRv3, объединенных единой системой синхронизации, и источника моделированной помехи на основе Hack-RF. Следует отметить, что для обеспечения совместимости оборудования с диапазоном 2,13 – 2,15 МГц применялись адаптированные для этого диапазона версии с поддержкой режима Direct Sampling Mode и КВ диапазона 500 кГц – 24 МГц. В качестве модели источника помехи была предложена модель Мидлтона, которая

трансформирована в IQ-сигнал. Функциональная схема комплекса локализации радиоизлучения и источника радиоизлучения представлена на рисунке 2.10.

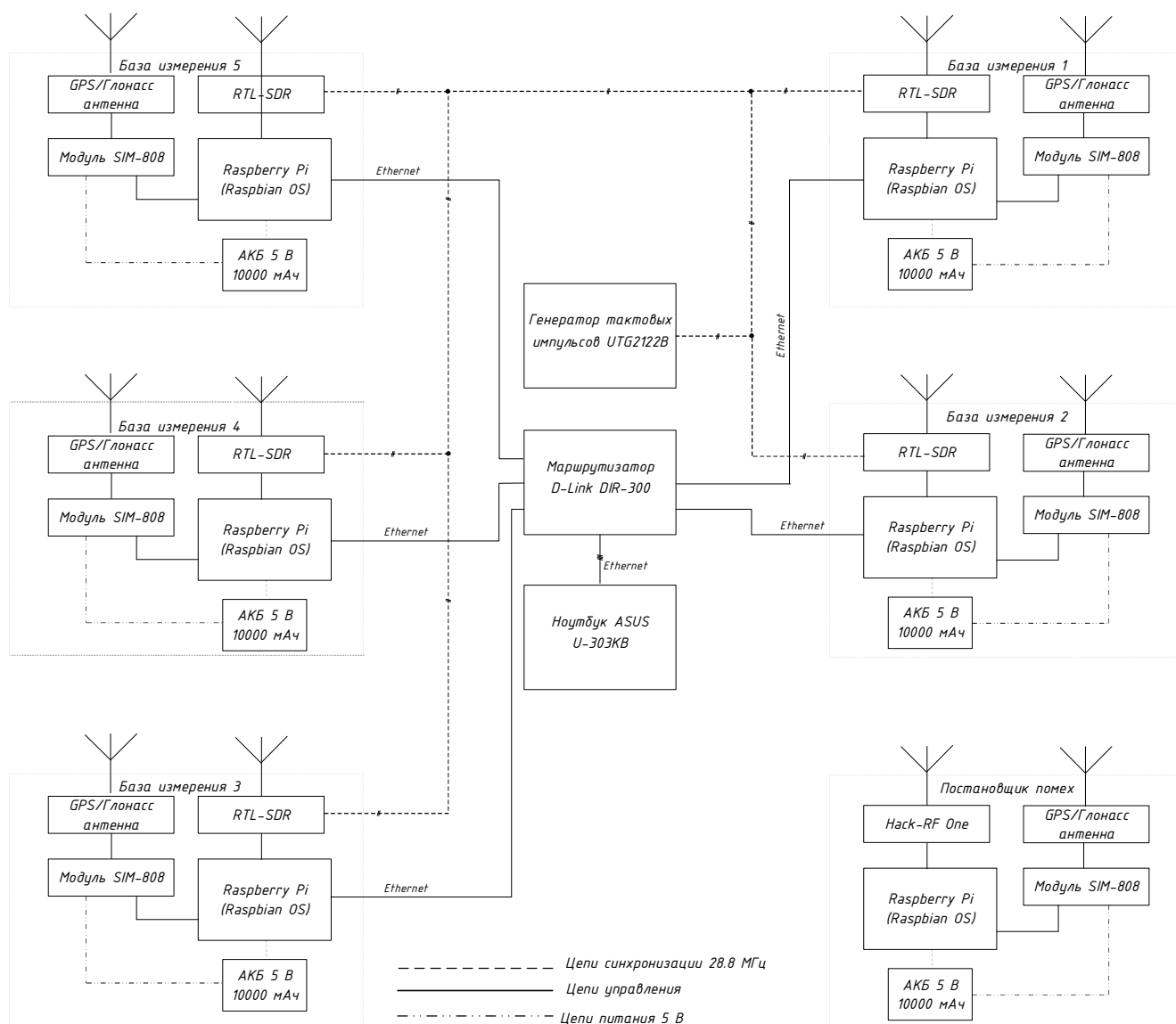


Рисунок 2.10 – Функциональная схема комплекса локализации источника радиоизлучения

Выбор местоположения для баз измерения был произведен в случайном порядке в удобных для измерения точках. Проверка корректности работы синхронизации между устройствами проводилась путем подачи радиосигналов различной модуляции от Hack-RF для проверки синхронности получаемого сигнала, также были учтены возможная задержка сигналов от генератора из-за разницы в длине синхронизирующего кабеля, поэтому для всех баз использовался

одинаковый отрез кабеля UTP-8cat с длиной 50 метров. Генерация радиопомехи согласно модели Мидлтона, трансформированной в IQ-сигнал на Hack-RF, проводилась через код на языке Python. Построение карты полигона с отмеченными точками локализации радиопомехи для визуальной оценки результатов представлены на рисунке 2.11.

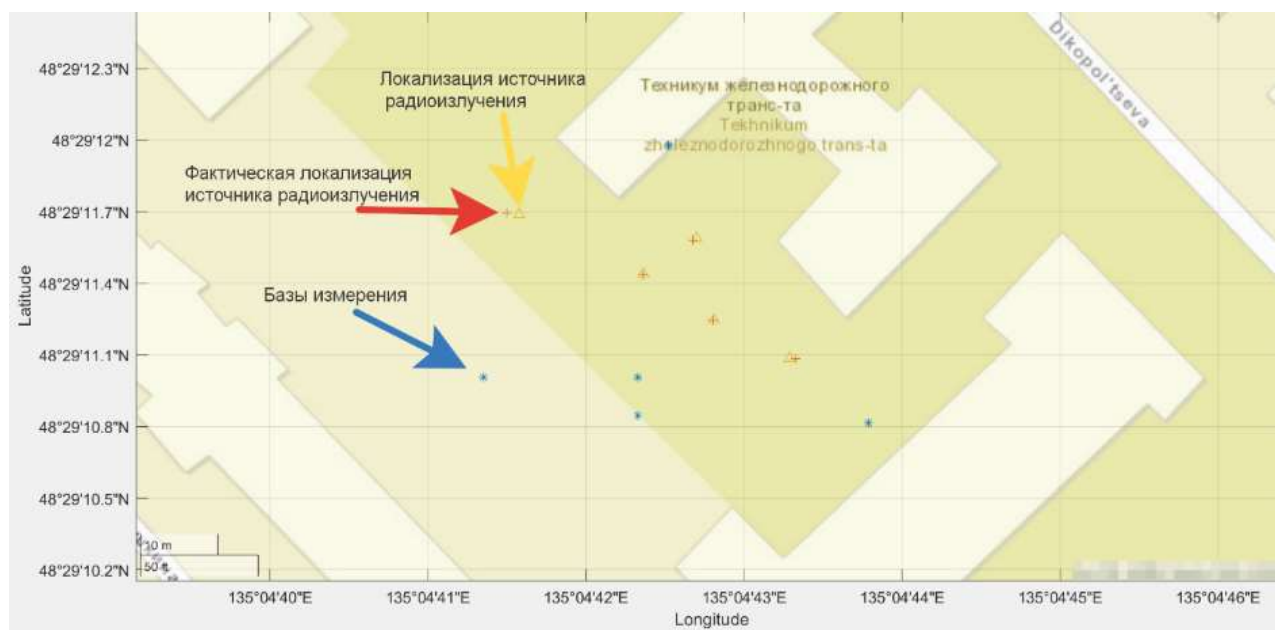


Рисунок 2.11 – Результаты эксперимента по локализации источника электромагнитного излучения

На каждой точке проводилось по 30 минутных записей IQ-сигнал в формате wav на внутреннюю память устройств. Обработка результатов, вычисление времени задержки сигналов и выполнение алгоритма локализации, а также визуализация результатов проводилась в программной среде Matlab. Оценка точности алгоритма на основе разложения гиперболических уравнений в ряд Тейлора через среднеквадратическое отклонение представлена на рисунке 2.12.

Оценка проводилась по 5 случайно взятым точкам в диапазоне пространства полигона техникума. После этого производилась оценка методом среднеквадратического отклонения от значения точки радиоизлучения для 30 замеров.

При небольшом испытательном круге разброс значений <100 м среднеквадратичное отклонение не превышает 2 м, что входит в пределы, озвученные представителями ОАО «РЖД». После оценки точности алгоритма была проведена оценка влияния количества баз измерения на точность алгоритма.

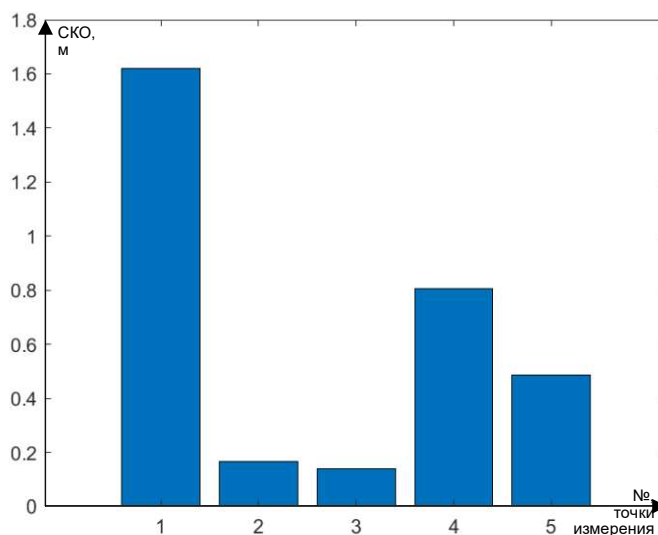


Рисунок 2.12 – Отклонение от координат источника радиоизлучения

В ходе оценки была выявлена следующая закономерность: увеличение количества точек измерения не увеличивает точность алгоритма, а снижение ниже 5 выводит алгоритм из строя, что представлено на рисунке 2.13 и демонстрирует зависимость точности работы алгоритма от количества баз измерения.

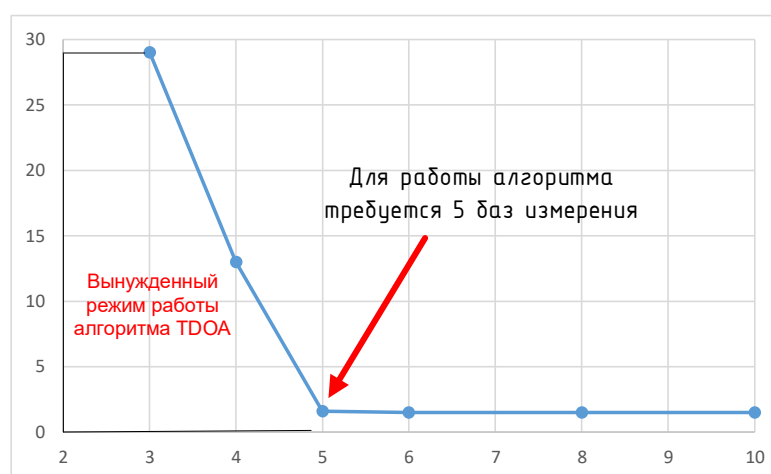


Рисунок 2.13 – Отклонение от координат источника радиоволнового излучения при различном количестве баз измерения

Таким образом, анализ результатов эксперимента по точности показывает достаточную для такой системы точность. Оценка работы алгоритма с различным количеством баз измерения показывает оптимальное количество в 5 баз измерения. Алгоритм на основе разложения гиперболического уравнения в ряд Тейлора с применением корреляционных функций и программно-определяемых радиосредств демонстрирует возможность применения для точной локализации источников радиоволновых излучений.

2.2 Локализация источников нештатного электромагнитного радиоизлучения на перегоне

Анализ отказов контактной сети показывает, что большая часть случаев выхода из строя изоляторов происходит не на станции, а на перегоне, что требует освещения проблем диагностики нарушений условий токосъема и особенно нарушений в работе изоляторов на участках железных дорог. Предложенный выше метод поиска источника по принципу мультилатерации нескольких баз измерения невозможен для обширного полигона электрифицированных железных дорог. Тем не менее существует метод, основанный на схожих комплектующих и позволяющий локализовать источник электромагнитного радиоизлучения. Метод для локализации по известным координатам приемника и уровню сигнала был представлен в начале данной главы, как алгоритм RSSI. Данный метод представлен на рисунке 2.14.

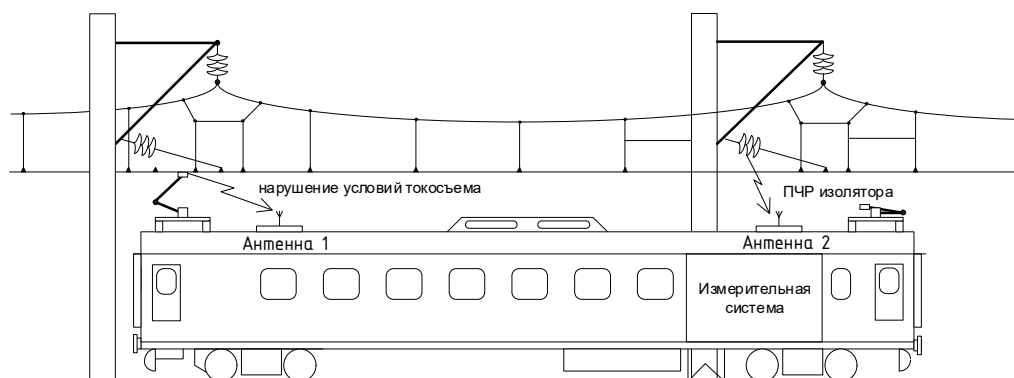


Рисунок 2.14 – Диагностическое решение на базе ВИКС [10]

Частным случаем реализации данного метода является диагностика с борта вагона-измерителя контактной сети (ВИКС), который был предложен в исследовании группы авторов из ПГУПС [10], и представлял собой способ доработки ВИКС путем установки комплекта из двух антенн и системы сбора и анализа данных по электромагнитному радиоизлучению, также предполагалось, что будут осуществлены дублирующие акустические и оптические измерения, которые позволят реализовать комплексный сбор диагностической информации.

Однако данный подход требует применения ВИКС, что накладывает свои ограничения на возможность диагностики при отказах или при запросах от смежных подразделений. Данное решение соответствует плановой практике проверок и проездов для выявления несоответствия в работе технических средств. Оперативная диагностика требует большей гибкости и подходов к диагностированию в отказах технических средств.

Развитие систем SDR-радио, которое может быть использовано в качестве диагностического оборудования, позволяет расширить спектр вовлеченного в процесс диагностики носителей диагностического оборудования:

- работники при обходе;
- автотранспорт;
- поезда;
- специализированные вагоны-лаборатории (ВИКС, ИНТЕГРАЛ, ЭРА).

Применение различных платформ носителей требует одновременной унификации под различные требования к весу, габаритам и возможностям.

Для оценки данного решения ключевым является анализ возможности локализации источника электромагнитных радиоизлучений. В данном исследовании анализ проводился по модели Лонгли-Райса, которая представлена на рисунке 2.15. Основные математические аспекты модели включают в себя потери на распространение радиоволн, рассчитываются с учетом различных факторов, таких как расстояние между передатчиком и приемником, частота сигнала, высота антенн, а также характеристики местности.



Рисунок 2.15 – Распространение уровня сигнала по модели Лонгли-Райса

Модель учитывает характеристики местности, включая рельеф, растительность и здания, что влияет на дифракцию, отражение и поглощение сигнала. Модель использует статистические методы для оценки вероятности достижения определенного уровня сигнала на приемнике [48]. Основное уравнение для потерь на распространение (L) может быть представлено как:

$$L = L_{free\ space} + L_{diffraction} + L_{tropospheric} + L_{other\ losses}, \quad (20)$$

где $L_{free\ space}$ – потери в свободном пространстве;

$L_{diffraction}$ – потери дифракции;

$L_{tropospheric}$ – тропосферные потери;

$L_{other\ losses}$ – другие потери.

Модель Лонгли-Райса позволила получить данные по снижению уровня сигнала от источника электромагнитных радиоизлучений. Таким способом был проведен анализ распространения радиоизлучения с учетом чувствительности диагностического оборудования и коэффициента усиления антенны. Разница уровня сигналов в самом близком и самом дальнем от точки измерения месте представлено на рисунке 2.16. Следует отметить, что в данном исследовании не рассматривался вопрос точности показаний системы спутникового

позиционирования, так как они выходят за рамки данного исследования и специальности, однако может быть рассмотрена в будущем.

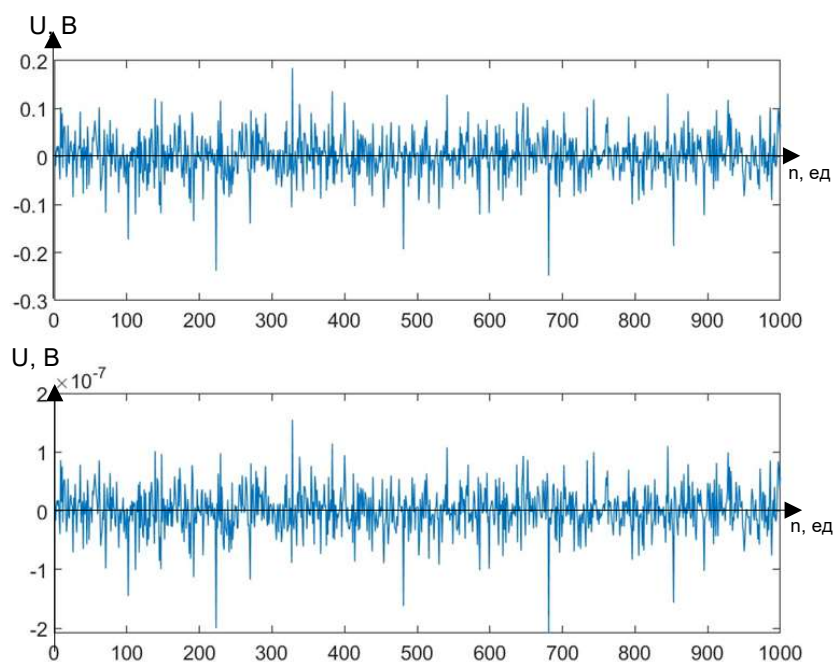


Рисунок 2.16 – Сигналы в ближней (сверху) и дальней (снизу) точках измерения

В качестве экспериментального подтверждения гипотезы о возможности выявления частичных разрядов на изоляторах контактной сети на полигоне Хабаровского региона ДВОСТ ж. д. был проведён эксперимент по локализации источника радиоизлучения от изоляторов контактной сети. Работниками Хабаровской дистанции электроснабжения Дальневосточной дирекции по энергообеспечению – структурное подразделение филиала ОАО «РЖД» для исследования были предоставлены номера и координаты опор контактной сети, которые в ходе обследования ультразвуковой аппаратурой УД-8М, гирлянды изоляторов на которых были определены как подверженные ПЧР. Из перечня опор были определены те, которые находились в пределах доступности автомобильным транспортом. Для подтверждения гипотезы был выбран участок с опорой № 348, представленный на рисунке 2.17.

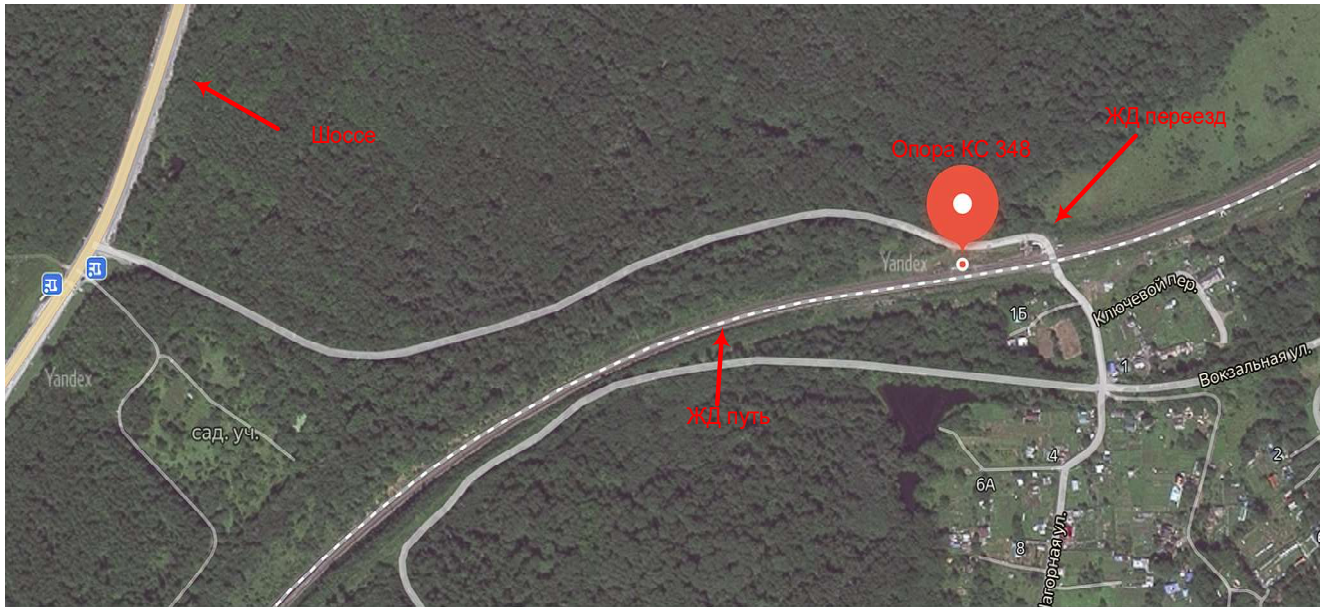


Рисунок 2.17 – Участок эксперимента

Для проведения эксперимента был использован автомобиль класса В с тремя комплектами оборудования RTL-SDR, подключенных к двум ноутбукам ASUS и одному микрокомпьютеру Raspberry Pi 2B+. Структурная схема оборудования для эксперимента на рисунке 2.18.

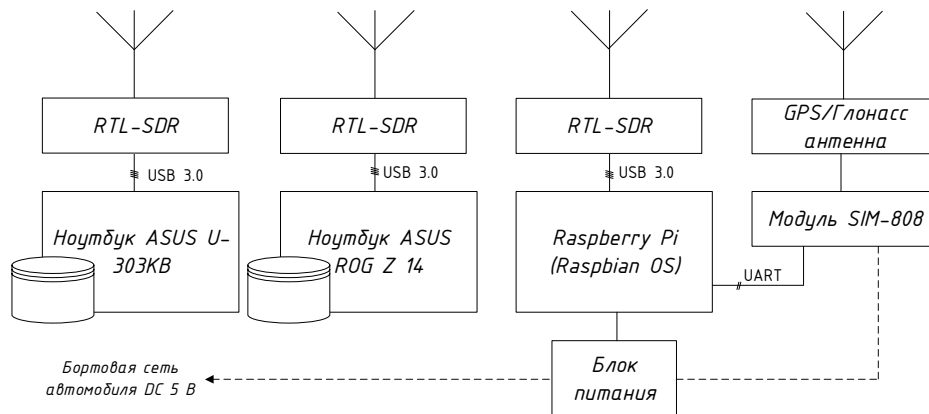


Рисунок 2.18 – Структурная схема оборудования для эксперимента

Опора контактной сети 348 представляет собой железобетонную опору из центрифугированного бетона для системы ДПР, а также обеспечивает переход на системы автоблокировки, что представлено на рисунке 2.19.



Рисунок 2.19 – Опора 348

При проведении эксперимента учитывалась особенность оборудования в виде полосы пропускания в 2 МГц. RTL-SDR не является диагностическим или измерительным оборудованием, однако он рассматривается в качестве основы для всего комплекса диагностирования контактной сети, поэтому необходимо учитывать особенности работы с данным приемником. Спектр радиоизлучения на центральной частоте 2,15 представлен на рисунке 2.20.

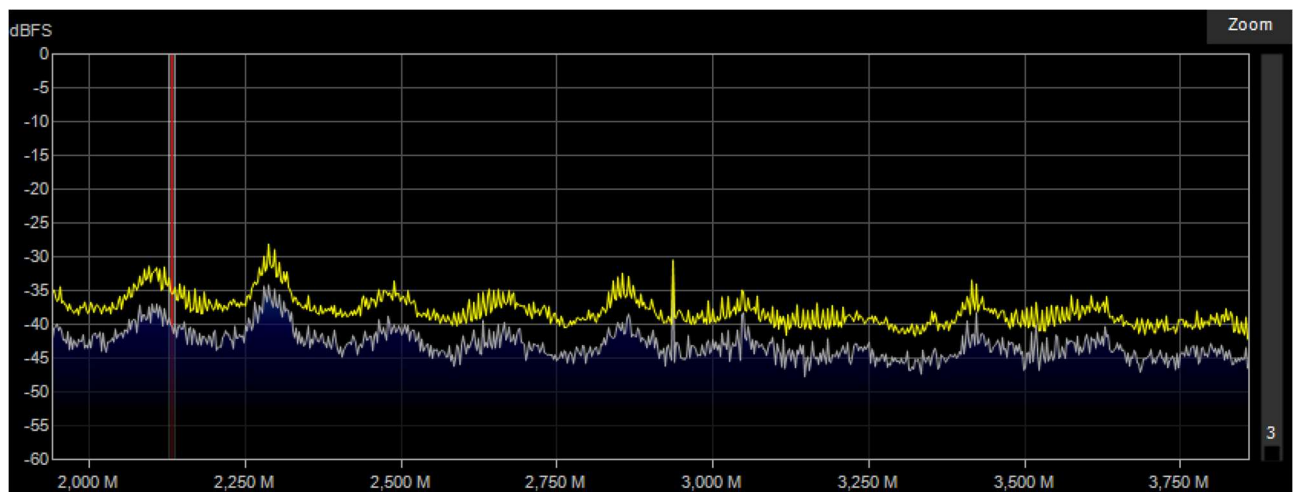


Рисунок 2.20 – Спектр радиоизлучения от изолятора контактной сети на центральной частоте 2,15 МГц.

За период наблюдений прошло 6 составов различного назначения, однако, они не оказали влияние на картину спектра радиоизлучения в гектаметровом диапазоне. Гектаметровый диапазон выбран из-за его закрепления за РЖД как диапазона поездной радиосвязи, что снижает влияние от радиооборудования общего назначения и повышает защищенность радиохулиганских и иных воздействий. Следует отметить, что показатель dBFS зависит от характеристик SDR устройства, поэтому для RTL-SDR формула перевода будет иметь следующий вид:

$$dBm = dBFS - 10, \text{ дБм.} \quad (21)$$

Анализ прохода комплекса по окрестным подъездным путям позволяет оценить дальность и точность локализации изоляторов с ПЧР и выявить точку наибольшего уровня излучения вызванных частичными разрядами. Демонстрирование прохода и точек измерения, выбранных с частотой 10 м, представлены на рисунке 2.21.

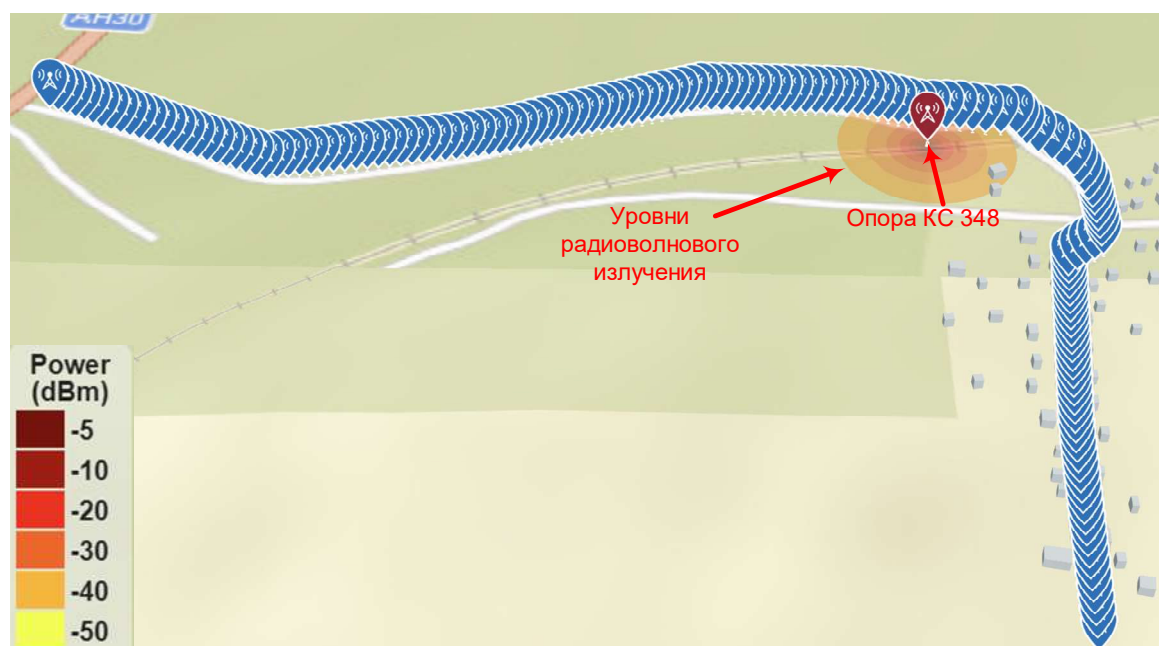


Рисунок 2.21 – Спектр радиоизлучения от изолятора контактной сети на центральной частоте 2,15 МГц.

Уровень радиоволнового излучения по точкам измерения представлен на рисунке 2.22. Таким образом, эксперимент позволяет дать оценку возможности диагностирования ПЧР на изоляторах контактной сети радиоволновым способом.

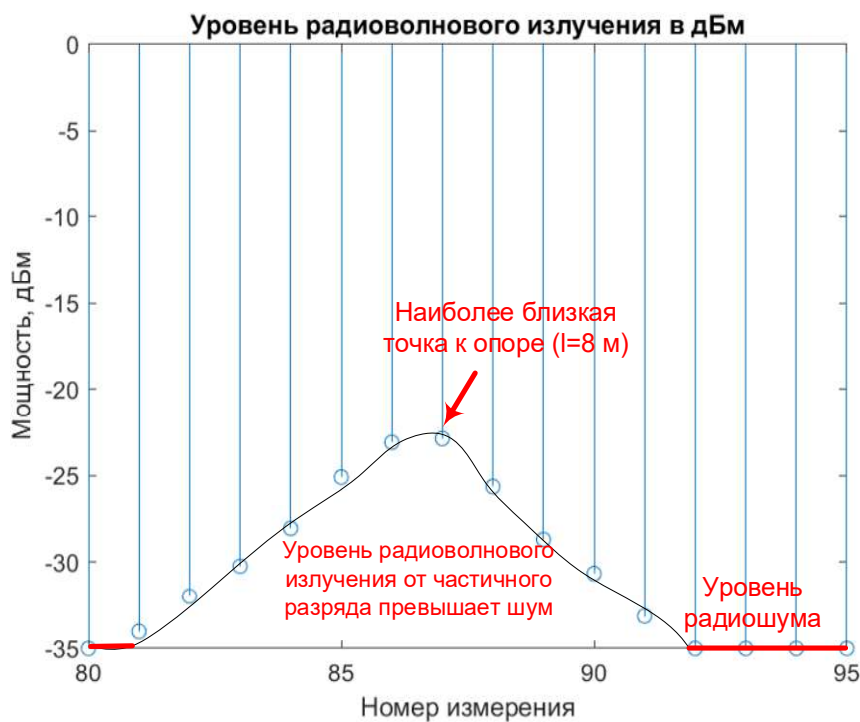


Рисунок 2.22 – Уровень сигнала радиоизлучения от изолятора контактной сети в полосе частот ГМВ ПРС

Выявлено, что подвижной состав, в случае его соответствия стандартам по электромагнитной совместимости, не оказывает существенного влияния на уровень радиоволнового излучения от изоляторов контактной сети.

Способ позволяет локализовать источник радиоволнового излучения по уровню мощности этого излучения. Полученные результаты демонстрируют перспективность метода для дальнейшей работы с системами классификации и локализации источников радиоволнового излучения от ПЧР изоляторов и нарушений условий токосъема контактной сети и дискриминации сигналов ГМВ ПРС и интермодуляционных излучений.

2.3 Классификация источников электромагнитного излучения с использованием методов машинного обучения

Анализ методик распознавания сигналов различной природы для последующего их определения и классификации является важной частью данного исследования. Запрос отрасли на систему поиска источников радиоволнового излучения помимо хозяйств электроснабжения затрагивает смежные подразделения такие, как региональные центры связи и локомотивные депо. Из-за влияния радиоволнового излучения на радиосвязь гектаметрового диапазона, на которую приходится основная нагрузка по организации движения поездов, зачастую именно сотрудники дирекций связи локализуют источники радиоизлучения. Классификации источника радиоволнового излучения и дискриминация модулированного сигнала, идущего от радиостанций организации движения поездов или радиолюбителей, позволяет повысить эффективность радиоволнового метода классификации.

Подготовка данных для восстановления сигнала начинается с нормализации для возможности наиболее корректного восстановления его из нескольких версий. Ключевой целью нормализации является приведение данных, к единому виду, который позволит сравнивать их между собой или использовать для расчёта схожести объектов. Аналитически нормализация сводится к формуле:

$$X_{\text{норм}} = \frac{(X_i - X_{\text{смещ}})}{X_{\text{ед}}}, \quad (22)$$

где X_i – текущее значение;

$X_{\text{смещ}}$ – величина смещения значений;

$X_{\text{ед}}$ – величина единичного интервала.

После нормализации методами определения взаимно-корреляционной функции происходит передвижка и наложение функций друг на друга, а затем определение среднего значения для получения сигнала с максимально корректной формой. При такой реализации первоочередной возникает проблема точной синхронизации источников измерения между собой. Так как методика TDOA

непосредственно измеряет время движения сигнала, то ошибка $1 \cdot 10^{-8}$ с может сдвинуть показания измерения на 3 метра для каждого из источников, максимальной же при принятой частоте дискретизации является 1,3 м. Оценка временных сдвигов представлена на рисунке 2.23.

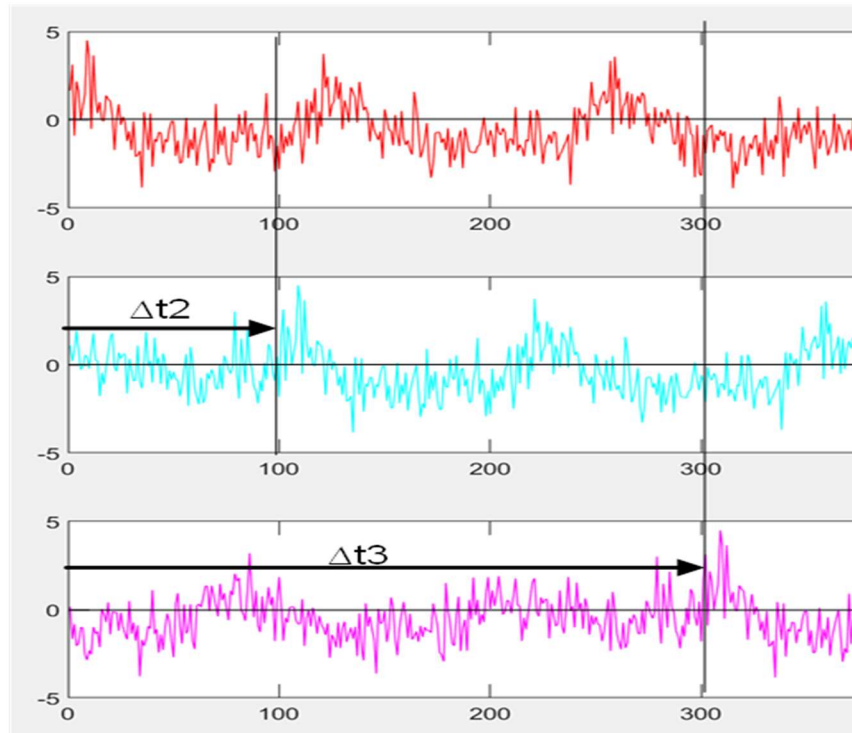


Рисунок 2.23 – Оценка временных сдвигов

Для хозяйства электроснабжения при последующем уточнении локализации оптоэлектронными или ультразвуковыми способами допустимой является точность в 10 м отклонения от источника излучения. Поэтому необходим источник тактовой частоты обеспечивающий точность свыше $4 \cdot 10^{-9}$ с. Для обеспечения такого уровня точности (около $1 \cdot 10^{-9}$ с) в данной работе рассматривалась возможность применения подстраиваемых источников точного времени, работающих на базе технологии спутниковой навигации, которые источником точного времени используют квантовые генераторы на спутниках. Таким модулем в данном исследовании выступит ZED-F9P, который может работать со всеми распространенными группировками спутников: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO и BEIDOU. Также стоит отметить возможность прямого подключения к

радиомодулям HackRF или RTL-SDR через специальный SMA-адаптер. Также по SMA коаксиальному интерфейсу необходимо к модулю точного времени подключить антенну, которая позволит обеспечить качественный приём спутникового сигнала. Такой антенной выступила ANN-MB Multi-Band, которая поставляется в комплекте с модулем. Данная антенна для качественного функционирования требует обеспечения прямой видимости и не допускает эксплуатации внутри помещений.

Существующие модели нейронных сетей требуют предварительного анализа сигнала и выбора наиболее подходящей методики. Чаще всего анализ сигналов сводится к последовательности, которая представлена на рисунке 2.24.

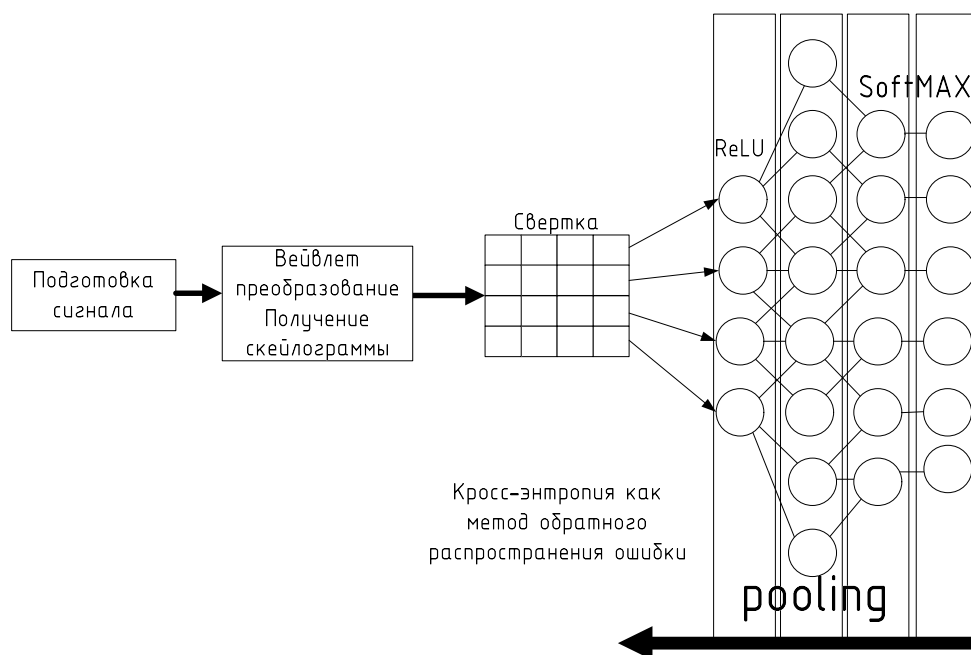


Рисунок 2.24 – Схема классификации сигналов

Наиболее часто рассматриваемым примером классификации сигналов являются медицинские исследования энцефало- и кардиограмм как сигналов и определение в них патологий, а также классификация видов модуляции в радиосвязи [49-52]. Приложение нейронных сетей в медицине позволяет повысить точность диагнозов и методов диагностики заболеваний, а классификация сигналов позволяет повышать качество и устойчивость связи.

Для классификации в исследовании А.И. Назимова [53] рассмотрена возможность применения вейвлетов для повышения качества обнаружения шумоподобных сигналов. Также в медицинском приложении чаще используют именно предварительное разложение в скейлограмму и затем обработку результатов через нейросетевой анализ изображений. Анализ проводился на нейронной натренированной сети SqueezeNet, которая является предварительно обученной сверточной нейросетью и имеет следующую структуру:

1000×1×1×512 нейронов с шагом [1 1] и отступом [0 0 0 0];

$$x_j^l = f(\sum_i x_i^{l-1} * k_j^l + b_j^l), \quad (23)$$

где x_i^l – карта признаков j (выход слоя l);

$f()$ – функция активации;

b^l – коэффициент сдвига слоя l для карты признаков j ;

k_j^l – ядро свертки j карты, слоя l .

Выпрямленную линейную функцию активации (rectified linear unit, ReLU), возможно отразить формулой:

$$f(s) = \max(0, s). \quad (24)$$

Полносвязный слой и следующий за ним слой SoftMax описывают формулой:

$$\text{softmax}(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^K e^{z_j}}. \quad (25)$$

Активационная функция SoftMax (мягкий максимум) позволяет производить классификацию нескольких объектов с выбором нейрона с большим выходным сигналом. График функции представлен на рисунке 2.25.

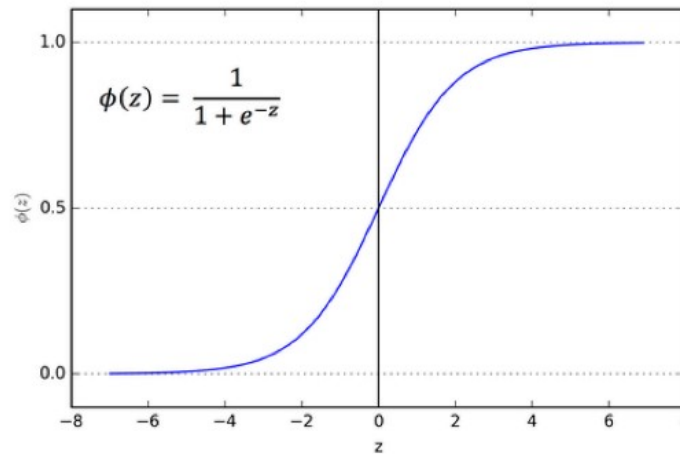


Рисунок 2.25 – График функции SoftMax

Однако современные подходы к применению нейронных сетей показывают, что наибольшую эффективность имеют многослойные сети, применяющие многоэтапную систему нормализации и отбраковки узлов. При этом к архитектуре нейронной сети также применяются требования по масштабированию, возможности передачи обучения на другие платформы и устройства, а также возможность реализации на различных языках программирования. Анализ различных архитектур проводился с помощью языка программирования Matlab. Основной целью являлось повышение точности при снижении необходимых аппаратных ресурсов для реализации нейронной сети. Таким образом сформировалась предварительная выборка из следующих архитектур:

- AlexNet [54];
- ResNet-X [55];
- GoogLeNet [56];
- Inception-vY [57];
- VCG-16 [58].

Сравнение нейронных сетей по точности и необходимой вычислительной мощности проводилось в большом количестве испытаний на разных обучающих выборках и примерах обучения. В качестве алгоритма обратного распространения ошибки применяется метод кросс-энтропии. Однако в отличие от алгоритмов ResNet не используется полносвязный слой, который увеличивает количество

параметров для оценки и повышает качество, но также требует повышенных вычислительных ресурсов. Скейлограммы (визуальное представление непрерывного вейвлет-преобразования) дают более детальный ответ на вопрос о распределении частот во времени и представлены на рисунке 2.26.

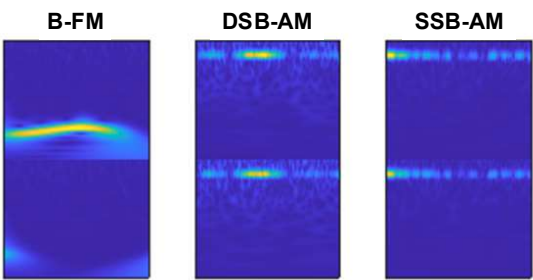


Рисунок 2.26 – Скейлограммы модуляций различного типа

Для этого проведём аналогичную оценку качества классификации радиосигналов различной модуляции, которая встречается в гектаметровом диапазоне частотная (B-FM), амплитудная (AM) и амплитудная с одной боковой полосой (SSB-AM). Результаты классификации с использованием вейвлета представлены на рисунке 2.27.

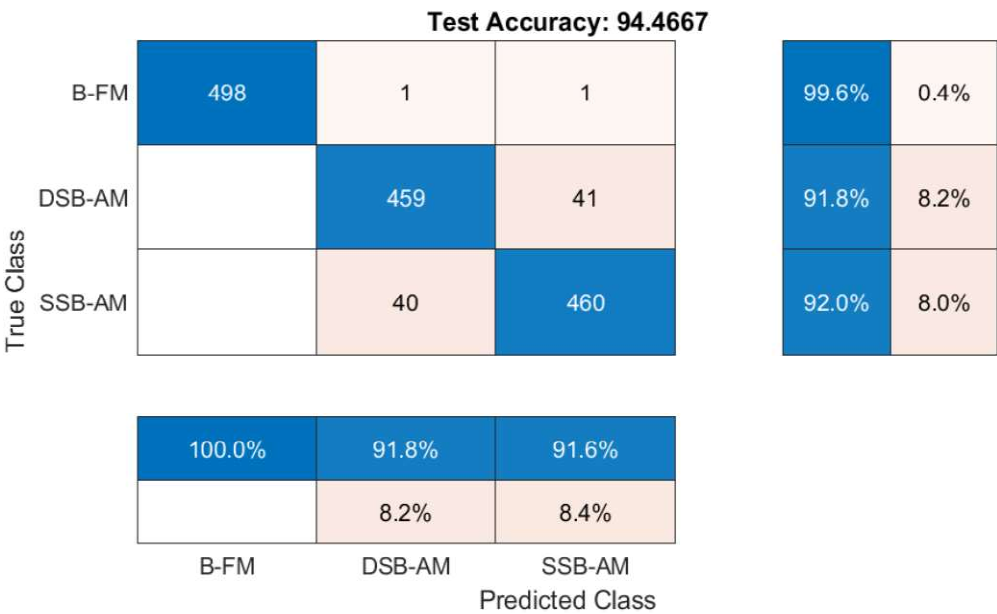


Рисунок 2.27 – Результаты классификации модуляций различного типа через вейвлет-преобразование

Программное обеспечение на основе свёрточных нейронных сетей с предварительным вейвлет-преобразованием и архитектурой SqueezeNet позволяет определять модуляцию сигнала, выступающего в качестве мешающего, с вероятностью 75 % с применением спектрограмм и преобразования Фурье и 82 % при использовании вейвлет-преобразования вейвлета Морзе. При тестировании данной архитектуры для классификации радиоволнового излучения от изоляторов контактной сети выявлена низкая эффективность данного подхода, однако этот метод эффективен для работы дискриминатора модулированного сигнала, который интегрируется в общую структуру классификации, представленную на рисунке 2.28.

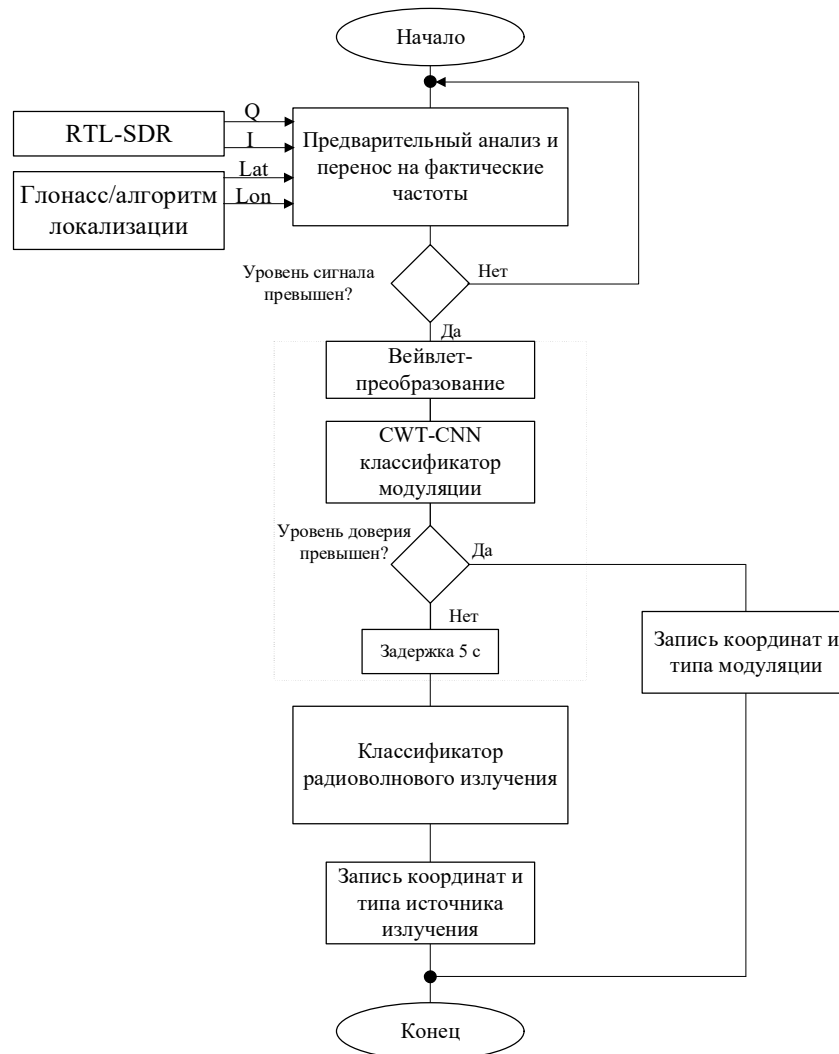


Рисунок 2.28 – Алгоритм применения методов классификации радиоволнового излучения по источникам

Наиболее часто для решения задач по классификации временных рядов применяются методики «ближайших соседей», машин опорных векторов с различными функциями ядра, а также сверточные и рекуррентные нейронные сети. В качестве основного метода препроцессинга радиосигналов с принимающих станций выступает алгоритм динамической трансформации временной шкалы (DTW), который позволяет найти оптимальное соответствие между временными последовательностями вне зависимости от природы их возникновения [59].

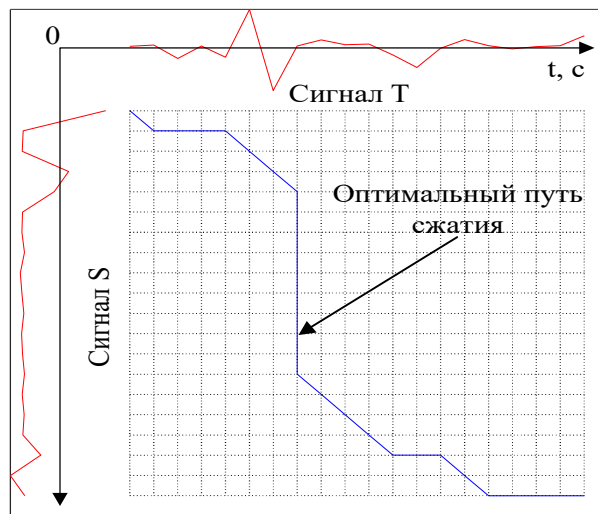


Рисунок 2.29 – Матрица динамической временной трансформации для двух сигналов 5 класса

Алгоритм позволяет вычислить оптимальную последовательность трансформации между рядами и метрику между ними. Целесообразно рассмотреть пример для двух временных рядов S и T размерностью n и q соответственно. Для них формируется матрица D расстояний между каждыми двумя значениями рядов T и S , оптимальный же путь трансформации определяется через матрицу W_{opt} (на рисунке 2.29) в которой каждое значение $w_{i,j}$ заполняется слева направо, сверху вниз путем сложения $d_{i,j}$ с минимальным значением соседних, уже заполненных значений. Путь трансформации при этом должен быть монотонным, непрерывным и соблюдать граничные условия, при которых $i_1=1$, $j_1=1$, $i_k=n$, $j_k=q$. Расстояние рассчитывается по формуле:

$$DTW(S, T) = \frac{\sum dist(s_{il}, t_{il})}{n + q}. \quad (26)$$

Данный алгоритм позволяет произвести сопоставление точек во временных рядах и выровнять ряды по оси времени, что позволяет упростить процесс классификации временного ряда. Слои нейронной сети представлены на рисунке 2.30.

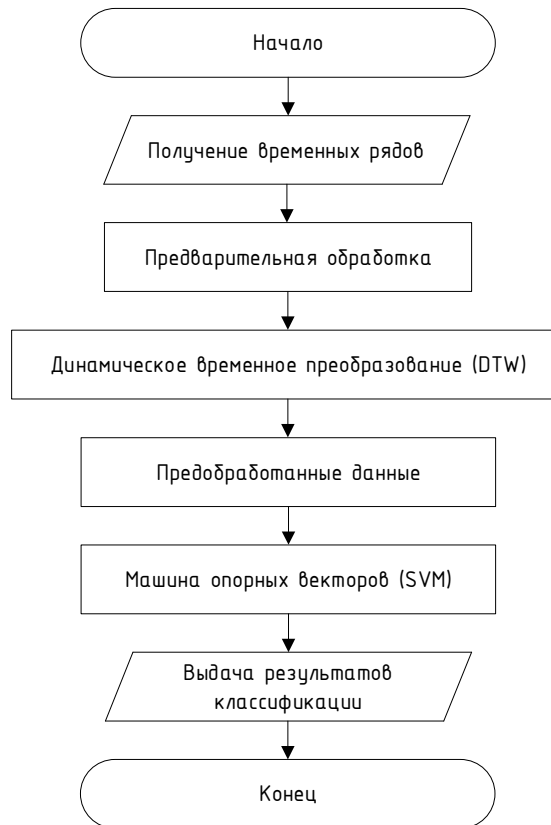


Рисунок 2.30 – Диаграмма слоев классификатора на базе машины опорных векторов (SVM)

В некоторых случаях применяются неконкурирующие между собой модификации трансформации временной шкалы, такие как ограниченная (CDTW), параметрическая (PTW) и каноничная временная трансформация (CTW) [60]. Иные алгоритмы, построенные на генетических алгоритмах с представлением переменной длины, таких как SAGA [61] или на методе главных компонент, такие как алгоритм регистрации кривой Рамси–Сильвермана (CREG) [62]. Анализ

возможных методов классификации без применения препроцессинга продемонстрирован на рисунке 2.31.

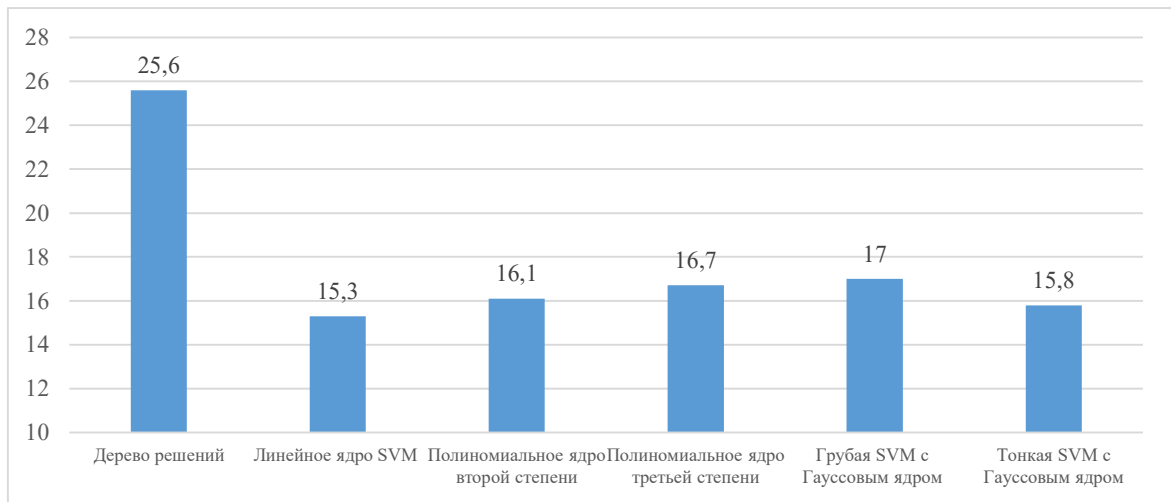


Рисунок 2.31 – Классификация сигналов без препроцессинга

Из рисунка 2.31 следует, что для шести классов максимальную точность для данной выборки демонстрирует метод дерева решений, при этом точность в 25 % является недопустимо низким показателем. Применить метод главных компонент для снижения размерности на такой крупной выборке не удалось – показатели точности классификации снизились.

Анализ применения алгоритмов классификации с предварительной обработкой для двух классов радиоизлучения показал лучшие результаты для выборки 2 класса по 1000 образцов в каждом, длительностью 1000 отсчетов. Сравнение проводилось для классификатора на основе машины опорных векторов с ядром в виде гауссовой функции и приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты для различных видов сжатия временной шкалы

Вид сжатия временной шкалы	DTW	CDTW	SAGA	CREG	PTW	CTW
Точность определения при использовании метода опорных векторов на гауссовом ядре	0,805	0,73	0,34	0,495	0,5	0,73

Результаты различных классификаторов для представленной выше выборки двух классов при использовании стандартного DTW метода, показавшего наилучший результат, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты для различных видов классификации

Тип метода классификации	Метод k-means (ближайших соседей)	Машина опорных векторов (SVM)
Точность классификации	0,76	0,805

На малой выборке наблюдается, что наивысшую эффективность демонстрируют метод опорных векторов с использованием гауссового ядра и классический метод динамической трансформации временной шкалы (DTW), основанный на матрице пути. Для детального анализа была использована уточненная выборка, включающая образцы пяти классов радиоизлучений, полученных в ходе диссертационного исследования (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Данные генератора радиопомех по модели Мидлтона класса А

Источник радиоволнового излучения	Параметр А	Параметр Г
Нарушение условий токосъема	1,11	2,69
ПЧР на фарфоровом изоляторе	0,234819	0,106899
ПЧР на стеклянном изоляторе	19,92586	1,254829
ПЧР на поликарбонатном изоляторе	2,208	0,523774
Белый гауссовский шум	$\mu = 0$	$\sigma = 0,12$

При классификации выборки на 4 класса с использованием 1000 обучающих и 100 тестирующих образцов радиопомех были получены результаты, отраженные в таблице 2.4. Эти данные подтверждают высокую эффективность применения метода опорных векторов и DTW в задачах классификации. Дополнительно было проведено сравнение с другими алгоритмами машинного обучения, результаты которого показали, что выбранные методы обеспечивают более высокую точность и стабильность в условиях ограниченных выборок.

Таблица 2.4 – Результаты для шести первоначальных классов

Тип сжатия времени	DTW	CDTW	SAGA	PTW	CTW
Точность определения при использовании метода опорных векторов на гауссовом ядре	0,707	0,637	0,165	0,173	0,62

Результат метода опорных векторов для динамической трансформации временной шкалы по классам представлен на рисунке 2.32.

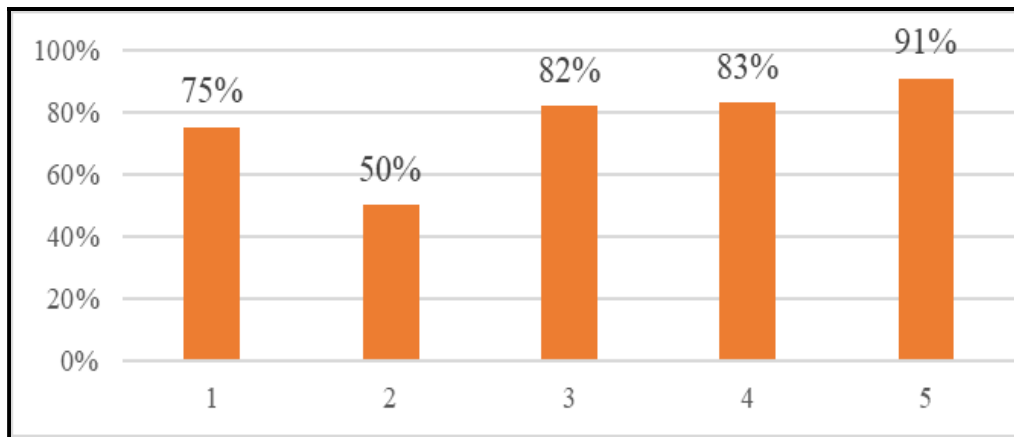


Рисунок 2.32– Точность классификатора на базе опорных векторов

Низкие значения для классов 2 и 6 можно подробно рассмотреть на базе валидационной матрицы, представленной на рисунке 2.33. По ней можно сделать вывод, что низкая точность для некоторых классов обусловлена высокой схожестью с соседними, что отмечено на валидационной матрице распределением результатов классификации.

Confusion matrix

	1	2	3	4	5
1	75	44	1	0	0
2	25	50	9	0	0
3	0	6	82	17	0
4	0	0	8	83	0
5	0	0	0	0	91
6	0	0	0	0	9
PA	0.750	0.500	0.820	0.830	0.910
TO	100	100	100	100	100

Рисунок 2.33 – Матрица валидации классификатора для SVM с DTW

Анализ влияния белого шума на точность классификации сигналов радиоволнового излучения проводился методом машины опорных векторов с применением алгоритма динамического временного сжатия. Обучающая выборка

составила по 100 образцов каждого класса, тестовая выборка по 10 образцов каждого сигнала с различным отношением сигнал/шум для модели канала с аддитивным белым шумом. Результаты представлены на рисунке 2.34.

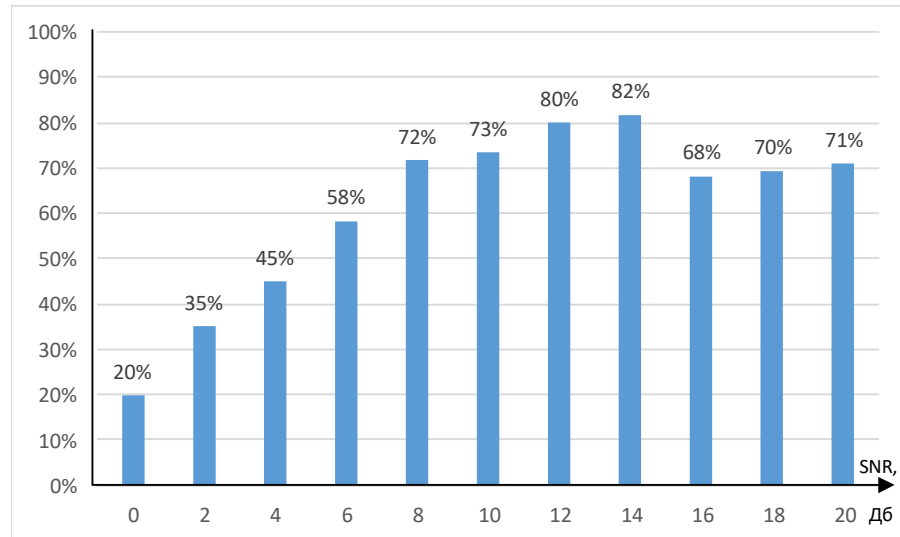


Рисунок 2.34 – Точность классификатора на базе машины опорных векторов при различных значениях отношения сигнал/шум

Снижение точности при высоких значениях отношения сигнал/шум обусловлено низкой точностью классификации 2 и 6 класса. Как и в случае отсутствия белого шума данные классы имеют высокую схожесть с соседними, что и приводит к низкой точности. Таким образом, используя метод динамической временной шкалы (DTW) и машины опорных векторов (SVM), появляется возможность выполнить классификацию источников радиоволнового излучения с высокой точностью, а также, даже при высоком уровне белого шума сохранять работоспособность данного метода. Данные опытов подтверждают гипотезу о возможности классификации источников радиоволнового излучения. Однако применение рекуррентных нейронных сетей позволяет отказаться от механизмов временного сжатия и снизить вычислительную нагрузку. Архитектура рекуррентных LSTM-сетей имеет значительные отличия от свёрточной нейронной сети, которая была представлена выше для классификации источников

радиоволновых излучений, имеющих модуляционную природу [63]. Нейронная сеть имеет следующую структуру:

- слой BiLSTM [64];
- полносвязный слой по количеству классов;
- слой softmax для классификации.

Схема классификатора на основе BiLSTM-сети представлена на рисунке 2.35.

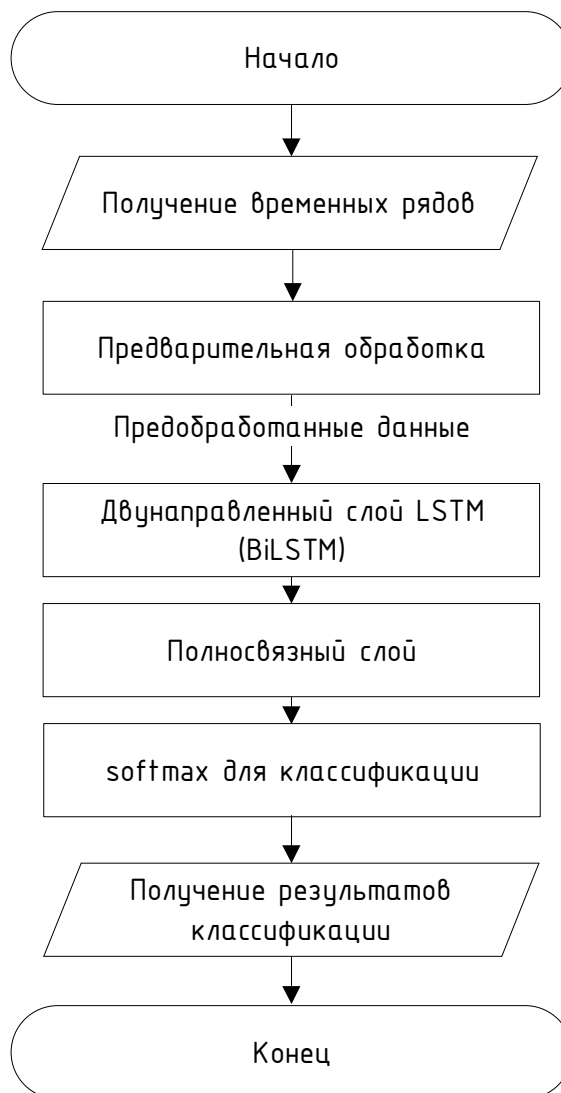


Рисунок 2.35 – Структура BiLSTM нейронной сети

В качестве механизма оптимизации применен метод адаптивной оценки моментов (Adam), представляющий собой алгоритм оптимизации первого порядка. График обучения классификатора на основе BiLSTM представлен на рисунке 2.36.

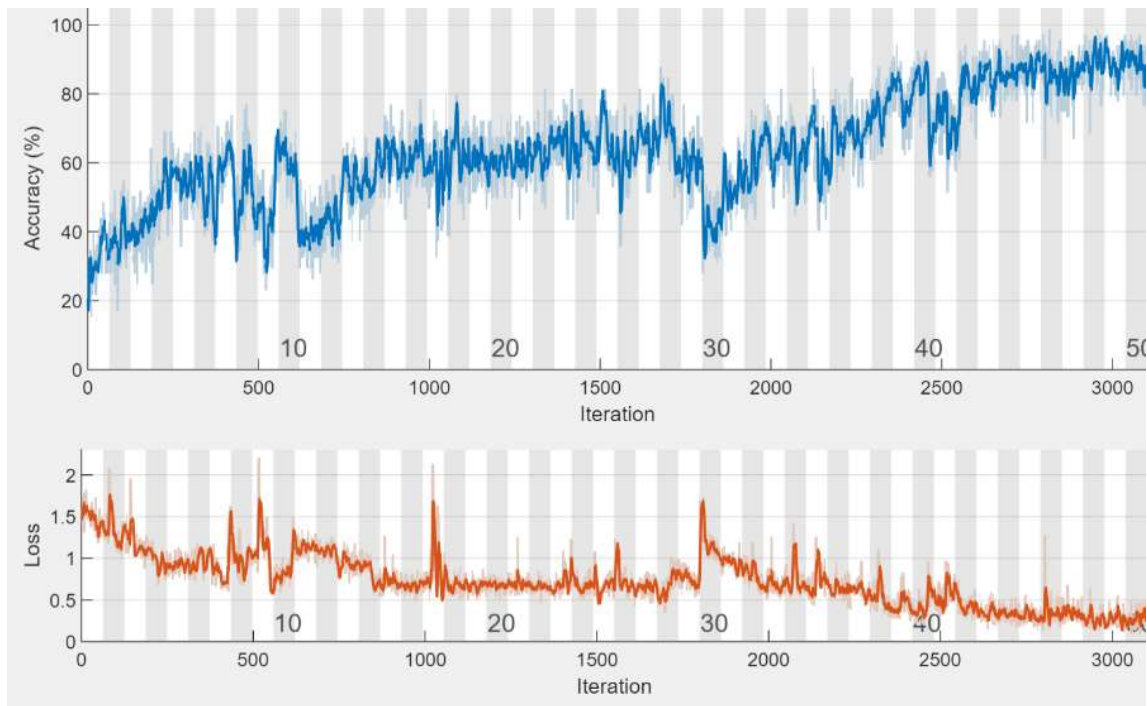


Рисунок 2.36 – График обучения классификатора источников радиоизлучений на основе BiLSTM нейронной сети

Основываясь на адаптивных оценках моментов более низкого порядка, Adam используется для градиентной оптимизации стохастических функций целевых значений. Этот метод выделяется своей простотой в реализации, высокой вычислительной эффективностью и ограниченными требованиями к объёму памяти. Кроме того, алгоритм эффективно функционирует в условиях нестационарных целей и в задачах, характеризующихся наличием высокошумных градиентов [65]. Для повышения точности и снижения вероятности переобучения искусственной нейронной сети применялся механизм Dropout, который заключается в случайном отключении некоторого процента нейронов в сети во время процесса обучения, что приводит к созданию множества вторичных нейронных сетей с различными архитектурами. Такой подход уменьшает сложные взаимозависимости между нейронами, тем самым улучшая обобщающую способность модели и снижая риск переобучения [66]. Результаты точности классификатора данных на основе LSTM-нейронной сети представлены на рисунке 2.37.

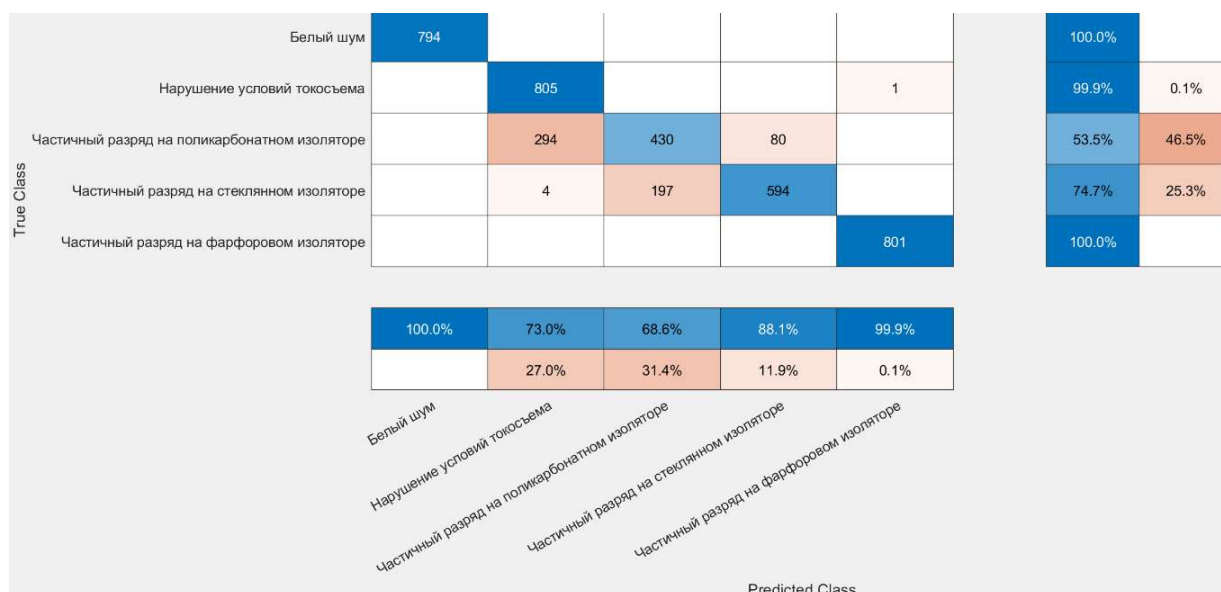


Рисунок 2.37 – Схема классификатора источников радиоволновых излучений на основе BiLSTM нейронной сети

Для сравнения SVM и BiLSTM классификаторов была использована обучающая выборка из 1000 образцов каждого класса, тестовая выборка из 1000 образцов каждого сигнала с различным отношением сигнал/шум (SNR) для модели канала с аддитивным белым шумом (AWGN). Результаты классификации по метрикам Precision и Recall представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты тестирования классификаторов

Метрика	Белый шум, %	Нарушение условий токосъема, %	ПЧР поликарбонатного изолятора, %	ПЧР стеклянного изолятора, %	ПЧР фарфорового изолятора, %
precision DTW-SVM	99,6	32,4	34,5	50,0	98,9
recall DTW-SVM	100,0	49,5	33,6	41,1	89,3
precision BiLSTM	100,0	73,0	68,6	88,1	99,9
recall BiLSTM	100,0	99,9	53,5	74,7	100,0

BiLSTM-классификатор продемонстрировал лучшие результаты по метрикам «precision» и «recall» при схожем значении метрики «ассигасу», так как он специально разработан для работы с длинными последовательностями способен обучаться на всей последовательности данных и автоматически извлекать важные

признаки. Классификация источников радиоволнового излучения с помощью BiLSTM-классификатора достигает средней точности (Precision) 85,4 %, при этом минимальная точность для одного из классов составляет 68,6 %.

В данной главе разработан алгоритм локализации источника радиоволнового излучения на станции со среднеквадратическим отклонением 2,5 м. Точность локализации источника радиоволнового излучения на перегоне составила 8 м.

Экспериментальным подтверждением гипотезы о выявлении ПЧР на изоляторах и нарушении условий токосяема контактной сети полигона ДВОСТ ж. д. служит анализ прохождения комплекса по окрестным подъездным путям, что позволяет оценить дальность и точность локализации изоляторов с ЧР и определить точку максимального излучения, вызванного этими разрядами.

Проведенные расчеты и эксперименты подтверждают работоспособность метода диагностики по радиоизлучениям. Полученные результаты позволяют проводить диагностику изоляторов, что подтверждается актами о внедрении от АО «ДГК» и АО «Связьтранснефть» (Приложения 4 и 5).

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭЛЕМЕНТАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ, КАК ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

3.1 Применение методики Мидлтона для моделирования излучения от электродугового процесса

Импульсная помеха, как частный случай нарушения электромагнитной совместимости, представляет собой нежелательное физическое явление, вызванное радиосигналами от электродуговых процессов и пробоев изоляторов. На железнодорожном транспорте основными источниками таких помех являются ЧР и нарушения условий токосъема контактной сети. Эти воздействия могут нарушать нормальную работу технических средств или вызывать ухудшение их технических характеристик и параметров [67]. При заранее определённых параметрах борьба с помехой не вызывает затруднений, её можно решить методами экранирования, фильтрации и компенсации. Однако частичные разряды и нарушения токосъема контактной сети часто приводят к непредсказуемым, случайным сигналам различной природы, что усложняет задачу их определения и снижения мешающего влияния. В общем случае влияние электромагнитного радиоизлучения на сигнал $s(t)$ можно представить в виде оператора V :

$$S = V(s, \xi). \quad (27)$$

В случаях, когда помеха накладывается на сигнал, такую помеху называют ξ аддитивной, а если происходит умножение помехи на величину сигнала, её называют мультипликативной. Мультипликативная помеха при низкой скорости изменения v относительно $s(t)$ называется замиранием:

$$S = s(t) + \xi, \quad (28)$$

$$S = vs. \quad (29)$$

При одновременном воздействии шума и мультипликативной помехи оператор V приходит к своему общему виду:

$$S = vs + \xi. \quad (30)$$

Статистические исследования распределения вероятностей уровня электромагнитных радиоизлучений на любой случайно выбранной частоте в течение времени T при устойчивом состоянии ионосферы аппроксимируется нормальным законом по формуле [68]:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x,T}} \int_{-\infty}^x \exp \left[-\frac{(x-\bar{X}_T)^2}{2\sigma_{x,T}^2} \right], \quad (31)$$

где $x=20\lg(U)$;

$\bar{X}_T$ – среднее значение;

$\sigma_{x,T}$ – среднеквадратичное отклонение уровней излучения на одной частоте за время T .

Вычисление теоретической интегральной функции распределения вероятностей уровня радиоизлучений производится по формуле:

$$P(x) = \begin{cases} 0,5 + \Phi_0(t) & \text{при } t > 0; \\ 0,5 - \Phi_0(t) & \text{при } t < 0, \end{cases} \quad (32)$$

где $t = \frac{x-\bar{x}_T}{\sigma_{x,T}}$; $\Phi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi$ – функция Гаусса-Лапласа.

Плотность распределения вероятностей нормированной случайной величины рассчитывается по формуле:

$$\omega(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}. \quad (33)$$

График плотности распределения и функции Лапласа представлены на рисунке 3.1.

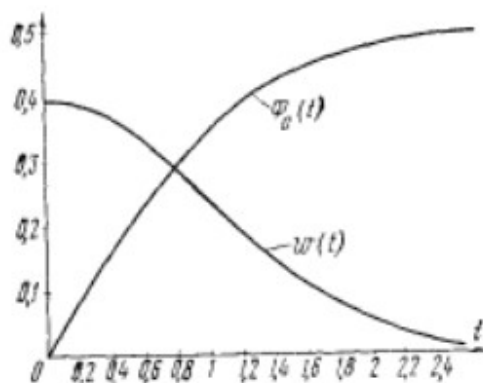


Рисунок 3.1 – График плотности распределения и функции Лапласа [68]

Данные радиоизлучения могут возникать из-за различных источников, включая другие радиоэлектронные устройства, атмосферные явления или даже здания и другие препятствия в городской среде. В современной литературе существуют различные математические и компьютерные модели распространения сигналов и помех, среди которых можно привести следующие модели: Мидлтона class-A/B/C, α -stable и гауссову модель. Источники электромагнитных возмущений излучают импульсную помеху, которая представляет собой случайный набор значений, однако, в ходе исследований и накопления большого объема данных была определена модель, которая стала основным способом для описания помех различной природы. Универсальные модели для эффективного моделирования электромагнитных помех от природных и антропогенных источников основаны на статистико-физической модели Мидлтона [69]. Эти модели представляют собой разновидности модели импульсного радиошума и служат инструментарием для изучения влияния шума на качество передачи сигнала.

Модель Мидлтона класса А применяется в том случае, если основное внимание уделяется импульсной, или негауссовой, составляющей радиошума. Она призвана анализировать сценарии, в которых импульсный шум доминирует и представляет основной интерес для исследователей. Импульсные помехи, обычно, возникают из-за внешних источников, таких как электрические разряды и коммутационные процессы, и могут оказывать существенное воздействие на качество передачи сигнала.

В отличие от модели А, модель В акцентирует внимание на гауссовой составляющей радиошум. Она более подходит для анализа ситуаций, где гауссова составляющая вносит существенный вклад в общий уровень шума, например, при анализе теплового шума и шума на полупроводниковых устройствах.

Выбор между моделями А и В зависит от конкретной задачи, условий эксплуатации системы и целей исследования. Модель А обычно предпочтительнее в сценариях, где предметом исследования являются именно импульсные помехи, и она может предоставить более детализированный анализ импульсного шума в

связи с его специфическими характеристиками и особенностями. Кроме того, предполагается, что модель А может оказаться более универсальной и применимой для большего числа сценариев.

Следовательно, в научных исследованиях часто применяется модель А Мидлтона из-за её способности адекватно описывать радиоизлучения, возникающие в радиосвязи, а также из-за её универсальности и применимости к разнообразным условиям и сценариям.

Плотность вероятности от нормированной огибающей $\omega(\varepsilon)$ для модели класса А определяется следующими параметрами:

$$\omega(\varepsilon) = 2e^{-A_A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_A^m \varepsilon e^{-\varepsilon^2/2\sigma_m^2}}{m! \sigma_m^2} \quad \text{при} \quad \sigma_m^2 = \frac{\frac{m}{1 + \Gamma_A} + \Gamma_A}{A_A}, \quad (34)$$

где A_A – индекс перекрытия, представляющий собой произведение среднего числа случаев излучения помехи, попавших на приемник в единицу времени, при средней продолжительности импульсов от данного источника; данный индекс обычно находится в пределах $A_A \in [10^{-2}, 10]$; Γ_A – отношение σ_G^2 / Ω_{2A} , где σ_G^2 – интенсивность независимой гауссовой составляющей, Ω_{2A} – интенсивность импульсной негауссовой составляющей; данный показатель находится в пределах $\Gamma_A \in [10^{-6}, 10]$. Показатель гауссовой шумовой компоненты (m) описывает количество составляющих, которые должны быть учтены при формировании образцов помехи. В данном исследовании этот показатель принят равным 10, исходя из возможностей симулирования.

Важно отметить, что эти параметры должны быть определены или измерены для конкретной ситуации электромагнитных радиоизлучений. Анализ импульсных помех с помощью модели Мидлтона позволяет использовать уже накопленный различными исследователями опыт и проводить предварительное исследование гипотезы на программных моделях, а также в последующем при натурном испытании проводить симуляции возникновения электромагнитных возмущений через программно-определяемые радиопередатчики. Наиболее часто в литературе

встречается описание импульсного радиоизлучения по модели Мидлтона класса А, которое симулируется в пакете программ MATLAB. Данная модель применяется для моделирования различных типов импульсных помех на основе реальных данных. Для того, чтобы определить параметры для этой модели на основе опытных измерений требуется ряд действий. Сбор данных, который может включать измерение уровней радиоизлучений на различных частотах и в разное время. Также, данный этап может включать в себя запись конкретных характеристик помех, таких как их продолжительность и величину. На основе этих параметров создается модель Мидлтона, которая может включать использование математических формул или программного обеспечения для моделирования. В литературе представлены уже готовые характеристики для четырех классов источников электромагнитных радиоизлучений, которые могут быть описаны с помощью модели Мидлтона класса А и являются следствием эксплуатации электрифицированных железных дорог. Локализация источников радиоизлучений представлена на рисунке 3.2.

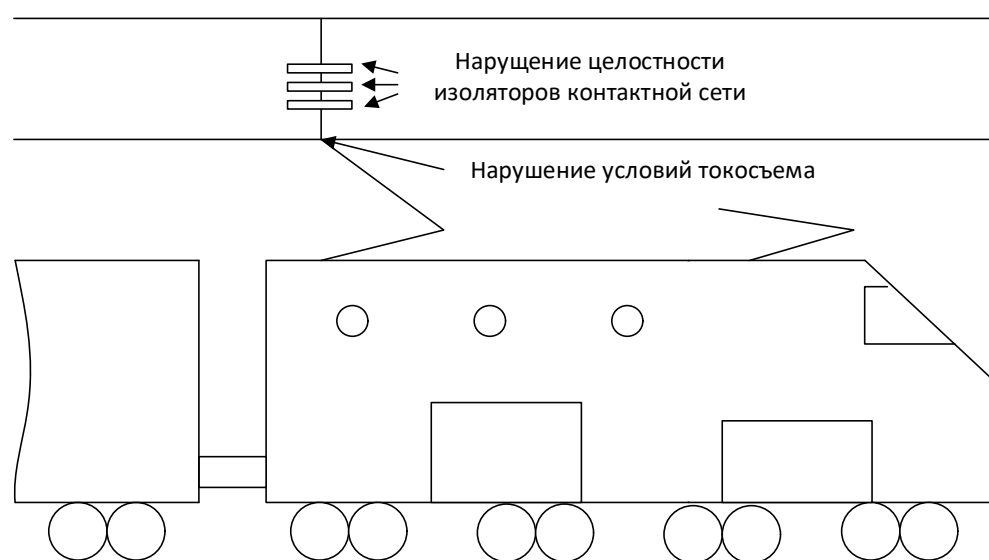


Рисунок 3.2 – Источники радиоизлучений

Источниками электромагнитных радиоизлучений служат следующие факторы:

- нарушение условий токосъема от гололеда;

- ПЧР на фарфоровом изоляторе контактной сети переменного тока;
- ПЧР на поликарбонатном изоляторе контактной сети переменного тока;
- ПЧР на стеклянном изоляторе контактной сети переменного тока.

Помимо моделей излучений, уже представленных в литературе в качестве параметров для модели Мидлтона, существует большое количество реальных исследований и измерений фактических помех, особенно с фокусом на железнодорожный транспорт и системы электрификации подвижного состава. Таким образом, существует возможность формирования модели импульсной помехи и анализ возможности её локализации и классификации. Алгоритм получения модели импульсной помехи представлен на рисунке 3.3.

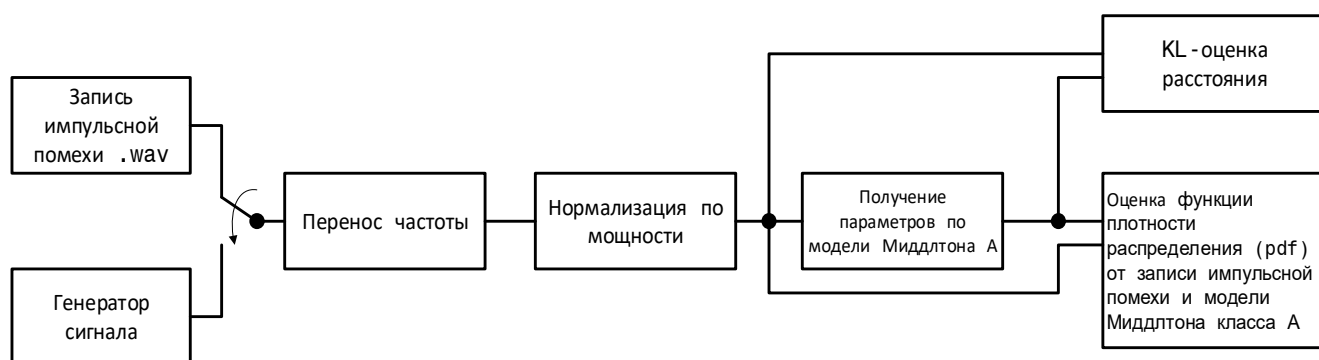


Рисунок 3.3 – Алгоритм снятия параметров радиоизлучений для последующего моделирования по алгоритму Мидлтона класса А

Алгоритм позволяет использовать запись с программного радиоприемника и генерировать сигнал программными способами. Огибающая импульсной помехи определяется на основе обработки результатов наблюдений, зафиксированных в памяти устройства. Помеховый сигнал переносится в рабочий частотный диапазон линии связи, нормализуется по мощности и поступает в блок контентного анализа и синтеза.

3.2 Моделирование электромагнитного излучения при нарушении условий токосъема в контактной сети переменного тока

Наибольшее внимание исследователей сосредоточено на проблеме нарушения условий токосъема на контактной сети 2х25 кВ. В диссертационном исследовании «Электродуговые процессы как основа технической диагностики нарушений токосъема в электротяговых сетях переменного тока» Колосова Д.В [70] рассмотрены методы моделирования электродуговых процессов при нарушении токосъема, а в диссертации Горевго И.М. была разработана методика и собраны образцы импульсных помех на участке Вязьма – Смоленск, который электрифицирован сетью переменного тока 2х25 кВ [20]. Уровни гармоник амплитудно-частотного спектра сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Амплитудно-частотный спектр нарушения условий токосъема [20]

п, номер гармоники	1	2	3	4	5	6
f, Гц	216	432	648	864	1080	1297
L, В	1.6e-05	0,000009	0,000005	4.5e-06	4.5e-06	0,000002
п,	7	8	9	10	11	12
f, Гц	1514	1730	1944	2163	2382	2589
L, В	1.4e-06	1.3e-06	0,000001	0,000001	0,0000009	0,0000007
п,	13	14	15	16	17	18
f, Гц	2807	2991	3245	3463	3682	3877
L, В	0,0000006	0,0000005	0,0000004	0,0000003	0,0000004	0,0000004
п,	19	20	21	22	23	
f, Гц	4108	4338	4510	4775	4994	
L, В	0,0000003	2.5e-07	1.6e-07	7E-08	3E-08	

Моделирование проводилось в программной среде Engage на языке Matlab и состояло из нескольких этапов:

- моделирование гармоник;
- преобразование Гильберта для формирования огибающей;
- сглаживание избыточных выплесков;
- сдвиг частоты сигнала на 2,13 МГц;

– наложение белого шума с показателем SNR в 18 дБ, так как при испытаниях был определен уровень шума.

В программе генерируется сигнал, который является суперпозицией (суммой) нескольких синусоидальных волн с заданными частотами и амплитудами:

$$x(t) = \sum_{i=0}^n A_i \cdot \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t). \quad (35)$$

Затем преобразование Гильберта создает мнимую часть аналитического сигнала, которая является версией исходного сигнала, сдвинутой по фазе на 90 градусов. Формула преобразования Гильберта:

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau. \quad (36)$$

Формула сглаживания сигнала:

$$smoothx(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=t-N/2}^{t+N/2} x(k), \quad (37)$$

где N – размер окна для скользящего среднего;

t – текущий временной индекс.

Следует отметить, что в дальнейшем для моделирования проводятся этапы нормализации и центровки сигнала для возможности расчета параметров модели, нормализация переносит сигнал в область значений $[0,1]$

$$x_{\text{norm}}[n] = \frac{x[n] - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}. \quad (38)$$

В дальнейшем для возврата модели в параметры реального сигнала применяются этапы масштабирования и центровки

$$x_{\text{scaled}}[n] = a + \left(\frac{x[n] - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \right) \times (b - a). \quad (39)$$

Для того, чтобы учесть большую часть данных, можно задать границы целевого диапазона как функции от математического ожидания и среднеквадратического отклонения исходного сигнала:

$$a = \mu - k\sigma, \quad (40)$$

$$b = \mu + k\sigma, \quad (41)$$

где $k = 3$ – коэффициент, позволяющий захватить долю данных, равную 99,7 % от сигнала;

$$x_{\text{centered}}[n] = \frac{x_{\text{scaled}}[n]}{A_{\text{signal}}} \times A_{\text{noise}}, \quad (42)$$

где A_{signal} – средняя амплитуда радиоизлучения от источника в дБм, а A_{noise} – уровень шума в дБм. Расчет параметров A и Γ для модели проводится по формулам [71]:

$$A = \frac{9(e_4 - 2e_2^2)^3}{2(e_6 + 12e_2^3 - 9e_2e_4)}, \quad (43)$$

$$\Gamma = \frac{2e_2(e_6 + 12e_2^3 - 9e_2e_4)}{3(e_4 - e_2^2)^2}, \quad (44)$$

где e_2 , e_4 , e_6 – дисперсия, коэффициент эксцесса и момент 6-го порядка амплитуды сигнала, в сравнении с фактическим сигналом представлены на рисунке 3.4.

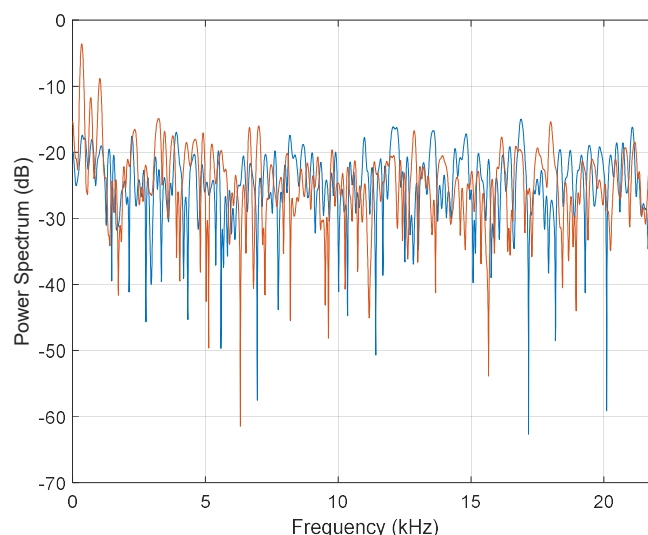


Рисунок 3.4 – Амплитудный спектр модели импульсной помехи на частоте 2,13МГц при нарушении условий токосъема (синий) и модели Мидлтона класса А на основе импульсного сигнала (красный)

Оценка точности моделирования проводилась с использованием метрики, измеряющей расстояние между модельным представлением и реальным помеховым сигналом по расстоянию Кульбака — Лейблера (KL). Данное расстояние позволяет оценить, насколько хорошо модель Мидлтона класса А (красная кривая) приближает реальную модель импульсной помехи (синий). В данном случае KL измеряет разницу между двумя функциями плотности

вероятности: синей, представляющей реальную или экспериментальную модель импульсной помехи, и красной, которая является теоретической моделью Мидлтона класса А, основанной на параметрах, рассчитанных из реальных данных. KL между этими распределениями выражается как:

$$D_{KL}(P || Q) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx, \quad (45)$$

где $p(x)$ и $q(x)$ — плотности вероятности для распределений P и Q соответственно [72].

Сравнение функции плотности распределения от импульсной помехи и построенной модели Мидлтона класса А на основе расчета параметров от модели импульсной помехи представлено на рисунке 3.5. В работе используется статистический анализ распределения импульсных помех для оценки их уровня, получения и подтверждения сведений и предсказания электромагнитных возмущений через корреляционные функции. Значения математического ожидания для реального сигнала и его модели также близки и составляют соответственно - 0,5076 В и 0,0475 В.

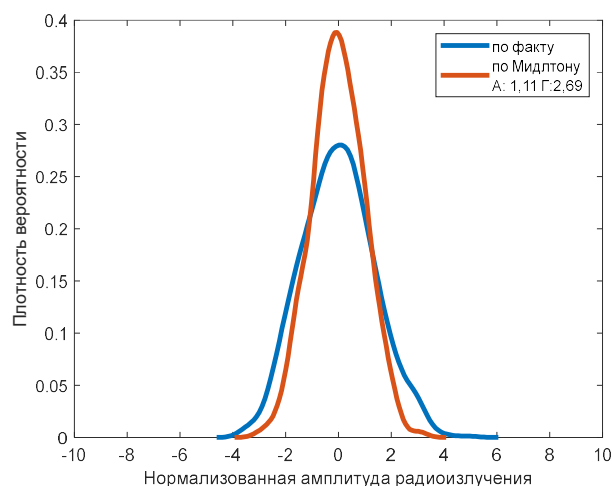


Рисунок 3.5 – Плотность вероятности распределения от нарушения условий токосяема (синий) и построенной модели Мидлтона класса А на основе расчета параметров от модели импульсной помехи (красный)

Согласно KL-расстояние для данных распределений вероятности оценивается значением 0,2, что свидетельствует о достаточной их близости. Малое

значение KL-расстояние означает, что модель Мидлтона хорошо описывает реальные данные, тогда как большое значение указывает на значительные различия между моделями. Этот расчет позволяет количественно оценить точность модели Мидлтона при ее применении для анализа импульсных помех в сетях, помогая выбрать правильные параметры для более точной модели.

Исходя из анализа метрики KL можно сделать вывод, что модель импульсной помехи демонстрирует высокую степень схожести с оригинальным сигналом, подтверждая свою эффективность. Это указывает на то, что модель адекватно воспроизводит характеристики импульсной помехи, что делает ее полезным инструментом для анализа и моделирования подобных сигналов.

3.3 Моделирование электромагнитного излучения от поверхностных частичных разрядов на изоляторах контактной сети

Применение уже известных подходов к измерению электромагнитного излучения от ПЧР полимерных изоляторов контактной сети позволяет провести оценку параметров модели Мидлтона класса А по методике, представленной выше. Исследователи из ИРГУПС С.М. Куценко, Н.Н. Климов и В.И. Муратов провели сбор первичных данных: осциллограмм и спектров ПЧР изоляторов различного материала изготовления [73]. Эти данные иллюстрируют типичные характеристики радиосигналов, которые возникают при ПЧР изолятора. Осциллограмма показывает временную зависимость сигнала, что позволяет наблюдать динамические изменения в поведении изолятора во времени, в то время как спектр дает представление о частотном составе этих сигналов, выявляя доминирующие частоты и возможные аномалии. Анализ этих данных критически важен для диагностики состояния изоляторов, поскольку особенности сигналов могут указывать на наличие трещин, микрповреждений или других дефектов.

Образец электромагнитного радиоизлучения от пробоя поликарбонатного изолятора приведен на рисунке 3.6.

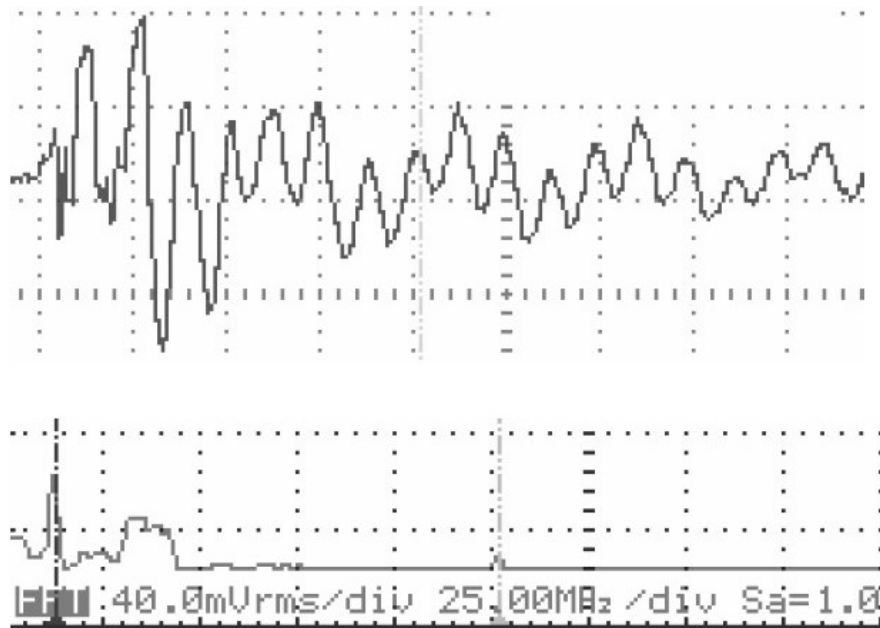


Рисунок 3.6 – Осциллограмма и спектр на изоляторе из поликарбоната [73]

Эти данные иллюстрируют типичные характеристики радиосигналов, которые возникают при ПЧР изолятора. Осциллограмма показывает временную зависимость сигнала, что позволяет наблюдать динамические изменения в поведении изолятора во времени, в то время как спектр дает представление о частотном составе этих сигналов, выявляя доминирующие частоты и возможные аномалии. Анализ этих данных критически важен для диагностики состояния изоляторов, поскольку особенности сигналов могут указывать на наличие трещин, микрповреждений или других дефектов.

На первоначальном этапе была проведена оценка параметров модели Мидлтона для поликарбонатного изолятора, представленного в исследовании [74]. Для сравнения также использовалась модель белого гауссового шума. Результат моделирования радиоизлучения от ПЧР на поликарбонатном изоляторе приведен на рисунке 3.7, где представлена плотность вероятности распределения от ПЧР на поликарбонатном изоляторе и моделей Мидлтона и помехи на основе белого шума.

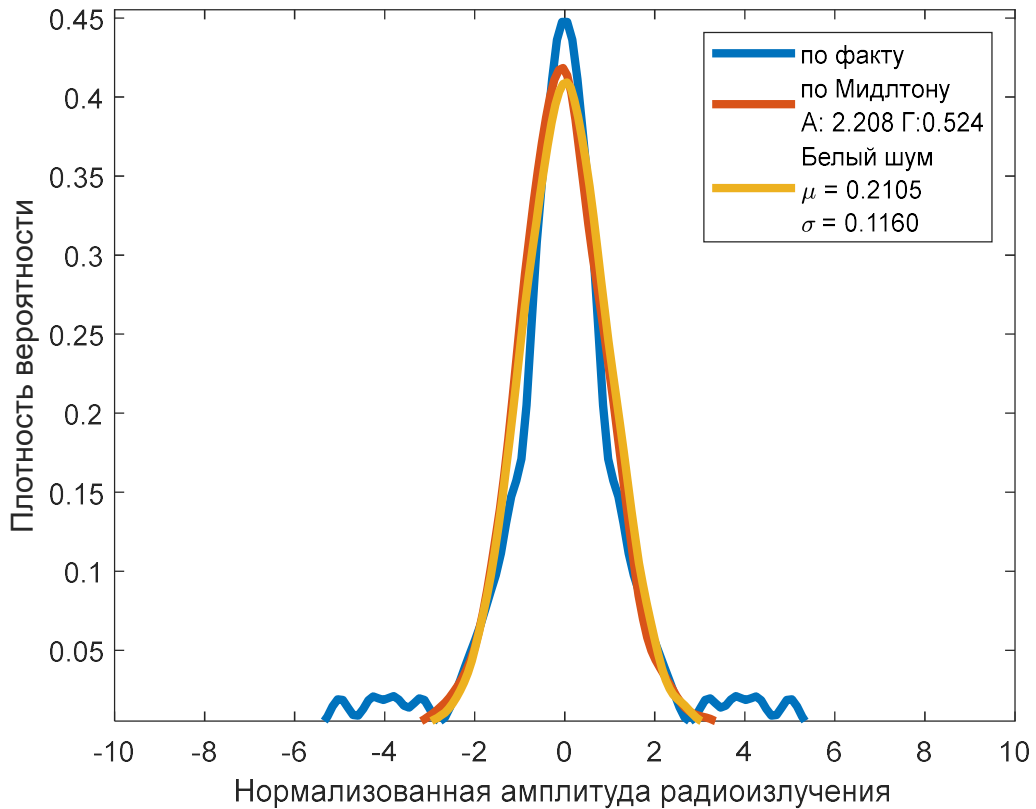


Рисунок 3.7 – Плотность вероятности распределения от ПЧР на поликарбонатном изоляторе (синий) и построенных модели Мидлтона класса А (красный) и помехи на основе белого шума (желтый)

Следует отметить, что для обработки модели были применены алгоритмы и программный код, представленные в исследовании помехоустойчивости ММО-систем [75].

Сравнение результатов модели проводится через расхождение KL которое составляет 0,18, что меньше, чем сравнение с 0,22 гауссовой моделью шума, что показывает меньшее отличие и, соответственно, лучшее моделирование.

С учетом специфики исследования, эксперимент по оценке радиоизлучения от ПЧР изоляторов контактной сети электрифицированных железных дорог переменного тока проводился с использованием систем программно-определяемого радио (RTL-SDR), позволяющих обнаруживать и анализировать ЧР. Эти устройства могут обеспечить достаточно точное измерение спектральных изменений, вызванных ЧР, в сравнении с традиционными методами, что позволит

снизить затраты и упростить процесс мониторинга состояния изоляции.

Оборудование, использованное в данном эксперименте:

- высоковольтная установка;
- душ для имитации погодных условий;
- RTL-SDR устройство;
- компьютер с ПО AirSPY;
- изоляторы 3хПС-70Е и 3хПФ-70А;
- дремель Dexter Pro-1261.

Настроить установку для проведения эксперимента, когда в одном из изоляторов начнется ПЧР. Следует отметить, что в нормальных условиях частичный разряд может не произойти, поэтому следует нанести загрязнения, подать воду из душа для имитации дождя и осуществить пропилы по методике, представленной в исследовании ОмГТУ [75]. Необходимо обратить внимание на характеристики изоляторов, так как различные материалы могут по-разному влиять на начало и характер ПЧР.

Настройка и сборка происходят по схеме, представленной на рисунке 3.8.

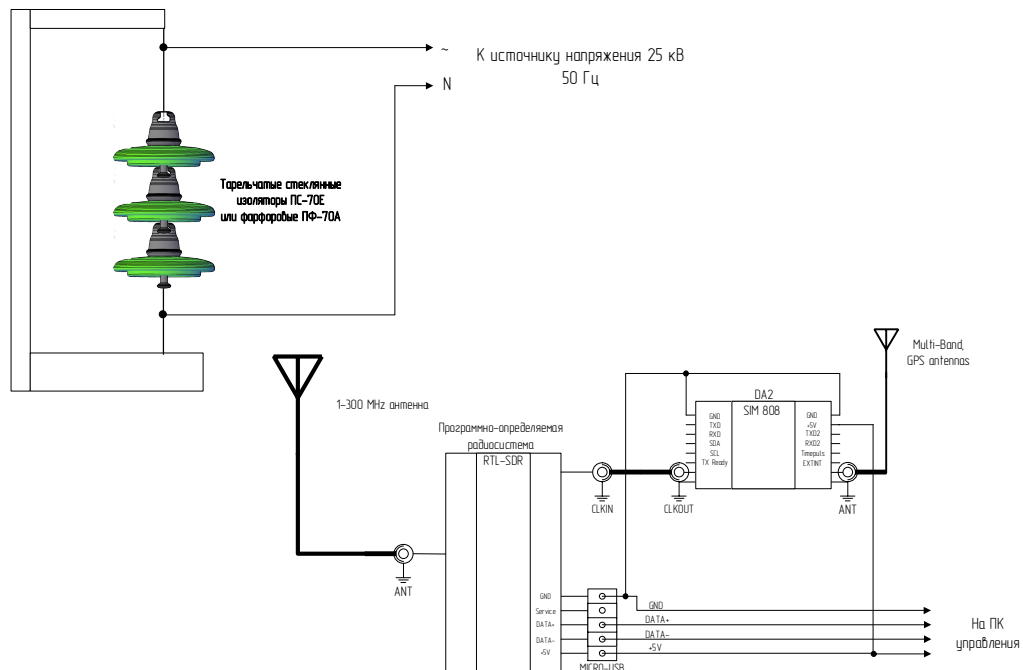


Рисунок 3.8 – Схема сборки испытательного стенда

Применение RTL-SDR для мониторинга радиоизлучений, исходящих от изоляторов вовремя индуцирования ЧР, позволило выявить изменения в спектре и амплитуде сигналов. Провести наблюдения на частоте 2,13 МГц (ГМВ ПРС). Спектр сигнала от стеклянного изолятора при ПЧР на частотах ПРС ГМВ представлен на рисунке 3.9.

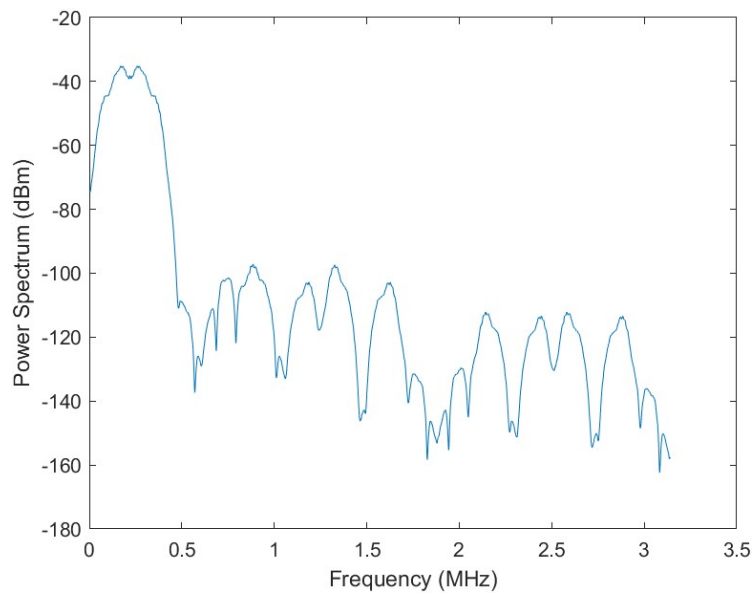


Рисунок 3.9 – Спектр сигнала от стеклянного изолятора при поверхностном частичном разряде

На рисунке 3.10 проведено сравнение функций плотности распределения для оценки схожести между фактическим сигналом электромагнитного радиоизлучения от ПЧР в стеклянном тарельчатом изоляторе ПС-70Е, расположенном по центру гирлянды аналогичных изоляторов (показано синим цветом) и теоретической моделью Мидлтона класса А (показано красным цветом), основанной на параметрах модели импульсной помехи. Дополнительно, использование белого шума (показано желтым) служит для иллюстрации отличия параметров как модели, так и фактического сигнала от нормализованного белого шума. KL-расстояние составило 0,0367, а для гауссовой модели на основе белого шума – 0,0703. Таким образом модель Мидлтона класса А соответствует ПЧР на стеклянном изоляторе.

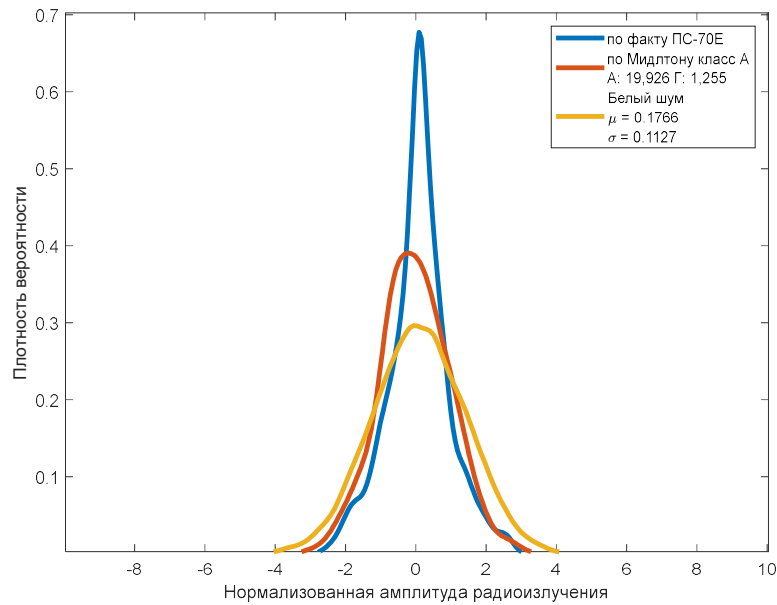


Рисунок 3.10 – Плотность вероятности распределения от ПЧР стеклянного изолятора (синий) и построенных модели Мидлтона класса А (красный) и помехи на основе белого шума (желтый)

Аналогично проведем исследование для фарфоровых изоляторов тарельчатого типа ПФ-70А. Спектр радиоволнового излучения, зафиксированный RTL-SDR, представлен на рисунке 3.11.

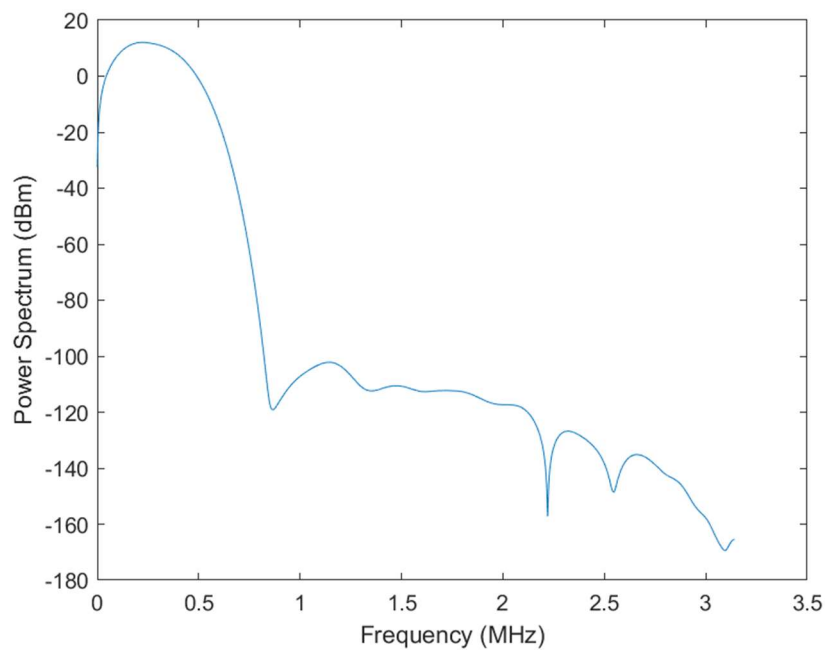


Рисунок 3.11 – Спектр сигнала от фарфорового изолятора при ПЧР

На рисунке 3.12 проведено сравнение функций плотности распределения для оценки схожести между фактическим сигналом электромагнитного радиоизлучения от ПЧР в фарфоровом тарельчатом изоляторе ПФ-70А, расположенном по центру гирлянды аналогичных изоляторов (показано синим цветом) и теоретической моделью Мидлтона класса А (показано красным цветом), основанной на параметрах модели импульсной помехи. Дополнительно, использование белого шума (показано желтым) служит для иллюстрации отличия параметров как модели, так и фактического сигнала от нормализованного белого шума. Функция плотности распределения позволяет оценить отличия радиоволнового излучения и его модели от белого шума.

KL-расстояние составило 0,2861, а для гауссовой модели – 0,51. Таким образом модель Мидлтона класса А соответствует ПЧР на фарфоровом изоляторе.

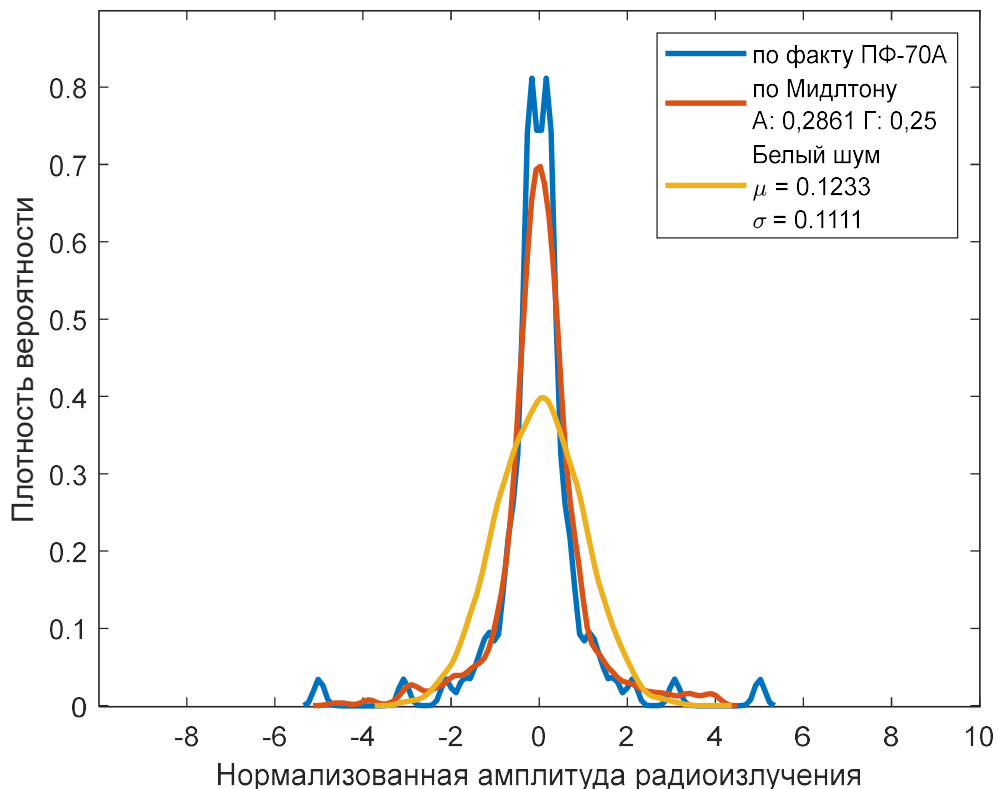


Рисунок 3.12 – Плотность вероятности распределения от ПЧР фарфорового изолятора (синий) и построенных модели Мидлтона класса А (красный) и помехи на основе белого шума (желтый)

Данные проведенных экспериментов по фиксации параметров ПЧР и нарушения условий токосъема средствами радиоприема демонстрируют возможность такой фиксации и последующего взаимодействия с данными программными средствами. Параметры модели Мидлтона были уточнены для моделирования радиоволновых излучений на основе экспериментальных данных. Для нарушения условий токосъема параметры модели Мидлтона класса А составили: $A = 1,11$, $\Gamma = 2,69$. Для поверхностных частичных разрядов параметры составили: на поликарбонатном изоляторе $A = 2,208$, $\Gamma = 0,58$; на фарфоровом изоляторе $A = 0,2861$, $\Gamma = 0,25$; на стеклянном изоляторе $A = 19,926$, $\Gamma = 1,255$. Проведена оценка моделей с использованием расстояния Кульбака-Лейблера, которая продемонстрировала лучшие результаты по сравнению с моделью белого гауссовского шума.

4 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОВОЛНОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

4.1 Обеспечение внедрения и эксплуатации метода радиоволновой диагностики контактной сети

Применение радиоволнового метода детально представлено на рисунке 4.1. На данной схеме проиллюстрировано взаимодействие аппаратуры комплекса с инфраструктурой ОАО «РЖД» на железнодорожных станциях и перегонах. Эта методика имеет сходство с подходом, описанным в исследовании, в котором также предлагается использовать схожее оборудование для обнаружения источника радиоизлучения. В данном случае, это радиопередающие объекты, и для их приема применяются универсальные и экономичные средства радиоприема в виде SDR-радиоприемников [76]. Эти аппаратные решения оказываются полезными для обеих методик и обеспечивают эффективное выполнение задач радиоприема и обнаружения радиопередающих устройств.

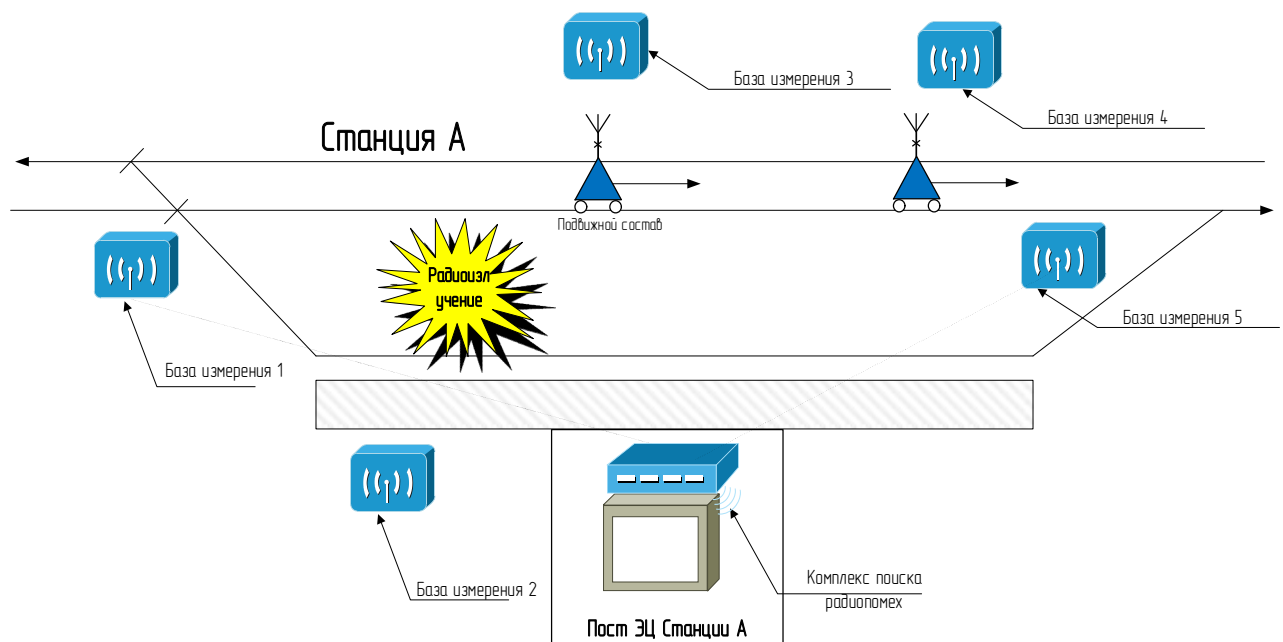


Рисунок 4.1 – Методика применения стационарной части комплекса

В процессе внедрения и эксплуатации программно-аппаратного комплекса диагностики радиоволновым методом, методическое обеспечение играет критически важную роль, охватывая не только подготовку и оснащенность персонала, но и разработку стандартов, процедур и инструкций. Эффективность работы комплекса в значительной степени зависит от уровня квалификации и подготовки сотрудников, ответственных за его внедрение и эксплуатацию. Особое внимание уделяется точности определения местоположения источника электромагнитного радиоизлучения и последующей классификации, что напрямую связано с профессиональными навыками персонала.

Согласно Инструкции по эксплуатации программно-аппаратного комплекса локализации и классификации отказов элементов контактной сети на железнодорожных станциях, которая приведена в приложении 1, программно-аппаратный комплекс обеспечивает локализацию и классификацию источника радиоизлучений, используя разностно-временной метод для определения местоположения источника радиоизлучения. Это снижает время локализации, но требует от персонала глубокого понимания принципов работы системы и способов её настройки. Эксплуатация комплекса включает ряд процедур, начиная от инсталляции и заканчивая регулярным контролем и обслуживанием. Внедрение метода диагностики контактной сети является многоаспектной задачей, требующей внимательного подхода к подготовке персонала и технической оснащенности. Важным аспектом является также разработка и внедрение системы обучения и повышения квалификации сотрудников, включая теоретические и практические занятия. Это позволяет не только повысить уровень знаний и навыков персонала, но и обеспечить их готовность к работе с новыми технологиями и оборудованием. Немаловажным элементом методического обеспечения является разработка инструкций по охране труда, процедур по эксплуатации и обслуживанию оборудования, а также мер по предотвращению и устранению аварийных ситуаций.

Инструкция по эксплуатации программно-аппаратного комплекса локализации и классификации отказов элементов контактной сети на перегонах, представленная в приложении 2, позволяет реализовать функциональные задачи по

увеличению охвата диагностического комплекса на межстанционные участки. Следует отметить, что перегонная часть существенно отличается как по необходимой подготовке персонала, так и по соблюдению законодательных и регулятивных норм и предписаний. Причиной этому служит применение различных мобильных носителей как платформы для диагностического оборудования. Пример использования методики для различных электромагнитных радиоизлучений представлены на рисунке 4.2.

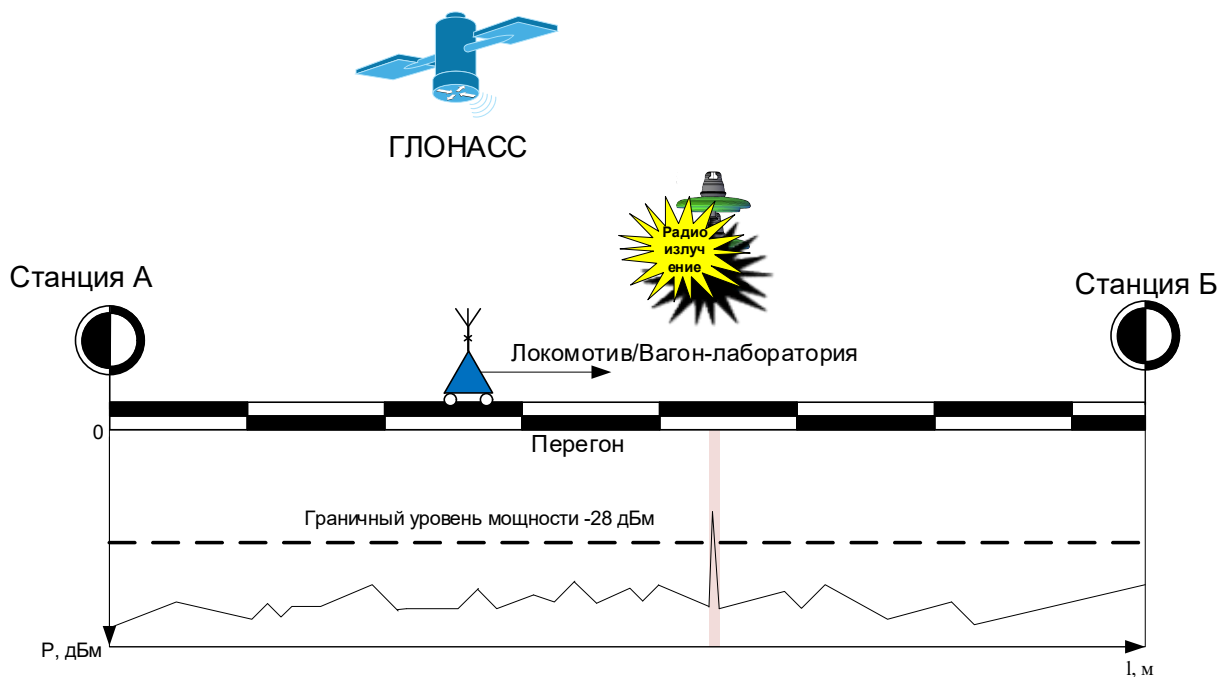


Рисунок 4.2 – Перегонная часть комплекса и её интеграция в сеть

Комплексный подход к методическому обеспечению внедрения и эксплуатации программно-аппаратного комплекса диагностики контактной сети радиоволновым способом является ключевым фактором успешной работы системы и достижения поставленных целей. В контексте интеллектуальных транспортных систем использование территориально-распределенных систем способствует сбору дополнительных данных для диагностики контактной сети. Агрегирование опыта, полученного в ходе применения метода, позволяет улучшать точность классификации в центральной системе, а затем переобучение нейронной сети с передачей весов обратно на выносные системы, увеличивает точность

классификации. Схема сбора данных происходит по талонам обратной связи, образец которых приведен в приложении 3. Талон формируется в целях улучшения метода диагностики. Данный подход обеспечивает гибкость в обучении классификатора и позволяет адаптировать метод к масштабированию на весь полигон железных дорог. Применение обратной связи от талонов для повышения точности классификатора представлено на рисунке 4.3.

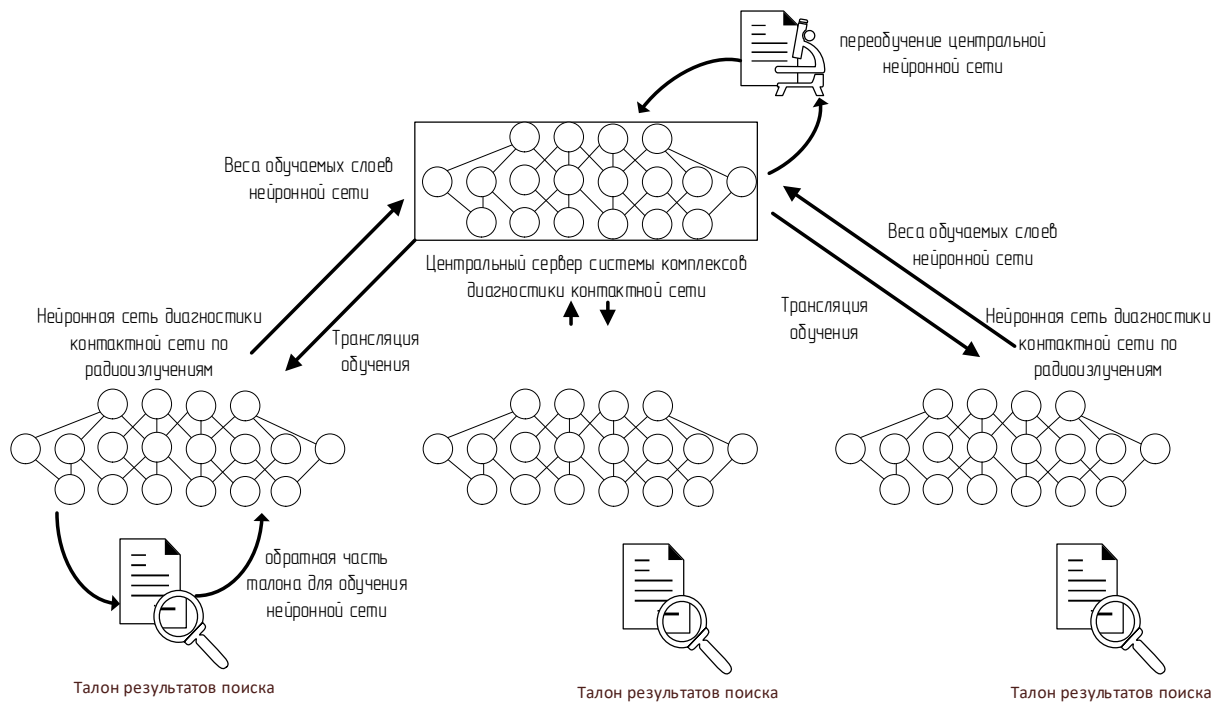


Рисунок 4.3 – Применение обратной связи для повышения точности классификатора

Сбор талонов обратной связи и образцов помех под них позволяет собрать датасет для дообучения нейронной сети, что увеличивает точность и позволяет расширить спектр диагностируемых отказов.

Для методов диагностики состояния контактной сети по радиоизлучениям в аппаратной реализации требуется одновременная поддержка нескольких разнонаправленных алгоритмов, поддержка протоколов обмена данными и быстрого кодирования информации. Для этого требуется следующие элементы:

- 1) система комплексов диагностики по радиоизлучениям – центральное устройство, которое проводит переобучение нейронной сети и содержит ПО для баз измерения и комплексов;
- 2) комплексы диагностики по радиоизлучениям – располагаемы на станциях устройства, обеспечивающие синхронизацию и сбор данных с баз измерения;
- 3) базы измерения – модули для локализации источников радиоизлучения на станции;
- 4) измерительные модули – модули для радиоволновой диагностики контактной сети на перегоне (адаптированные для размещения на локомотиве, ВИКС или автомобиле).

Основой аппаратного модуля является ARM-совместимый процессор с поддержкой алгоритмов нейронных сетей и графических сопроцессоров для ускорения процесса обработки. Схема интеграции комплексов в систему представлена на рисунке 4.4.

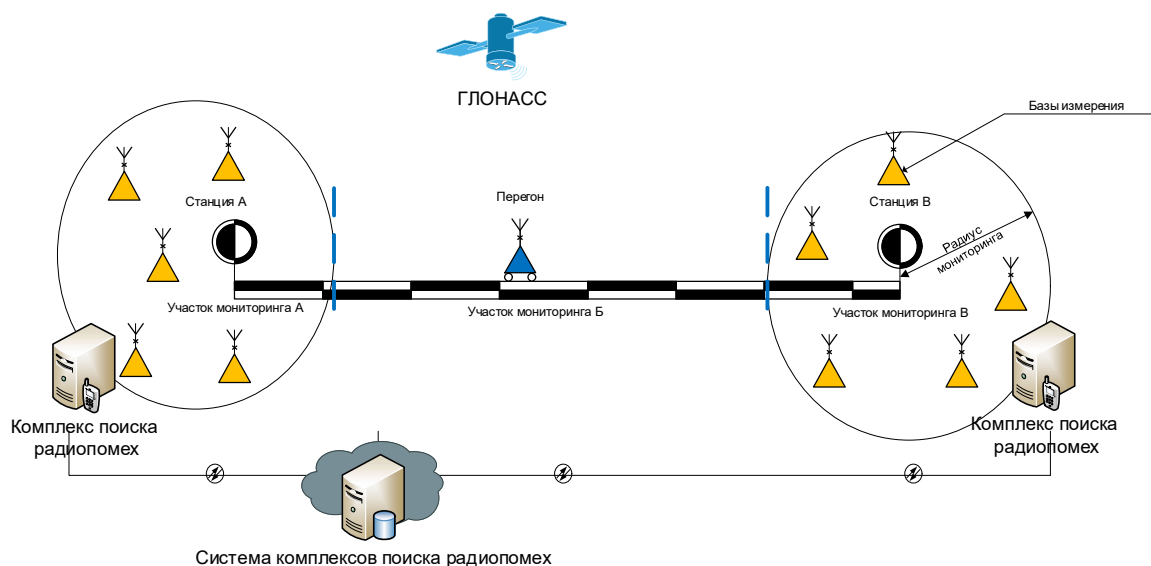


Рисунок 4.4 – Функциональная схема системы комплексов диагностики по радиоизлучениям

Совместимость программного обеспечения и аппаратной части осуществляется первоначальным выбором аппаратной части, которая

поддерживает язык разработки Matlab, а также уже имеющимся набором библиотек и опытом работы с ними. Поэтому в качестве финальных устройств были выбраны наиболее простые и хорошо изученные устройства. Для реализации метода диагностики контактной сети радиоволновым способом были использованы радиопроёмники RTL-SDR [77], одноплатные компьютеры Nvidia Jetson [78] в качестве комплексов диагностики и в качестве центральной системы комплексов предложен CUDA-сервер DELL POWEREDGE C4130, который позволяет дообучить нейронный классификатор метода при большом объеме датасета [79].

Обеспечение методов диагностики состояния контактной сети по радиоизлучениям инструкциями, аппаратной частью и приемами работы позволяет с минимальными затратами как ресурсов, так и времени, внедрять усовершенствованные методы на производство.

4.2 Анализ технологического аспекта эффективности диагностики изоляторов контактной сети по радиоизлучениям

Проведение широкой номенклатуры испытаний и экспериментов по выявлению сильных сторон комплекса позволяет провести анализ технологического аспекта от внедрения комплекса радиоволновой диагностики контактной сети. Следует отметить, что из-за особенности комплекса сравнение будет проходить отдельно для станции и для перегона, что даст цельную картину работы комплекса и технологических процедур.

Для определения технологического эффекта от внедрения системы диагностики изоляции по радиоизлучениям рассмотрим трудозатраты, необходимые для диагностирования участка контактной сети протяжённостью 100 км, при выполнении работ по существующим технологиям с использованием вагона-измерителя, оснащённого ультрафиолетовой камерой. Диагностика изоляторов с помощью комплекса ВИКС может выполняться одним оператором во время движения вагона с установленной скоростью. Для определённости примем скорость движения ВИКС равной 60 км/ч. На участке протяженностью 100 км с

помощью УФ-системы, работающей в составе ВИКС, с учетом времени на обработку диагностической информации по опыту Горьковской ЖД трудозатраты составляют не более 4 чел.ч [80].

Рассмотрим трудозатраты на участке исследования в пределах перегона станций В – Г, представленного на рисунке 4.5. Длина участка составляет 3,1 км. Особенностью участка является автомобильная дорога, которая находится в полосе отвода, но при этом является дорогой общего пользования. На данном участке 234 гирлянды изоляторов. Таким образом возможно провести сравнение в скорости и трудоёмкости процессов локализации и классификации радиоволнового излучения изоляторов контактной сети.

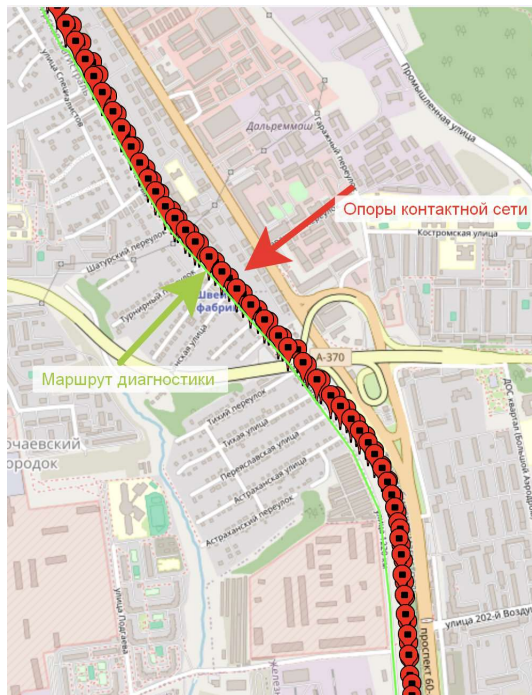


Рисунок 4.5 – Маршрут проведения диагностики ПЧР по излучениям на перегоне

Данный маршрут позволяет дать оценку эффективности предложенного для перегонов метода диагностики возимыми или носимыми средствами на базе SDR-радиоприемников. Сравнение затраченного времени на поиск ПЧР по технологическим картам, представленным выше, с временем, затраченным на проезд ВИКС или локомотива, оборудованного соответствующей системой

радиоволнового обнаружения источников ПЧР. Диагностика данного участка радиоволновым способом на скорости 60 км/ч заняла 0,0837 чел.ч, что для участка протяженностью 100 км составит 2,7 чел.ч. Таким образом, снижение трудозатрат составит 1,3 чел.ч. на 100 км исследуемого электрифицированного пути.

Данные, полученные в ходе расчета затраченного времени, показывают, что применение радиоволнового ВИКС с последующим уточнением локализации занимает существенно меньше времени, что позволяет эффективно использовать людские ресурсы на локализацию изоляторов с поверхностными частичными разрядами. На станции не применяется ВИКС, т.к. количество трудозатрат на проход вагона по каждому пути является чрезмерным, поэтому боковые пути и главные пути, по которым не прошел ВИКС, с регулярностью, соответствующей «Методике определения балльной оценки состояния контактной сети в Трансэнерго» [16], должны быть осмотрены с соответствующей регулярностью и проверены УФ-камерой или другими средствами диагностики.

Анализ эффективности применения стационарного исполнения комплекса проводился на станции А Хабаровского региона Дальневосточной железной дороги, что позволяет приблизить оценку затраченного времени к практическому использованию. На станции установлено 82 опоры контактной сети переменного тока, на которых подвешено 193 гирлянды изоляторов. Карта станции представлена на рисунке 4.6.

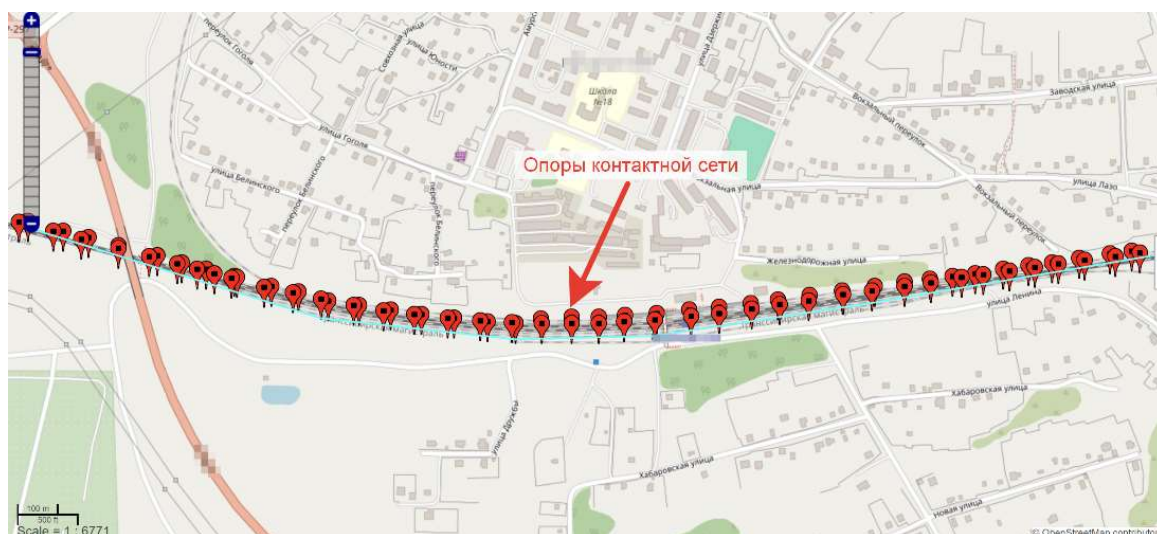


Рисунок 4.6 – Станция А Хабаровского региона ДВОСТ ж. д.

Решение для станций представляет собой базы измерения в количестве 5 штук, установленные на зданиях и антенно-мачтовых сооружениях радиосвязи. Следует отметить, что установка баз измерения требует наличие прямого Ethernet соединения с центральным маршрутизатором.

Технологические операции и оборудование, а также условия их реализации представлены в таблице 4.1, рассмотрены технологические карты на ультрафиолетовые камеры типа DayCore, которые позволяют при сходстве технологических операций с оптическим устройством Филин позволяет проводить диагностику с трудоёмкостью ниже уровня ультразвуковых средств [81, 82].

Также в рамках данной работы рассмотрены технологические карты, которые входили в приложение к Приказу МПС России № ЦЭ-197 от 12.07.1993. Данные технологические карты выведены из эксплуатации, однако, оборудование применяется на полигоне железных дорог для выявления дефектных изоляторов на железнодорожных станциях.

Таблица 4.1 – описание технологии при диагностике изоляторов контактной сети

Наименование операций и её трудоёмкость	Содержание операций, технологические требования и нормы
Выполнение работ камерой DayCor-llb Трудоёмкость диагностики с составляет 0,18 чел.ч на одну диагностируемую гирлянду [82].	1. Проверка крепления камеры DayCor-llb на жилете Подготовить все принадлежности камеры DayCor-llb для диагностики изоляторов с земли путем обхода воздушной линии 25 или 35 кВ 2. Подготовка камеры DayCor-llb к работе 3. Крепление камеры DayCor-llb 4. Работа с камерой DayCor-llb Камера загрузится в течение 15 секунд. При нажатии кнопки Standby на ЖК-дисплее появится сообщение о переходе в режим ожидания. При повторном нажатии камера переключится в режим работы. Плавное перемещать камеру, направляя ее на тарельчатый фарфоровый изолятор (объект диагностики) [81].
Выполнение работ с ультразвуковым дефектоскопом УД-8 Трудоёмкость диагностики с прибором УД-8 составляет 0,3 чел.ч на одну диагностируемую гирлянду [17].	2.1. Включить прибор. Перемещаясь вдоль линии контактной сети или питающей линии на расстоянии не более 20 м от диагностируемого объекта, по звуковому сигналу определить местонахождение гирлянды с дефектным изолятором, являющимся источником акустических колебаний в диапазоне частот 43-45 кГц. По мере приближения к гирлянде с дефектным изолятором звук усиливается. 2.2. Выявленные при диагностировании гирлянды с дефектными изоляторами зафиксировать

Результаты работы комплекса на станции представлены на рисунке 4.7.

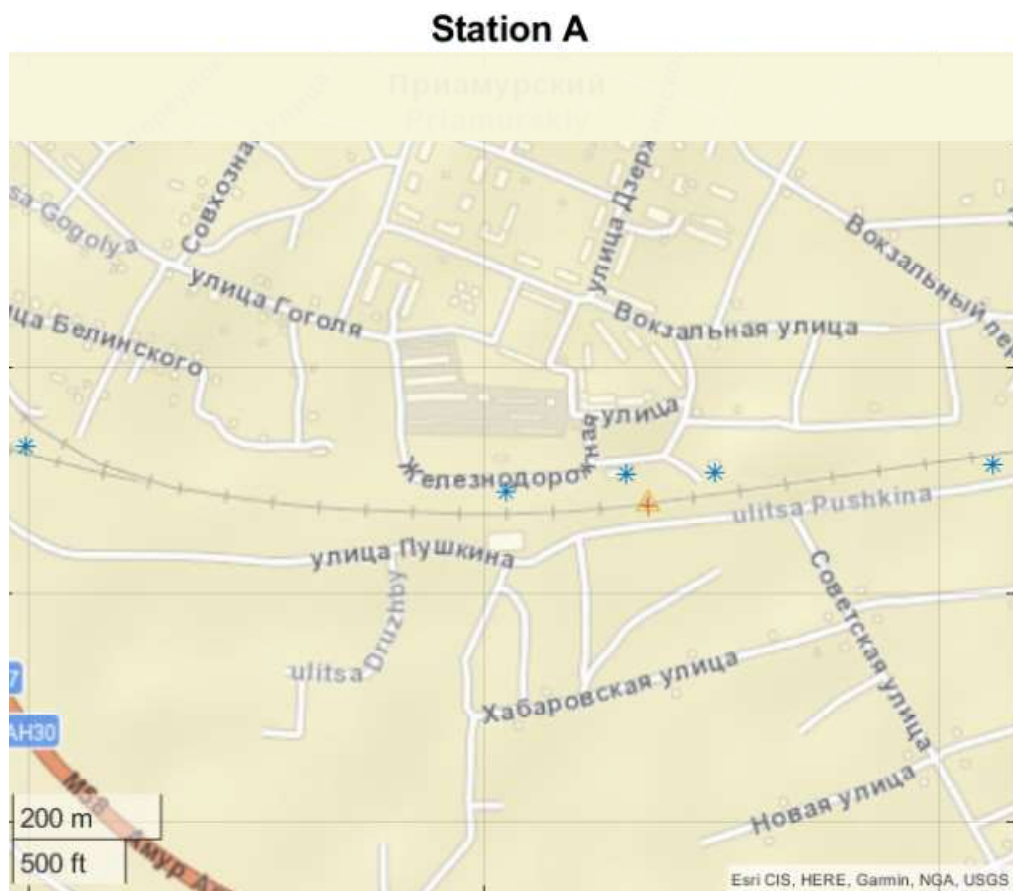


Рисунок 4.7 – Станция А Хабаровского региона ДВОСТ ж. д.

Комплекс позволяет локализовать и классифицировать ПЧР, однако стационарная часть также не является окончательным средством диагностики. Ей также требуется уточнение штатными средствами диагностики частичных разрядов, таких как УФ-камеры DayCore или УД-8. Для этого при оценке времени, затраченного на диагностику, были добавлены 0,3 часа на уточнение гирлянды и изолятора.

Анализ трудозатрат на выполнение технологических операций, как на станциях, так и на перегонах, показывает преимущество радиоволнового способа из-за высокой скорости локализации и классификации. Опытным путем установлено, что для уточнения локализации требуется помимо радиоволнового использовать методы ультразвукового и ультрафиолетового способа локализации

изоляторов с ПЧР. Диаграмма времени на диагностику контактной сети на станции А представлена на рисунке 4.8.

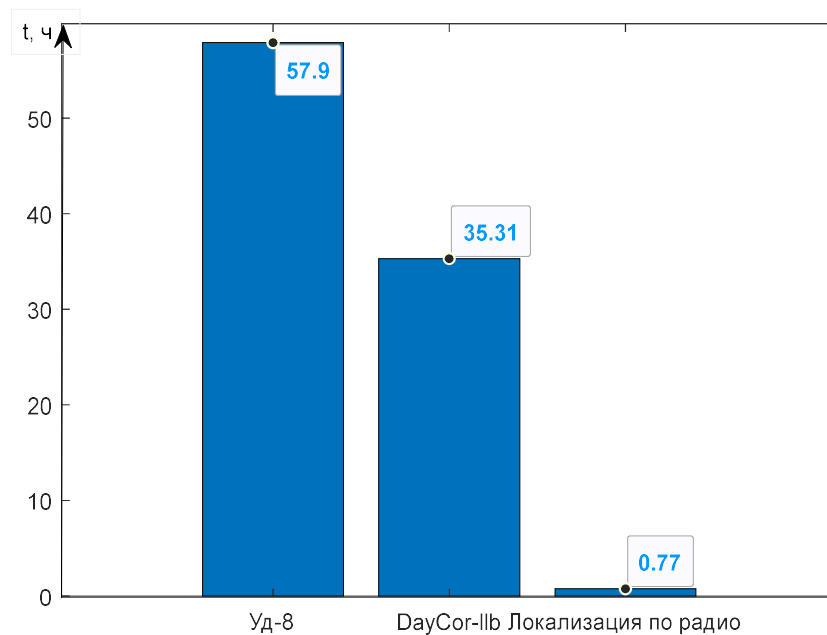


Рисунок 4.8 – Время на диагностику станции А

На одну гирлянду при радиоволновом методе, с учетом необходимости уточнения другими способами, требуется 0,01 чел.-ч., что значительно меньше, чем при использовании ультрафиолетовой камеры (0,18 чел.-ч.) и ультразвукового дефектоскопа (0,3 чел.-ч.). Следовательно, система диагностики контактной сети на основе радиоизлучений в станционном формате имеет преимущества перед ультразвуковыми и ультрафиолетовыми методами.

Помимо значительного снижения трудозатрат на диагностику изоляторов контактной сети, важным фактором является также минимизация негативного воздействия отказов изоляторов на эксплуатационную надежность железнодорожной инфраструктуры. Это выражается в сокращении количества и продолжительности задержек поездов, повышении стабильности графика движения, а также снижении потенциальных рисков для безопасности перевозок. Данные показывают негативную динамику и составляют за 2023 год 1092 поезда и 960,3 поезд-часов по причине выхода из строя изоляторов контактной сети. По

оценке исследователей Горьковской железной дороги, метод диагностики по УФ-камерам на базе ВИКС позволяет определить 25 % от общего числа неисправных изоляторов [83]. Причинами этому являются следующие факторы:

- малая область исследования;
- неудачные ракурсы съемки;
- скорость движения ВИКС, которая при частоте обновления кадра приводит к смазанным изображениям;
- вибрации от подвижного состава.

Анализ классификатора показывает, что вероятность классификации отказа изолятора контактной сети составляет 68,6 %, что превышает аналогичный показатель для установленных на ВИКС ультрафиолетовых камер. В результате достигнут технологический эффект при диагностике изоляторов на ВИКС по радиоизлучениям, что позволяет повысить эффективность поиска неисправных изоляторов на величину Δ , рассчитываемую по формуле:

$$\Delta = 68,6 \% - 25 \% = 43,6 \%$$

Резонно предположить, что в случае повышения эффективности поиска на 43,6 % время простоя будет снижено. Очевидно, что в результате эффективности поиска в 25 % было допущено простоя на 960,26 поезд-часов. В случае повышения эффективности на 43,6 % время простоя будет снижено до 402,03 поезд-часов. Следовательно, общее снижение времени простоя в поезд-часах составит:

$$960,26 - 402,03 = 557,97 \text{ поезд-часов.}$$

Данное снижение времени простоя составит 557,97 поезд-часов, что подтверждает значительное улучшение эффективности диагностики отказов изоляторов. Существенное сокращение простоев не только повышает пропускную способность железнодорожной сети, но и способствует оптимизации графика движения, снижению эксплуатационных затрат и повышению надежности работы контактной сети. Кроме того, уменьшение времени задержек положительно сказывается на общей эффективности перевозочного процесса, улучшая качество обслуживания пассажиров и грузоотправителей.

4.3 Анализ экономической эффективности диагностики контактной сети по радиоизлучениям

Анализ экономической эффективности предложенного в данном исследовании метода диагностики электрифицированного пути можно рассмотреть в разрезе всей контактной сети ДВОСТ ж. д. Оценка убытков от инцидентов, вызывающих нарушения графика движения поездов, должна производиться только по случаям отказов в работе технических средств и технологических нарушений, расследование которых полностью завершено, а необходимая информация о причинах инцидентов и их последствиях внесена в отраслевые автоматизированные системы управления, автоматизированные системы КАСАНТ и КАСАТ соответственно.

В дополнение к информации по отказам в работе технических средств, содержащейся в автоматизированной системе КАСАНТ, при определении размера убытков ОАО «РЖД» должны использоваться данные об объемах работ и ремонтов, выполняемых при восстановлении работоспособности железнодорожного подвижного состава и объектов инфраструктуры, формируемые в отраслевых автоматизированных системах. Данная информация вносится в отраслевые автоматизированные системы структурными подразделениями, являющимися подразделениями-балансодержателями отказавшего подвижного состава или объекта инфраструктуры, либо другими подразделениями ОАО «РЖД», выполняющими работы по восстановлению работоспособности отказавших технических средств. Перечисленная в отраслевых автоматизированных системах информация о конкретных видах работ и ремонтов, их объемах, а также величине расходов на материалы и заменяемое оборудование при восстановлении работоспособности железнодорожного подвижного состава или объекта инфраструктуры должна быть подтверждена первичными документами. Рекомендуемый перечень документов, подтверждающих сумму понесенного ущерба от инцидентов, вызывающих нарушение графика движения поездов, определен в приложении № 1 к Положению по организации

взаимодействия подразделений ОАО «РЖД» с юридическими и физическими лицами при возмещении убытков ОАО «РЖД» от инцидентов, вызывающих нарушение графика движения поездов, на железнодорожных путях общего пользования, утвержденному распоряжением ОАО «РЖД» от 13 января 2023 г. N 31/р [84].

Определение экономической целесообразности мероприятий проводилось согласно приложения 2 методики [84]. Учитывая, что ДВОСТ ж. д. относится к дорогам преимущественно-грузового движения, размер штрафа за 1 поезд-час грузового поезда составляет на ДВОСТ ж. д. 36483,75 руб. Величина экономии только на штрафах составит:

$$557,97 \cdot 36483,75 = 20356837,99 \text{ руб.}$$

Таким образом, совершенствование методов диагностики изоляторов контактной сети по радиоизлучениям позволяет снизить объем штрафных санкций из-за задержек движения поездов в рамках ДВОСТ ж. д., что приводит к значительной экономии средств. Величина экономии только на штрафах составит более 20 млн руб. Кроме того, снижение простоев грузовых поездов способствует повышению пропускной способности железнодорожной сети, улучшению эксплуатационной надежности и снижению финансовых потерь, связанных с нарушением графика движения. Внедрение данных технологий позволяет не только минимизировать экономические риски, но и повысить эффективность перевозочного процесса в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа представляет результаты исследования в области методов технической диагностики состояния элементов систем электроснабжения и отдельных технологических процессов на железнодорожном транспорте. В ходе ее выполнения успешно достигнута поставленная цель, решены сформулированные задачи, обоснована актуальность исследований и продемонстрирована научная новизна. Практическая значимость выводов подтверждается результатами как компьютерного моделирования, так и экспериментальными данными, полученными в ходе применения разработанной методики диагностики систем электрификации железных дорог.

Проведен анализ отказов элементов системы электроснабжения железной дороги, которые возможно диагностировать радиоволновым способом. Анализ данных системы учета отказов технических средств КАСАНТ показывает, что отказы изоляторов составляют 35,2 % от всех отказов технических средств хозяйства электроснабжения. Их влияние на эксплуатационные показатели подтверждается статистикой задержек поездов: в 2023 году зафиксировано 1092 задержки общей продолжительностью 960,3 часов, что негативно сказывается на пропускной и провозной способности железной дороги.

В рамках исследования обоснована адекватность выбранных диагностических признаков, сопровождающих неисправные режимы работы инфраструктуры контактной сети. Рассмотрены аспекты применения методов машинного обучения для классификации источников радиоволнового излучения с учетом мешающих влияний поездной радиосвязи и внешних помех. Для повышения точности диагностики предложено использование классификатора на базе сверточной нейронной сети, обеспечивающего точность классификации (Precision) на уровне 94,45 %. Также проведена классификация источников радиоволнового излучения с помощью LSTM-классификатора, средняя точность которого составляет 85,44 %, при минимальном значении для отдельных классов 68,6 %. Полученные результаты подтверждают возможность достоверного

выделения диагностических признаков, характерных для неисправных режимов работы контактной сети, что обеспечивает надежность предложенного метода радиоволновой диагностики.

Теоретически и экспериментально исследованы характеристики сигналов, содержащих полезную информацию об отказах элементов системы электроснабжения, а также мешающих сигналов. Определены их особенности для дальнейшего архивирования и использования в процессе обработки. Достоверность выбранных диагностических признаков, сопровождающих неисправные режимы работы инфраструктуры контактной сети, подтверждена в ходе экспериментов по сбору параметров поверхностных частичных разрядов (ПЧР) с использованием радиоприемных средств. Анализ полученных данных и уточнение параметров модели Мидлтона позволили достоверно описать радиоволновые излучения, характерные для различных типов неисправностей. Для нарушения условий токосъема параметры модели Мидлтона класса А составили: $A = 1,11$, $\Gamma = 2,69$. Для поверхностных частичных разрядов параметры составили: на поликарбонатном изоляторе $A = 2,208$, $\Gamma = 0,58$; на фарфоровом изоляторе $A = 0,2861$, $\Gamma = 0,25$; на стеклянном изоляторе $A = 19,926$, $\Gamma = 1,255$. Проведенная оценка моделей с использованием расстояния Кульбака-Лейблера показала их высокую точность по сравнению с моделью белого гауссового шума. Это подтверждает адекватность выявленных диагностических признаков и их пригодность для надежной идентификации неисправных режимов работы контактной сети.

Разработан новый радиоволновой метод локализации зоны нарушения условий токосъема с контактной сети и поверхностного частичного разряда электрических изоляторов. В основе метода лежит математическая модель локализации источника радиоволнового излучения, использующая пять баз измерения и разложение гиперболической функции в ряд Тейлора. Проведенные расчеты показывают, что среднеквадратическое отклонение координат источника излучения при измерении составляет 2,5 м.

Работоспособность и эффективность метода подтверждены компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями. В рамках взаимодействия с филиалами ОАО «РЖД» проведен эксперимент по диагностике ПЧР на изоляторах контактной сети радиоволновым способом на перегонах. Результаты показывают, что предложенный метод позволяет локализовать источник радиоволнового излучения по уровню мощности с точностью до 8 м, что подтверждает его применимость в практической эксплуатации.

Предложен усовершенствованный способ классификации отказов элементов контактной сети, основанный на регистрации электромагнитных излучений. В рамках внедрения изложенного подхода разработаны инструкции для обслуживающего персонала по установке, регламентным работам и эксплуатации комплекса поиска неисправных изоляторов и нарушений условий токосъема. Анализ трудозатрат на выполнение технологических операций как на станциях, так и на перегонах подтвердил преимущество радиоволнового способа благодаря высокой скорости локализации и классификации неисправностей. Применение методов диагностики изоляторов контактной сети по радиоизлучениям позволяет существенно сократить штрафные санкции, связанные с задержками движения поездов, что приводит к значительной экономии финансовых средств. Только в рамках ДВОСТ ж. д. величина экономии на штрафах составит более 20 млн руб.

В ходе развития технологий интеллектуальных транспортных систем внедрение решений для диагностики элементов контактной сети на основе нейронных сетей, мультилатерации и подвижных баз измерения позволяет решить задачи, определенные в «Стратегии научно-технологического развития холдинга РЖД на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая Книга)» и направленные на повышение пропускной и провозной способности всего полигона железных дорог, обеспечение высокого коэффициента готовности устройств контактной сети, а также реализовать потенциал железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (БЕЛАЯ КНИГА). Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 г. N 769/р.
2. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года (основные положения) [Электронный ресурс] // РЖД Документы. – 2020. – URL: https://ar2020.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_strategy.pdf (дата обращения: 12.01.2025).
3. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие / А. И. Хальясмаа [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 64 с.
4. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169346> (дата обращения: 28.03.2025).
5. Семенов Ю. Г. Алгоритмические основы распознавания опасных режимов дугового токосяема на контактной сети стационарными радиосистемами мониторинга // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – №1. – С. 118-126.
6. Жарков Ю. И., Семенов Ю. Г., Фигурнов Е. Ф. Повышение надежности и безопасности электроснабжения на основе мониторинга и раннего обнаружения опасных внешних воздействий и скрытых дефектов в устройствах электроснабжения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – №1. – С. 190-195.
7. Семенов Ю. Г. Структура и оптимизация параметров автоматизированной системы радиомониторинга для обнаружения режимов дугового токосяема на контактной сети // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – №3. – С. 125-133.

8. Zharkov, Yurii I., et al. The principals of operation of the automated current collection diagnostic system for electrified railways // 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). – IEEE, 2015.
9. Куценко С. М. Разработка дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта: дис. ... канд. техн. наук / С. М. Куценко; ИрГУПС; науч. рук. Н. Н. Климов. — Иркутск, 2006. — 148 с.
10. Kutsenko, Sergey M., et al. Method for detecting the source of radio interference affecting train radio communication in the band of 2.13 and 2.15 MHz // 2023.
11. Kutsenko, S. M., Klimov, N. N. Diagnostics of high-voltage insulation of the railway transport overhead system by the method of spaced antennas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Т. 760. – №1.
12. Федоров Г. С. Метод и измерительная система оценки состояния высоковольтных изоляторов на основе анализа частичных разрядов: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий / Г. С. Федоров; Казанский федеральный университет. — Казань, 2006. — 111 с. — URL: <https://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/168287> (дата обращения: 28.03.2025).
13. Зарипов Д. К. Методы дистанционного контроля состояния многоэлементных изолирующих конструкций электрифицированных железных дорог: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий / Д. К. Зарипов; Казанский федеральный университет. — Казань, 2006. — 172 с. — URL: <https://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/168271> (дата обращения: 28.03.2025).
14. Хакимзянов Э. Ф., Писковацкий Ю. В., Мустафин Р. Г., Губаев Д. Ф. Определение уставок сигнализации системы локационного контроля линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2012. — №11-12. — С. 81-85.

15. Правила технического содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.08.2021 № 1812/р. – Москва, 2021. – 261 с.
16. Методика определения балльной оценки состояния контактной сети в Трансэнерго : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 21.02.2018 № 348/р. – Москва, 2018. – 32 с.
17. Сборник правил и инструкций по эксплуатации электрифицированных железных дорог. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог ЦЭ 197. – Москва: Энергосервис, 2006.
18. Папук Л. А. Методика поиска источника радиопомех // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 9. – С. 20-21.
19. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения с линиями связи, устройствами железнодорожной автоматики и питающими электросетями: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / М. П. Бадер. — М., 2005. — 320 с.
20. Горевой И. М. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения с поездной радиосвязью: дис. канд. техн. наук. – Москва: МИИТ, 2011. – 191 с.
21. Васильева К. С., Башкатов С. П. Анализ и моделирование радиосигналов и помех в системах связи // Журнал радиотехники и электроники. – 2023. – Т. 68. – №5. – С. 425-438.
22. Асташков Н. П., Оленцевич В. А., Белоголов Ю. И., Кашковский В. В. Оценка совместимости системы тягового электроснабжения при внедрении интервального регулирования движения поездов по технологии "виртуальная сцепка" // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – №3 (67). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sovmestimosti-sistemy-tyagovogo-elektroposnabzheniya-pri-vnedrenii-intervalnogo-regulirovaniya-dvizheniya-po> (дата обращения: 12.01.2025).
23. Пузина Е. Ю. Моделирование ремонтных режимов работы системы электроснабжения участка Юрты – Нижнеудинск при реализации систем

интервального регулирования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – №3 (75). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-remontnyh-rezhimov-raboty-sistemy-elektroposnabzheniya-uchastka-yurty-nizhneudinsk-pri-realizatsii-sistem-intervalnogo> (дата обращения: 12.01.2025).

24. Многопозиционные радиотехнические системы / В. С. Кондратьев, А. Ф. Котов, Л. Н. Марков ; под ред. В. В. Цветнова. — М.: Радио и связь, 1986. — 264 с.

25. Симаков В. А. Разработка алгоритмов обработки информации в адаптивных угломерно-разностно-дальномерных системах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации / В. А. Симаков; Белгородский государственный университет. — Белгород, 2005. — 134 с.

26. Аль-Одхари А. Х. Позиционирование источника радиоизлучения в условиях высокогорья Республики Йемен с использованием беспилотных летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2018. — 153 с.

27. Лазарев В. О., Фокин Г. А. Оценка пределов точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методом // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019). – 2019. – С. 244-249.

28. Лазарев В. О., Фокин Г. А. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным угломерным методом. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. – 2019. – Т. 5. – №2. – С. 88-100.

29. Фокин Г. А., Кучерявый А. Е. Сетевое позиционирование в экосистеме 5G // Электросвязь. – 2020. – №9. – С. 51-58.

30. Фроленков С. А. Совершенствование диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог на основе сквозных цифровых технологий: дис. ... канд. техн. наук. — Самара: СамГУПС, 2024. — 181 с.

31. Rashid Md Mamun Ur, Tadele Belay Tuli. Review on Emission of Radiated Electromagnetic Fields from Train Pantograph Arcing. – 2021.

32. Bucca G., Collina A., Tanzi E. Experimental analysis of the influence of the electrical arc on the wear rate of contact strip and contact wire in ac system // *Advances in Italian Mechanism Science: Proceedings of the First International Conference of IFToMM Italy*. – Springer International Publishing, 2017. – С. 449-456.
33. Fan F., Wank A., Seferi Y., Stewart B. G. Pantograph arc location estimation using resonant frequencies in DC railway power systems // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2021. – Т. 7. – №4. – С. 3083-3095.
34. Midya S., Bormann D., Larsson A., Schutte T., Thottappillil R. Understanding pantograph arcing in electrified railways-influence of various parameters // *2008 IEEE international symposium on electromagnetic compatibility*. – 2008. – С. 1-6.
35. Midya S. Conducted and Radiated Electromagnetic Interference in Modern Electrified Railways with Emphasis on Pantograph Arcing: PhD dissertation. – KTH, 2009. – URL: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-10574> (дата обращения: 20.01.2025).
36. Mariscotti A. The electrical behaviour of railway pantograph arcs // *Energies*. – 2023. – Т. 16. – №3. – С. 1465.
37. Гозбенко В. Е., Громышова С. С., Белоголов Ю. И. Анализ и исследование факторов, влияющих на безопасность движения // *Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития*. – 2019. – С. 149-155.
38. Взрез стрелочного перевода 25.12.2019 ст. Барнаул Западно-Сибирская ЖД [Электронный ресурс]. – URL: <https://appsmakerstore.com/appsapi/zlo3s7ka6qth92/information/1255006/show.html> (дата обращения: 29.07.2024).
39. Взрез стрелочного перевода на станции Аскиз Красноярской ж.д. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cdrb.ru/news/20-debating/310-vzrez-strelki> (дата обращения: 29.07.2024).
40. Взрез стрелки на ст. Бугрыш ГЖД 4 февраля 2020 г. [Электронный ресурс]. – URL: <http://scbist.com/narusheniya-bezopasnosti-na-seti-dorog/52542> (дата обращения: 29.07.2024).

41. Роенков Д. Н., Плеханов П. А., Яронова Н. В. Способ оценки надежности сети поездной радиосвязи // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14. – №3.
42. Schreiber R., Bajer J. Time difference measurement algorithm for TDOA positioning system using RTL-SDR // 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). – IEEE, 2017. – С. 608-612.
43. Севидов В. В. Определение координат и параметров движения источника радиоизлучения на основе разностно-временных и разностно-доплеровских измерений: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – EDN WFNGLR.
44. Li W., Wei P., Xiao X. A robust TDOA-based location method and its performance analysis // Science in China Series F: Information Sciences. – 2009. – Т. 52. – №5. – С. 876-882.
45. Tamer, Ufuk. Localization Using TDOA and FDOA: EE 604 Term Project. – Middle East Technical University, 2015.
46. Tian Z., Liu W., Ru X. Multi-Target Localization and Tracking Using TDOA and AOA Measurements Based on Gibbs-GLMB Filtering // Sensors. – 2019. – Т. 19. – №24. – С. 5437.
47. Fang B. T. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes // IEEE transactions on aerospace and electronic systems. – 1990. – Т. 26. – №5. – С. 748-753.
48. Chamberlin K., Luebbers R. An evaluation of Longley-Rice and GTD propagation models [Электронный ресурс] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1982. – URL: <https://dx.doi.org/10.1109/TAP.1982.1142958>.
49. Руннова А. Е., Максименко В. А., Пчелинцева С. В., Куланин Р. А., Храмов А. Е. Метод вейвлет-анализа паттернов двигательной активности на экспериментальных данных многоканальной электроэнцефалографии человека для управления внешними устройствами // Информационно-управляющие системы. – 2018. – №1 (92). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-veyvlet-analiza-patternov> (дата обращения: 15.06.2021).

50. О'Ши Т. Дж., Корган Дж., Клэнси Т. К. Сверточные Радио-Сети Распознавания Модуляции // Предварительный доклад. – 2016.
51. О'Ши Т. Дж., Рой Т., Клэнси Т. К. Беспроводная основанная на глубоком обучении Радио-Классификация Сигнала // Журнал IEEE Выбранных Тем в Обработке сигналов. – 2018. – Т. 12. – №1. – С. 168-179.
52. Лю Х., Янг Д., Джамаль А. Э. Архитектуры глубоких нейронных сетей для классификации модуляций // Предварительная распечатка. – 2018.
53. Назимов А. И., Павлов А. Н. Применение вейвлет-анализа и искусственных нейронных сетей к решению задачи распознавания формы импульсных сигналов при наличии помех // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57. – №7. – С. 771-771.
54. Alom Md Zahangir, et al. The history began from alexnet: A comprehensive survey on deep learning approaches // arXiv preprint arXiv:1803.01164. – 2018.
55. Abbasniya M. Reza, et al. Classification of breast tumors based on histopathology images using deep features and ensemble of gradient boosting methods // Computers and Electrical Engineering. – 2022. – Т. 103. – С. 108382.
56. Yao Xujing, et al. Glomerulus classification via an improved GoogLeNet // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 176916-176923.
57. Szegedy C., et al. Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning // Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. – 2017.
58. Burhan, Iman Mohammed, et al. Mobile-computer vision model with deep learning for testing classification and status of flowers images by using IoTs devices// Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications. 2023. Т. 14, № 1. С. 82–94.
59. Berndt D., Clifford J. Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series [Электронный ресурс] // Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-94). – 1994. – URL: <https://dblp.org/rec/conf/kdd/BerndtC94.html>. (дата обращения: 23.10.2024).

60. Rundo F., Conoci S., Ortis A., Battiato S. An Advanced Bio-Inspired PhotoPlethysmoGraphy (PPG) and ECG Pattern Recognition System for Medical Assessment // *Sensors*. – 2018. – Т. 18. – С. 405.
61. Huseyin Kaya, Sule G. SAGA: A novel signal alignment method based on genetic algorithm // *Information Sciences*. – 2013. – Т. 228. – С. 113–130.
62. Ramsay J. O., Silverman B. W. *Applied Functional Data Analysis: Methods and Case Studies* // *Springer Series in Statistics*. – 2002.
63. Karim F., et al. LSTM fully convolutional networks for time series classification // *IEEE access*. – 2017. – Т. 6. – С. 1662-1669.
64. Siami-Namini S., Tavakoli N., Namin A. S. The performance of LSTM and BiLSTM in forecasting time series // *2019 IEEE International conference on big data (Big Data)*. – IEEE, 2019. – С. 3285-3292.
65. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // *arXiv preprint arXiv:1412.6980*. – 2014.
66. Srivastava N., et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting // *The journal of machine learning research*. – 2014. – Т. 15. – №1. – С. 1929-1958.
67. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть I // *Силовая электроника*. – 2006. – №10. – С. 58-64.
68. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. – Москва: Связь, 1977. – 135 с.
69. Middleton D. Procedures for determining the properties of the first-order canonical models of Class A and Class B electromagnetic interference // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 1979. – Т. 21. – №3. – С. 190-208.
70. Колосов Д. В. Электродуговые процессы как основа технической диагностики нарушений токосъема в электротяговых сетях переменного тока: дис. канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2007. – 148 с.

71. Zabin S. M., Poor H. V. Efficient estimation of Class A noise parameters via the EM algorithms // IEEE Transactions on Information Theory. – 1991. – Т. 37. – №1. – С. 60-72.
72. Kullback S., Leibler R. A. On information and sufficiency // Annals of Mathematical Statistics. – 1951. – Т. 22. – С. 79–86. – DOI: 10.1214/aoms/1177729694.
73. Куценко С. М., Климов Н. Н., Муратов В. И. Характеристики частичных разрядов в изоляторах из фарфора и поликарбоната // Известия ТПУ. – 2006. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-chastichnyh-razryadov> (дата обращения: 24.09.2024).
74. Gulati K., Chopra A., Heath R. W., Jr., Evans B. L., Tinsley K. R., Lin X. E. MIMO Receiver Design in the Presence of Radio Frequency Interference // Proc. IEEE Int. Global Communications Conf. – 2008.
75. Поляков Д. А., Никитин К. И., Терещенко Н. А., Новосёлов А. С., Билевич Я. П. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах // ОНВ. – 2020. – №1 (169). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-chastichnyh> (дата обращения: 31.05.2024).
76. Burgess S. Minimal Problems and Applications in TOA and TDOA Localization. – Lund University, 2016.
77. Schreiber R., Bajer J. Time difference measurement algorithm for TDOA positioning system using RTL-SDR // 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). – IEEE, 2017. – С. 608-612.
78. Микрокомпьютер NVIDIA® Jetson NANO [Электронный ресурс]. – URL: <https://omega-industrial.ru/item/D203493038> (дата обращения: 08.11.2024).
79. CUDA-сервер DELL POWEREDGE C4130 [Электронный ресурс]. – URL: <https://servergate.ru/configure/dell> (дата обращения: 08.11.2024).
80. Грачев В. Ф. Мобильная компьютеризированная система диагностики арматуры и изоляции контактной сети по инфракрасному и ультрафиолетовому излучению: диссертация на соискание степени кандидата технических наук: 05.22.07 / Грачев Василий Федорович; Петербургский государственный университет путей сообщения (ПГУПС). — Москва, 2008. — 180 с.

81. Технологическая карта №1/11. Обход с осмотром воздушных линий электропередачи напряжением до 35 кВ и трансформаторных подстанций / ПКБ ОАО «РЖД». — Москва: РЖД, 2011. — 14 с.

82. Нормы времени и нормативы численности на техническое обслуживание и текущий ремонт устройств электроснабжения, СЦБ и других нетяговых потребителей / Регламентировано распоряжением ОАО «РЖД» от 4 июня 2013 г. № 1251/р. — 141 с.

83. Повышение достоверности ультрафиолетовой диагностики изоляции контактной сети / ф. Д. Железнов, Ю. И. Плотников, В. А. Акулов [и др.] // Железные дороги мира. — 2011. — № 4. — С. 60-68. — EDN NXXVIB.

84. Методика определения убытков ОАО «РЖД» от инцидентов, вызывающих нарушения графика движения поездов, на железнодорожных путях общего пользования. — Регламентирована распоряжением ОАО "РЖД" от 30 марта 2023 г. № 784/р. — 61 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Инструкция по эксплуатации программно-аппаратного комплекса локализации и классификации отказов элементов контактной сети на железнодорожных станциях

1. Общие положения

1.1. Настоящая инструкция разработана для сотрудников Хабаровской дистанции электроснабжения (ХДЭС), Дальневосточной дирекции по энергообеспечению (ДВДЭ), структурного подразделения ТрансЭнерго – филиала ОАО «Российские железные дороги».

1.2. Инструкция определяет порядок работы с программно-аппаратным комплексом поиска нарушений условий токосъема и неисправных изоляторов, а также распределяет обязанности между сотрудниками.

2. Описание работы комплекса

2.1. Данный комплекс обеспечивает локализацию и классификацию источников нарушений токосъема и неисправных изоляторов базами измерения в составе выносной системы.

2.2. Комплекс осуществляет сбор параметров нарушений и неисправностей.

2.3. Комплекс выполняет определение местоположения нарушений разностно-временным способом.

2.4. Комплекс обеспечивает реагирование на нарушения и неисправности, а также их устранение.

2.5. Комплекс выполняет идентификацию источников нарушений, записывает их параметры и образцы.

2.6. Система комплекса агрегирует образцы нарушений и соответствующие им местоположения в единой базе данных.

2.7. Система комплекса обеспечивает переобучение нейронной сети с включением новых источников нарушений и неисправностей.

2.8. Система комплекса обеспечивает передачу обновлений с центральной системы обратно на выносные системы в рамках обновления программного обеспечения.

3. Инсталляция комплекса

3.1. Установить комплекс в помещении, подключить входящий в комплект роутер и активировать на нем режим питания по PoE.

3.2. Подключить комплекс через интерфейс RJ-45 с указанием «к серверу» к сети, в которую включена система комплекса.

3.3. Ввести координаты баз измерения и известных объектов железнодорожной инфраструктуры.

3.4. Установить базы измерения на максимально возможном расстоянии друг от друга.

3.5. С помощью геодезического приемника сигналов спутникового позиционирования (GNSS) или по уже известным географическим координатам внести координаты установленных баз измерения.

3.6. Подключить антенну к измерительной базе к интерфейсу CP50 (антенна подключается только к выключенному устройству!).

3.7. Подключить через интерфейс RJ-45 базу измерения к комплексу измерения.

3.8. Базы измерения обеспечиваются электропитанием через PoE, при подключении активируется световая индикация получения питания и связи с комплексом.

4. Работа с комплексом

4.1. Обязанности старшего электромеханика ХДЭС, ответственного за работу комплекса:

4.1.1. Обеспечить проверку наличия и исправности оборудования.

4.1.2. Контролировать удаленный доступ сотрудников к программно-аппаратному комплексу.

4.1.3. Осуществлять контроль за процессом поиска нарушений и анализом результатов.

4.1.4. Обеспечить точное соответствие координат баз измерения данным, введенным в систему, с применением GPS/GNSS систем для обеспечения максимальной точности.

4.1.5. Обеспечить включение комплекса в сеть СПД РЖД для обновления программного обеспечения и передачи опыта. Обеспечить обратную связь от смежных организаций в случае необходимости устранения неисправностей на их объектах инфраструктуры.

4.1.6. Результаты диагностирования перенести в «Журнал диагностирования изоляторов», а изоляторы, требующие замены – в «Журнал осмотров и неисправностей» (форма ЭУ-83).

4.2. Обязанности электромеханика:

4.2.1. Запустить программно-аппаратный комплекс, следовать инструкциям на экране для начала поиска нарушений.

4.2.2. Передать талон результатов поиска старшему электромеханику ХДЭС после локализации и классификации источника системой. Образец талона результатов поиска представлен в приложении 3.

4.2.3. Формировать сопроводительную информацию и обеспечить её внесение в систему комплекса для локализации и классификации нарушений.

4.2.4. Вносить координаты оборудования и инфраструктуры от различных источников в систему.

4.3. Смежные подразделения, в ведении которых находятся объекты, вызывающие нарушения:

4.3.1. При получении талона результатов поиска немедленно приступить к устранению неисправности, приводящей к нарушениям.

4.3.2. Подписать отрывной талон обратной связи.

4.4. Ответственному за функционирование системы комплекса:

4.4.1. Обеспечить агрегацию данных с локальных комплексов в общую систему.

4.4.2. Контролировать процесс передачи обучения от локальных комплексов в общую систему.

5. Охрана труда при работе с комплексом

5.1. При выполнении работ на высоте сотрудники обязаны использовать средства индивидуальной защиты и соблюдать технику безопасности.

5.2. Во время грозы работы на открытом воздухе и на высоте запрещены. Все электронное оборудование должно быть отключено и защищено.

5.3. Сотрудники должны быть обучены правилам оказания первой помощи при несчастных случаях на производстве.

6. Предварительная подготовка сотрудников

6.1. Все сотрудники, задействованные в работе с программно-аппаратным комплексом, должны пройти обучение и инструктаж по работе с оборудованием.

6.2. Сотрудники должны быть ознакомлены с порядком действий в случае обнаружения нарушений и неисправностей, а также с порядком взаимодействия со смежными подразделениями.

Заключение

Соблюдение настоящей инструкции обязательно для всех сотрудников, задействованных в работе с программно-аппаратным комплексом поиска нарушений и неисправностей.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Инструкция по эксплуатации программно-аппаратного комплекса локализации и классификации отказов элементов контактной сети на перегонах

1. Общие положения

1.1. Настоящая инструкция разработана для сотрудников Хабаровской дистанции электроснабжения (ХДЭС), Дальневосточной дирекции по энергообеспечению (ДВДЭ), структурного подразделения ТрансЭнерго – филиала ОАО «Российские железные дороги».

1.2. Инструкция определяет порядок работы с программно-аппаратным комплексом поиска нарушений условий токосъема и неисправных изоляторов, а также распределяет обязанности между сотрудниками.

2. Описание работы комплекса

2.1. Данный комплекс обеспечивает локализацию и классификацию источников нарушений условий токосъема и неисправных изоляторов при помощи носимой/возимой части, которая может быть размещена:

- в ранце;
- на вагоне-измерителе контактной сети;
- на локомотиве.

2.2. Комплекс обеспечивает локализацию максимального уровня радиоизлучения и определение местоположения с помощью системы ГЛОНАСС при проходе, пролете или проезде носимой/возимой части.

2.3. Комплекс выполняет сбор параметров нарушений и неисправностей.

2.4. Комплекс осуществляет классификацию источника электромагнитных радиоизлучений.

2.5. Система комплекса агрегирует образцы нарушений и соответствующие им местоположения в единой базе данных.

2.6. Система комплекса обеспечивает переобучение нейронной сети с включением новых источников нарушений и неисправностей.

2.7. Система комплекса обеспечивает передачу обновлений с центральной системы обратно на выносные системы в рамках обновления программного обеспечения.

3. Установка комплекса

3.1. Установить комплекс в помещении, подключить входящий в комплект роутер и активировать на нем режим питания по PoE.

3.2. Подключить комплекс через интерфейс RJ-45 с указанием «к серверу» к сети, в которую включена система комплекса.

3.3. Ввести координаты баз измерения и известных объектов железнодорожной инфраструктуры.

3.4. Установить базы измерения на максимально возможном расстоянии друг от друга.

3.5. С помощью геодезического приемника сигналов спутникового позиционирования (GNSS) или по уже известным географическим координатам внести координаты установленных баз измерения.

3.6. Подключить антенну к измерительной базе к интерфейсу CP50 (антенна подключается только к выключенному устройству!).

3.7. Подключить через интерфейс RJ-45 базу измерения к комплексу измерения.

3.8. Базы измерения обеспечиваются электропитанием через PoE, при подключении активируется световая индикация получения питания и связи с комплексом.

4. Работа с комплексом

4.1. Обязанности старшего электромеханика ХДЭС, ответственного за работу комплекса:

4.1.1. Обеспечить проверку наличия и исправности оборудования.

4.1.2. Контролировать удаленный доступ сотрудников к программно-аппаратному комплексу.

4.1.3. Осуществлять контроль за процессом поиска нарушений и анализом результатов.

4.1.4. Обеспечить точное соответствие координат баз измерения данным, введенным в систему, с применением GPS/GNSS систем для обеспечения максимальной точности.

4.1.5. Обеспечить включение комплекса в сеть СПД РЖД для обновления программного обеспечения и передачи опыта. Обеспечить обратную связь от смежных организаций в случае необходимости устранения неисправностей на их объектах инфраструктуры.

4.1.6. Результаты диагностирования перенести в «Журнал диагностирования изоляторов», а изоляторы, требующие замены - в «Журнал осмотров и неисправностей» (форма ЭУ-83).

4.2. Обязанности электромеханика:

4.2.1. Запустить программно-аппаратный комплекс, следовать инструкциям на экране для начала поиска нарушений.

4.2.2. Передать талон результатов поиска старшему электромеханику ХДЭС после локализации и классификации источника системой. Образец талона результатов поиска представлен в приложении 3.

4.2.3. Формировать сопроводительную информацию и обеспечить её внесение в систему комплекса для локализации и классификации нарушений.

4.2.4. Вносить координаты оборудования и инфраструктуры от различных источников в систему для повышения точности локализации и классификации источников.

4.3. Смежные подразделения, в ведении которых находятся объекты, вызывающие нарушения:

4.3.1. При получении талона результатов поиска немедленно приступить к устранению неисправности, приводящей к нарушениям.

4.3.2. Подписать отрывной талон обратной связи.

4.4. Ответственному за функционирование системы комплекса:

4.4.1. Обеспечить агрегацию данных с локальных комплексов в общую систему.

4.4.2. Контролировать процесс передачи обучения от локальных комплексов в общую систему.

5. Охрана труда при работе с комплексом

5.1. При выполнении работ на высоте сотрудники обязаны использовать средства индивидуальной защиты и соблюдать технику безопасности.

5.2. Во время грозы работы на открытом воздухе и на высоте запрещены. Все электронное оборудование должно быть отключено и защищено.

5.3. Сотрудники должны быть обучены правилам оказания первой помощи при несчастных случаях на производстве.

6. Предварительная подготовка сотрудников

6.1. Все сотрудники, задействованные в работе с программно-аппаратным комплексом, должны пройти обучение и инструктаж по работе с оборудованием.

6.2. Сотрудники должны быть ознакомлены с порядком действий в случае обнаружения нарушений и неисправностей, а также с порядком взаимодействия со смежными подразделениями.

Заключение

Соблюдение настоящей инструкции обязательно для всех сотрудников, задействованных в работе с программно-аппаратным комплексом поиска нарушений условий токосъема и неисправных изоляторов.

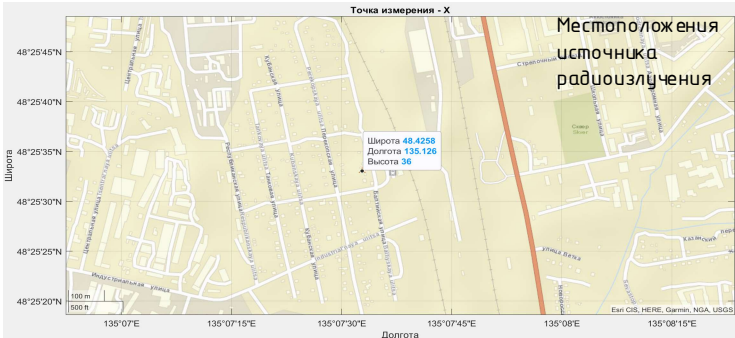
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Талон результатов диагностики



00000001

Результат диагностики контактной сети

Время: 02.10.2024 13:55
Местоположение: Станция А
Тип участка диагностики: станция А
Локализация радиоизлучения: Широта 42.4258
Долгота 135.126 Высота 6 м.
Вероятная причина излучения: ПЧР стеклянного
изолятора (72%)
Ответственный: ЭЧК Петров
Подразделение: ЭЧК-Х
Комментарии:



Время печати: 02.10.2024 13:55

00000001



Талон обратной связи

Время:
Местоположение: Станция А
Тип участка диагностики: станция А
Фактическая локализация:
Фактическая причина отказа:
Ответственный: ЭЧК Петров
Подразделение: ЭЧК-Х
Реакция смежных подразделений:
Комментарии:

Место для локальной схемы местоположения источника радиоизлучения

Внесено в систему:

Ответственный:

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Акт внедрения результатов исследования в АО «ДГК»



Акционерное общество
«Дальневосточная генерирующая компания»

ул. Фрунзе, 49, г. Хабаровск,
Российская Федерация, 680000

т.: +7 (4212) 30-49-14
ф: +7 (4212) 26-43-87

dgk@dgk.ru
www.dvgk.ru

от _____ № _____
на № _____ от _____

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

комплексных исследований радиоволновым способом изоляторов открытых
распределительных устройств ТЭЦ АО «ДГК»

Автор: соискатель ДВГУПС Сидорович Максим Анатольевич

В период с 17.06.2024 по 18.06.2024 соискателем ДВГУПС Сидоровичем Максимом Анатольевичем были проведены исследования состояния изоляторов открытых распределительных устройств (ОРУ-220кВ) на территории Хабаровской ТЭЦ-3.

Результаты работы Сидоровича М.А. внесены в план производственной программы модернизации СП ХТЭЦ-3, после чего планируются к внедрению в технологический процесс выдачи электрической мощности в сеть при проведении мониторинга собственных дефектов изоляторов радиоволновым методом.

Применение программно-аппаратного решения, через использование многобазового метода локализации и классификации источников, позволяет обнаруживать неисправные изоляторы на ОРУ, что снижает время на диагностику и позволяет оперативно проводить диагностику изоляторов на станции. Отдельно стоит отметить гибкость предложенного решения как метода неразрушающего контроля, что позволяет проводить его без проведения отключений линий и дополнительных согласований вывода оборудования из работы с АО «Системный оператор».

В ходе комплексного исследования выявлена возможность обеспечения диагностики предотказных состояний, для включения в последующий график запланированного технического обслуживания и ремонта. Такое планирование позволяет эффективно использовать ритмичность технологического процесса, как в плане поставок, так и останова оборудования. Результаты исследования одобрены и приняты к сведению для тиражирования в СП АО «ДГК».

Начальник управления
эксплуатации



К.В. Ильичев

ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Акт внедрения результатов исследования в АО «СВЯЗЬТРАНСНЕФТЬ»

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

комплексных исследований радиоволновым методом участка воздушной линии
электропередачи

Автор: соискатель ДВГУПС Сидорович Максим Анатольевич

В период с 13.05.2024 по 24.05.2024 соискателем ДВГУПС Сидоровичем Максимом Анатольевичем были проведены исследования состояния изоляторов воздушной линии электропередачи на участке трубопровода Восточная Сибирь – Тихий океан 2, в т. ч. с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Результаты работы Сидоровича М. А. будут внедрены в технологический процесс при проведении мониторинга собственных воздушных линий электропередач радиоволновым методом. Применение программно-аппаратного решения, устанавливаемого на БПЛА или переносимого в ранце, позволяет обнаруживать неисправные изоляторы воздушных линий по источникам радиоволнового излучения, а также классифицировать источник излучения, что снижает время на диагностику. Отдельно стоит отметить гибкость предложенного решения в части возможности установки на различные типы транспортных средств и БПЛА.

В ходе комплексного исследования выявлена эффективность радиоволнового метода диагностирования отказов воздушных линий 6 и 10 кВ. Выявлен потенциал для использования решений комплексного исследования при диагностики трубопроводов. Результаты исследования одобрены и приняты к сведению для тиражирования в Дальневосточном производственно-техническом управлении связи - филиале АО «СвязьТранснефть»

Директор
Дальневосточного
производственно-техническом
управлении связи - филиал
«СвязьТранснефть».



С.Б. Хрульков