

На правах рукописи



Надежкина Снежана Андреевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ
ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЫКОВ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ
ПРИНЦИПОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ**

2.9.4. Управление процессами перевозок
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тарасов Евгений Михайлович

Официальные оппоненты:

Бушуев Сергей Валентинович, доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС);

Соколов Максим Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС);

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС).

Защита состоится «30» июня 2026 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 44.2.006.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский государственный университет путей сообщения» по адресу: 443066, г. Самара, ул. Свободы, 2 В, ауд. 5216.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат <https://www.samgups.ru/>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Исайчева Алевтина Геннадьевна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное стремительное развитие железнодорожного транспорта напрямую связано с увеличением веса поезда, осевых нагрузок до 25-27 тонн и повышенными скоростями движения. В связи с этим, предъявляются высокие требования к обеспечению стабильности показателя надежности и эффективности работы систем интервального управления движением поездов. Исходя из «Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая Книга)» очевидно, что достижение эффективности непрерывной диагностики и мониторинга систем железнодорожной автоматики и телемеханики, ключевых векторов стратегии объектов транспортной инфраструктуры, должно быть реализовано в том числе за счет: «...разработки и внедрения объектно-ориентированной базы данных, алгоритмов и методов интегральных оценок результатов измерений, полученных от различных средств стационарной и мобильной диагностики в комплексе с другими источниками данных с целью повышения достоверности прогнозирования состояния объектов инфраструктуры» (п. 4.6.2).

Данное положение обосновывает актуальность исследования, которое направлено на формирование методики контроля текущего состояния сопротивления рельсовых линий, чувствительного элемента первичного датчика систем ЖАТ, в частности токопроводящих рельсовых стыков в комплексе с рельсовыми линиями, с использованием принципов распознавания образов. Также в соответствии со «Стратегией...» прямым обоснованием темы диссертационного исследования служит положение пункта 4.6.3, согласно которому повышение качества технического обслуживания возможно за счет: «...развития систем технической диагностики и мониторинга устройств автоматики и телемеханики с внедрением инновационного оборудования и технологий обработки информации, интеграции их в единую систему управления процессами мониторинга и диагностики технического состояния железнодорожной инфраструктуры и формирования единого информационного пространства о техническом состоянии объектов железнодорожной инфраструктуры».

В качестве объекта диагностики выбраны элементы рельсовой линии, а именно – токопроводящие рельсовые стыки, отказоустойчивость которых напрямую влияет на надежность функционирования рельсовых цепей как первичных датчиков информации о состоянии рельсового пути. Существующие способы контроля стыков не позволяют в полной мере достоверно и с высокой точностью производить качественную оценку текущего состояния элемента, что

затрудняет процесс интеграции результатов измерений в автоматизированные системы диагностики и формирования единого информационного пространства о техническом состоянии инфраструктуры.

Имеющиеся в данной сфере научные результаты требуют дальнейшего совершенствования. Так, к числу нерешенных проблем относится задача обеспечения непрерывной классификации состояний рельсовых линий и определения на ее основе текущей величины сопротивления стыка под влиянием дестабилизирующих факторов. При этом существующие традиционные научные подходы и используемые на практике технические решения не позволяют обеспечить интеграцию результатов контроля в автоматизированные системы диагностики вследствие их недостаточной степени готовности. Поэтому создание методики контроля сопротивления токопроводящих стыков, основанной на современных принципах распознавания образов и интеллектуальной обработки диагностических данных, является актуальной научно – технической задачей.

Диссертация выполнена согласно плану исполнения госбюджетного НИР ПривГУПС, финансируемого за счет федерального бюджета в соответствии приоритетным направлениям и Стратегии научно-технического развития РФ, утвержденных Указом Президента РФ от 1.12.2016 №612 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», код научной темы PNML-2024-0004, №124040100033-0, тема: «Разработка многопараметральных обучаемых классификаторов состояний рельсовых линий с подстраиваемой моделью в канале самонастройки». Исследования выполнены при финансовой поддержке программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») в 2025 году и конкурса «Молодой Ученый Самарской области» в номинации «Аспирант» в 2024 году.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в разработку систем железнодорожной автоматики и телемеханики внесли известные ученые А.М. Брылеев, В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, П.Ф. Бестемьянов, А.И. Годяев, Б.М. Степенский, Н.Ф. Фонарев, Ю.А. Кравцов, В.И. Шаманов, И.В. Беляков, В.И. Апатцев, С.В. Бушуев, В.С. Аркатов, А.А. Казаков, Д.В. Шалягин, Н.Н. Васин, Е.М. Тарасов и др.

Повышение уровня стабильности работы перевозочного процесса и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, соответственно, возможно за счет современных и новых подходов к технической диагностике, теоретические основы которых рассмотрены следующими авторами: И. Е. Дмитренко, Д.В. Ефановым, Б.Д. Перникисом, Н.Н. Лябаха, А.Е. Тарасовой, Р.Ш. Ягудиным, В.Н. Иванченко и др.

Анализ работ выдающихся ученых показывает, что проблема безошибочности классификации сопротивления токопроводящих рельсовых стыков и локализации координаты неисправного стыка в условиях действия дестабилизирующих влияний не решена в полной мере и требует новых инновационных технических подходов, и разработки методик, позволяющих повысить контроль состояния токопроводящих стыков.

Целью диссертационного исследования является разработка методики диагностики сопротивлений токопроводящих стыков на основе принципов распознавания многомерных образов и диагностических функций.

Для достижения поставленной цели в диссертации сформированы следующие **задачи**:

- анализ статистических данных отказов первичных датчиков состояний рельсовой линии из-за неисправностей распределенных токопроводящих рельсовых стыков;

- разработка математических моделей входных и выходных электрических параметров рельсовых линий с распределенно – дискретными параметрами;

- разработка математической модели исследования информативности первичных признаков;

- разработка структурно – функциональной схемы передачи информации по волоконно – оптической линии о состоянии сопротивлений токопроводящих стыков, как компонент напольных устройств ЖАТ;

- разработка архитектуры распознающей системы сопротивлений и координат токопроводящих стыков с повышенным сопротивлением.

Объектом исследования являются устройства железнодорожной автоматики и телемеханики и технические средства, обеспечивающие безопасность перевозочного процесса.

Предметом исследования являются методики, способы и машинные алгоритмы диагностики состояний сопротивления токопроводящих рельсовых стыков для автоматизированных систем технической диагностики и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Научная новизна полученных автором в диссертационном исследовании результатов заключается в следующем:

1. Разработаны математические модели первичных информативных признаков, элементов образов состояний сопротивлений рельсовых линий, отличающиеся от известных моделей распределенным сопротивлением рельсов и дискретным представлением токопроводящих стыков в пределах рельсовой линии рельсовой цепи, позволяющие формировать диагностические функции вычисления величины сопротивления и координаты токопроводящих стыков с повышенным сопротивлением.

2. Предложена методика диагностики сопротивлений токопроводящих стыков и определения координаты токопроводящих стыков с повышенным сопротивлением на основе принципов распознавания образов с множеством диагностирующих функций и многомерным пространством образов, сформированных из первичных информативных признаков ранжированием признаков на основе оценки их параметрической чувствительности, а также двухуровневой классификации диапазона изменения сопротивлений и определения координат стыков, позволяющей сформировать решающие правила определения стыков с повышенной проводимостью с использованием диагностических функций.

3. Разработан алгоритм функционирования устройства распознавания сопротивления токопроводящих стыков, отличающийся от известных применением множества диагностических функций, реализованный в микропроцессорном модуле с предварительно обученным классификатором, а также с использованием отказоустойчивой кольцевой топологии сети передачи данных на основе волоконно-оптических систем передачи данных, позволяющий подтвердить адекватность методики распознавания сопротивления токопроводящих стыков.

Теоретическая и практическая значимость работы. В результате выполненных научных исследований расширены теоретические основы диагностики состояния токопроводящих стыков рельсовых линий с распределенными параметрами. Разработаны математические модели входных и выходных электрических параметров рельсовой линии, описывающие зависимость комплексных амплитуд напряжений и токов от параметров рельсовой линии и позволяющие формировать пространство информативных признаков для распознавания продольных неоднородностей рельсовых линий. Предложена методика селекции и ранжирования первичных признаков на основе анализа коэффициентов чувствительности схемных функций к изменению сопротивления токопроводящих стыков, что обеспечивает формирование минимально необходимого рабочего множества наиболее информативных параметров.

Практическая значимость работы заключается в создании архитектуры устройства распознавания сопротивления токопроводящих стыков, включающей измерительные каналы на базе датчиков тока и напряжения, микропроцессорный модуль с классификатором сопротивлений, а также кольцевую топологию передачи диагностической информации с использованием волоконно-оптических систем передачи данных, что позволяет создать устройство непрерывного распознавания сопротивления токопроводящего стыка и определения его координаты с повышенным сопротивлением, и условия

перехода технологии обслуживания и ремонта по фактическому состоянию стыка.

Реализация результатов исследований осуществлена путем использования математических моделей формирования информативных признаков при выполнении госбюджетного НИР, финансируемого за счет средств федерального бюджета, согласно «Приоритетным направлениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», код научной темы PNML-2024-0004, №124040100033-0, тема: «Разработка многопараметральных обучаемых классификаторов состояний рельсовых линий с подстраиваемой моделью в канале самонастройки». Исследования, представленные в диссертации, были исполнены при выполнении программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») в 2025 году и финансовой поддержке конкурса «Молодой Ученый Самарской области» на тему «Повышение эффективности управления перевозочным процессом за счет использования цифровых сквозных технологий и формирования кадрового потенциала для их обслуживания в условиях цифровизации экономики», в номинации «Аспирант» в 2024 году. Предложенный метод диагностики токопроводящего стыка и его элементов, основанный на анализе входных и выходных электрических параметров рельсовой линии как линии с распределенными параметрами, использован при расширении функциональных возможностей проектируемых систем диагностики устройств железнодорожной автоматики и телемеханики в Желдорпроект Поволжья – филиал АО «Росжелдорпроект».

Теоретические результаты исследований используются в ФГБОУ ВО ПривГУПС в учебном процессе на кафедре «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» при проведении практических и лабораторных занятий по курсам «Рельсовые цепи», «Математическое моделирование систем и процессов» и «Технологии пакетной коммутации».

Методология и методы исследования. В соответствии с паспортом специальности 2.9.4 «Управление процессами перевозок» п. 5 «Теоретические основы, методы и технические средства обеспечения безопасности движения», п. 6 «Системы и устройства автоматики и телемеханики, предназначенные для управления перевозочным процессом, их эксплуатация, методы построения и испытания» и п. 7 «Развитие технических средств и систем управления, цифровизация управления транспортными технологическими процессами» в ходе выполнения диссертационных исследований автором использованы основные положения теории электрических цепей с распределенными

параметрами, математико-статистические методы, теории распознавания образов, матричного исчисления. Расчеты выполнены с использованием математического пакета Python.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные математические модели входных и выходных электрических параметров рельсовых линий на основе распределенно – дискретных схем замещения позволяют формировать априорный алфавит первичных признаков, зависящих от величины сопротивления ТПС и его координаты.

2. Предложенная методика распознавания сопротивления токопроводящих стыков, заключающаяся в формировании адекватных диагностирующих функций с использованием многомерного пространства признаков, решающих правил, представляет возможность определять величину и координату стыка с измененными параметрами.

3. Разработанная архитектура устройства распознавания сопротивления токопроводящих стыков позволяет технически реализовать устройство диагностики сопротивления токопроводящих стыков и определения координаты стыка с повышенным сопротивлением.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируются на использовании фундаментальных положений теории электрических цепей и принципов распознавания образов, а также подтверждаются согласованностью результатов теоретических исследований с данными, опубликованными других авторов, а также результатами, которые получены в ходе выполнения диссертационной работы, а именно, при формировании диагностических функций с помощью обучающей, тестовой и контрольной выборок образов, а также итогами сравнения вычисления сопротивления ТПС диагностической функцией и экспериментальными данными, которые показали погрешность вычисления от 3,1 % до 7,5 %. Результаты исследований получили положительную оценку в рамках международных и всероссийских научно – практических конференциях, в том числе: XVI - XVIII Международной научно–практической конференции «Наука и образование транспорту» (г. Самара, 2024-2025 г.); IX Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Образование – Наука – Производство» (г. Чита, 2025 г.); XIII Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 2024 г.); Международной научно-практической конференции «Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования» (г. Казань, 2025 г.); Международной научно-практической конференции студентов,

аспирантов и молодых учёных «Образование, наука и инновации: современные вызовы» (г. Мелитополь, 2025 г.); Межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов «Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности» (г. Москва, 2025 г.); Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых» (г. Вологда, 2025 г.); VIII Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе» (г. Санкт-Петербург, 2025 г.); IX Международной научно-практической конференции «Наука и образование: достижения и перспективы» (г. Саратов, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 научные работы общим объемом 10,13 п. л. (личный вклад автора – 4,57 п. л.), в том числе: 8 – в ведущих рецензируемых журналах, определенных ВАК Минобрнауки России для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, получен 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства программы ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, имеющего 104 наименования и 8 приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 193 страницы, включая 57 рисунков, 8 таблиц и 38 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, показана её корреляция с ключевыми направлениями «Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» до 2030 года» (Белая книга), сформулированы цель и задачи диссертационной работы, раскрыты элементы научной новизны, теоретической и практической ценности работы, представлены положения, выносимые на защиту, а также приведены данные об апробации результатов и их практическом внедрении.

Глава 1 посвящена анализу статистических данных об отказах токопроводящих стыков (ТПС), исследованию существующих методов их контроля и обоснованию необходимости разработки методики распознавания сопротивления ТПС на основе принципов распознавания образов.

Токопроводящие стыки являются одним из наиболее ответственных элементов рельсовой линии, обеспечивающим пропуск сигнального и тягового тока. Их отказы занимают значительную долю неисправностей. Согласно статистическим данным ОАО «РЖД», за 2024 год дефекты рельсов и стыков достигают 60 %, на ТПС приходится 22 % (рис. 1).

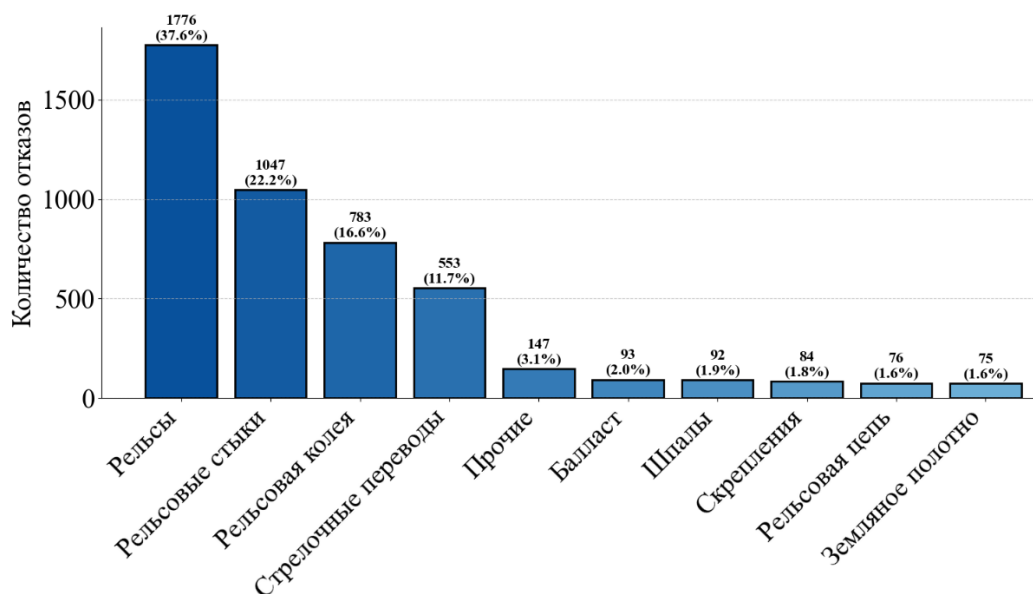


Рисунок 1 – Отказы железнодорожного пути за 2020 – 2024 гг.

Анализ категории отказов (рис. 2) свидетельствует о росте деградационной составляющей, которая к 2024 году превысила 55 % от общего числа неисправностей.

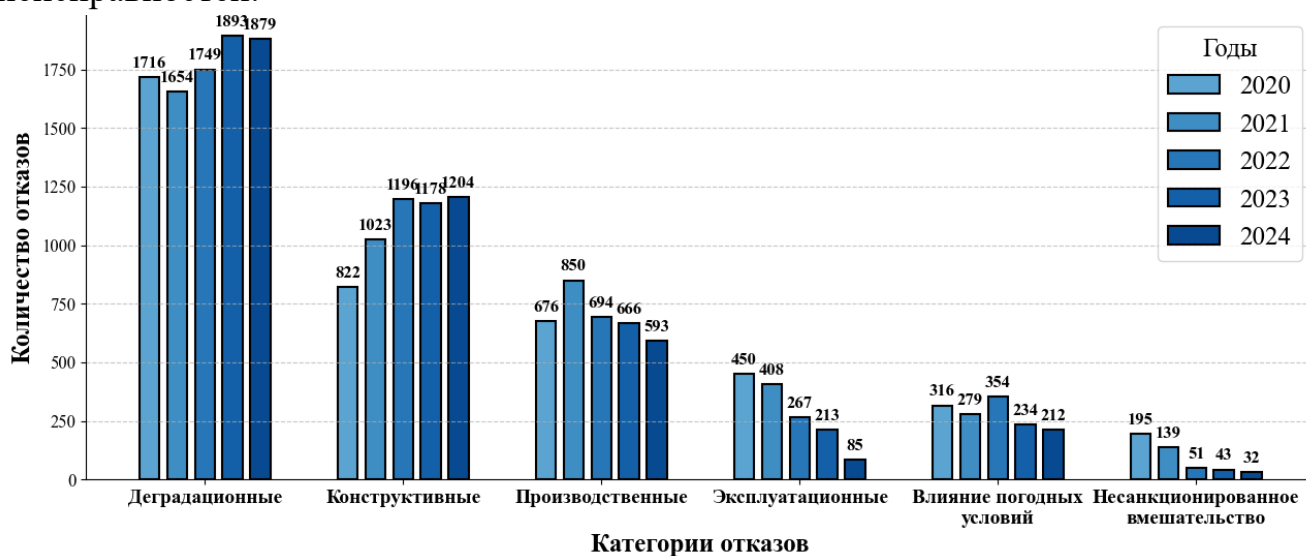


Рисунок 2 – Категории отказов ЖАТ по видам за 2020 – 2024 гг.

Основные причины отказов рельсовых цепей – повреждение стыковых соединителей (40 %) и нарушение их контакта (18 %). Применяемый планово-предупредительный метод обслуживания не позволяет своевременно выявлять предотказные состояния ТПС, а существующие способы ручного контроля (визуальный осмотр, простукивание, измерение активного сопротивления) трудоёмки и не могут быть интегрированы в автоматизированные системы диагностики.

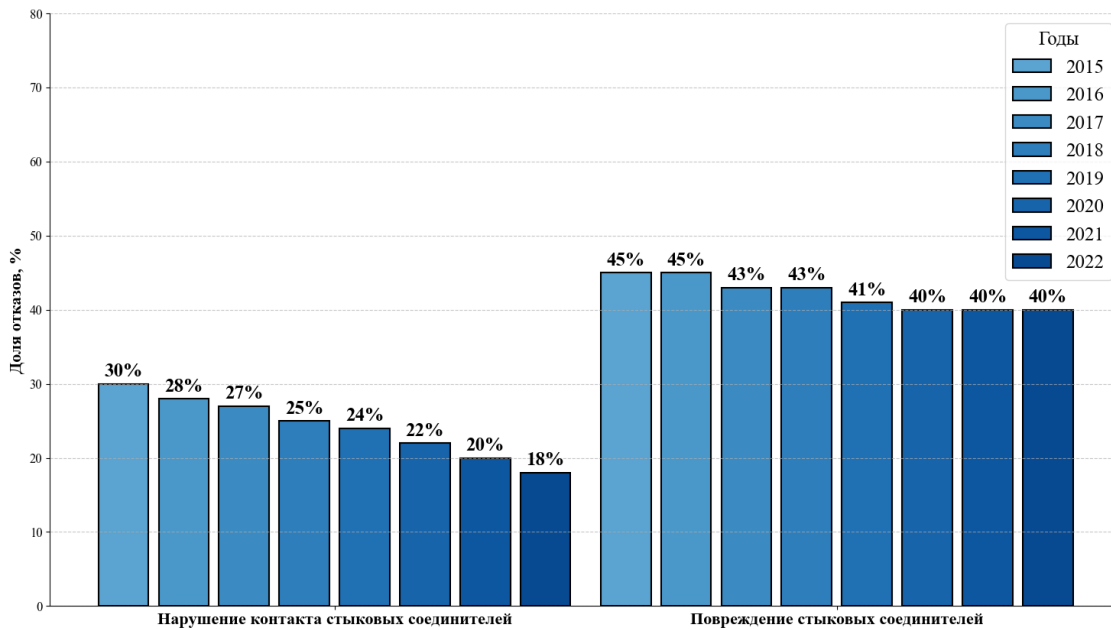


Рисунок 3 – Причины отказов рельсовой цепи за восьмилетний период

Существующие системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) обладают недостаточной глубиной контроля, низкой отказоустойчивостью каналов передачи и требуют ручной обработки информации. Фиксируемые графики выходного напряжения на экране СТДМ (рис. 4, 5) не отражают вклад отдельного стыка в продольное сопротивление рельсовой линии, что затрудняет своевременное выявление предотказных состояний ТПС.

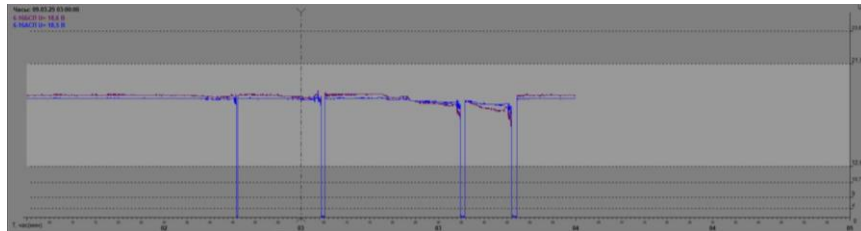


Рисунок 4 – График нормальной работы рельсовой цепи в шунтовом режиме

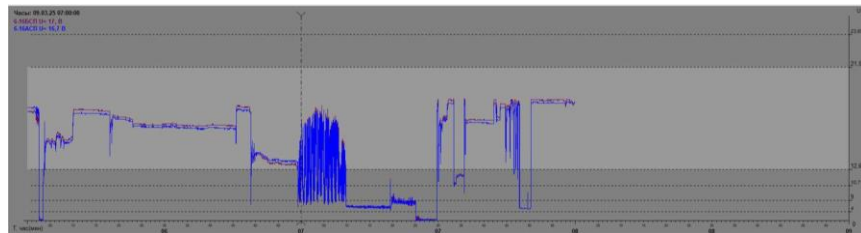


Рисунок 5 – График изменения напряжения при отказе рельсовой цепи

В связи с этим, в работе сформулированы принципы (системности, многообразия, декомпозиции, итеративности) и задачи разработки методики контроля сопротивления ТПС, основанной на принципах распознавания образов. Предложенная структура единого комплекса оценивания сопротивлений ТПС позволяет перейти от дискретных ручных измерений к непрерывному автоматизированному мониторингу с определением величины и координаты стыка с повышенным сопротивлением.

Глава 2 посвящена разработке математических моделей входных и выходных электрических параметров рельсовой линии с распределенными параметрами, являющихся первичными информативными параметрами проектируемой системы распознавания величины сопротивления и координаты ТПС. Для описания процессов утечки тока разработана расчетная схема (рис.6).

В результате представления путей утечки тока в виде, отраженном на рис. 6, получены уравнения, описывающие составляющие сопротивления утечки.

$$r_n = 0,142 \cdot 10^{-3} \rho_u + 0,128 \cdot 10^{-3} \rho_o + \frac{10^{-3}}{1,5 + 5,8 / H_n} \rho_n + 2,2 \cdot 10^{-3} \rho \quad (1)$$

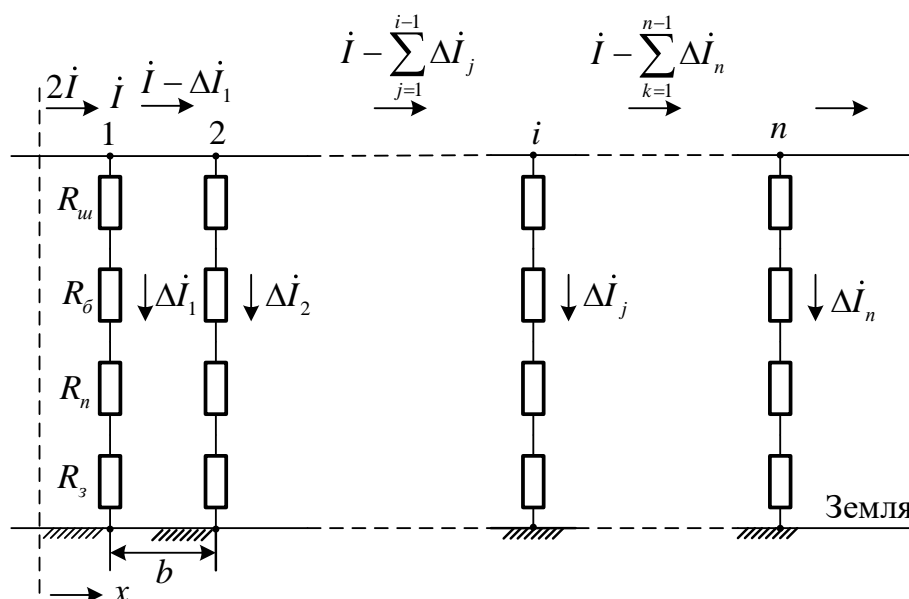


Рисунок 6 – Расчётная схема утечки тока с рельсов в землю

Выражение (1) применяется при составлении дифференциальных уравнений линии с распределенными параметрами. Для получения математической модели входных и выходных электрических параметров рельсовой линии, последняя представлена в виде дифференциальных уравнений линии с распределенными параметрами, характеризующие изменения напряжения и тока в любой координате однородной линии:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_2 \operatorname{ch} \gamma l - I_2 Z_e \operatorname{sh} \gamma l \\ I_1 &= \frac{1}{Z_e} U_2 \operatorname{sh} \gamma l - I_2 \operatorname{ch} \gamma l \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Формируя информационный базис первичных признаков для распознавания состояний стыков, с целью выявления составляющих сопротивления единичного стыка на общее сопротивление рельсовой линии блок – участка на перегоне или приема – отправочных путей на станции предложена каскадная схема замещения рельсовой линии (рис. 7).

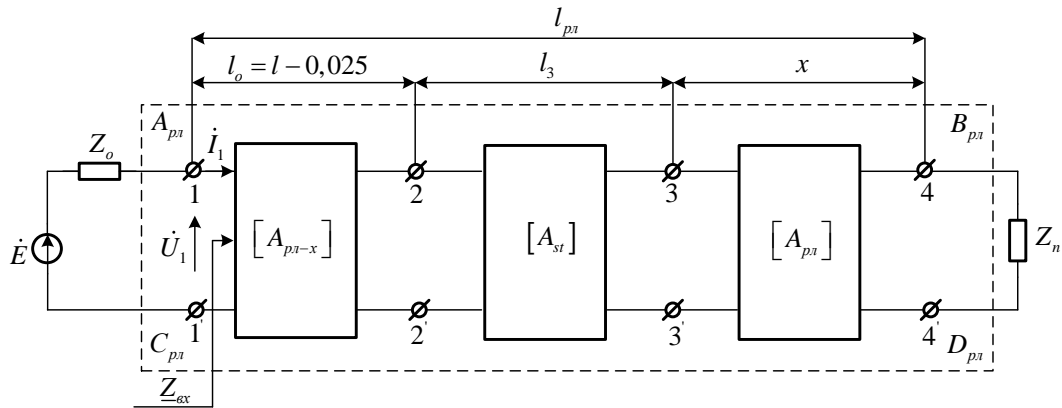


Рисунок 7 – Каскадная схема замещения РЛ с выделением из схемы ТПС
Она представлена как последовательное соединение четырёхполюсников однородных участков рельсовых плетей длиной 25 м и четырёхполюсников токопроводящих стыков $[A_{st}]$ с сосредоточенными параметрами.

С использованием математического пакета Python проведены машинные исследования изменений электрических входных и выходных параметров рельсовой линии, являющихся первичными признаками распознавания и позволяющие сравнивать два подхода к представлению рельсовой линии в виде распределенно – дискретной схемы и равномерным распределением рельсовой линии к моделированию: представление всей линии одним однородным четырёхполюсником длиной 2,5 км и предложенное каскадное соединение из 200 элементарных звеньев. Графики изменения модулей и фаз напряжений и тока на частоте 50 Гц представлены на рис. 8 а–г.

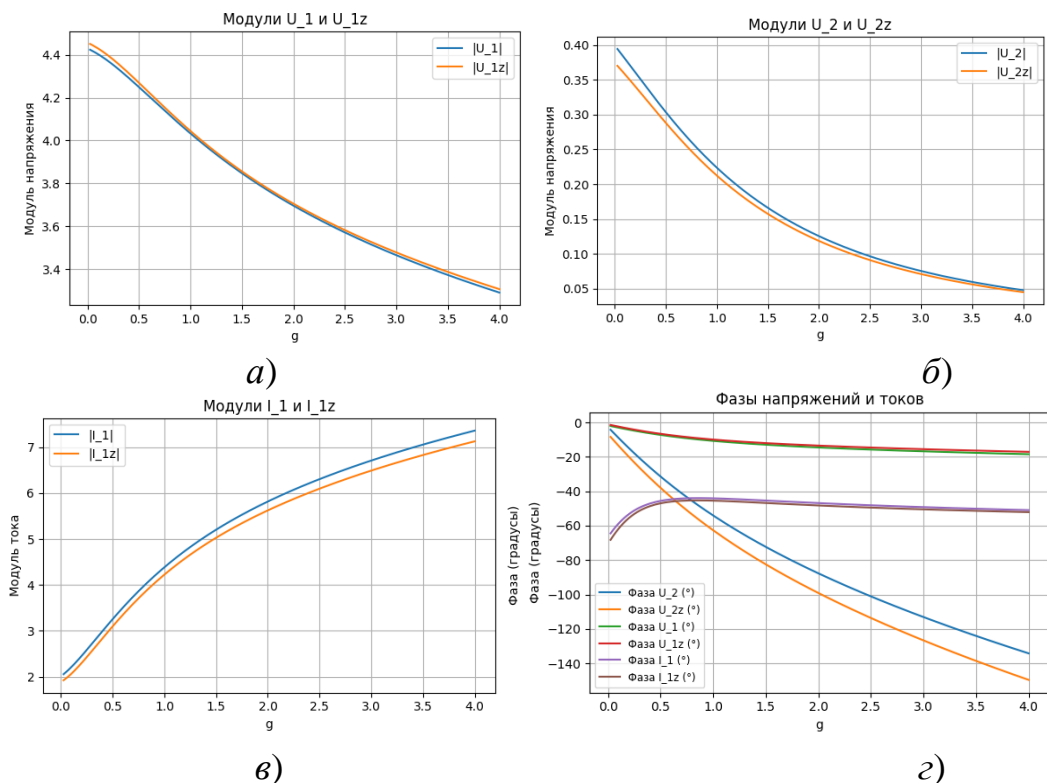


Рисунок 8 – Результаты машинного исследования изменения модулей и фаз напряжения и тока на входе и выходе РЛ на частоте 50 Гц

Анализ погрешностей показал, что замена дискретно-распределенной структуры полностью однородной линией приводит к относительным погрешностям: по модулю напряжения на выходе – 6,149 %, по фазе напряжения на выходе – 97,58 %, по модулю тока на входе – 6,59 %, что подтверждает необходимость применения разработанной каскадной модели для обеспечения требуемой точности при синтезе устройств распознавания.

Глава 3 посвящена разработке принципа распознавания сопротивления токопроводящих стыков на основе теории распознавания образов.

Для построения системы непрерывной диагностики ТПС сформулирован алгоритм функциональной диагностики, включающий формирование априорного множества первичных признаков, синтез ДФ и разработку решающих правил. Обобщенная схема методики распознавания представлена на рис. 9.



Рисунок 9 – Обобщенная схема методики распознавания сопротивления ТПС

Для определения величины сопротивления и координаты ТПС предложено использовать множество диагностических функций. Решающее правило (3) реализует отображение образа, сформированного из измеряемых параметров, в класс сопротивлений.

$$R_{stx} = \begin{cases} r_0, & \text{if } d(x_i) \in X_{ij;0}, \\ r_1, & \text{if } d(x_i) \in X_{ij;1}, \\ \dots & \dots \\ r_m, & \text{if } d(x_i) \in X_{ij;m}. \end{cases} \quad (3)$$

где r_0, r_1, \dots, r_m – текущие сопротивления в координатах токопроводящих рельсовых стыков, $X_{ij;0}, X_{ij;1}, X_{ij;m}$ – соответствующие им образы, составленные из множества электрических параметров рельсовых цепей.

Диагностическая функция выбрана в виде полинома (4), коэффициенты которого определяются методом наименьших квадратов по обучающей выборке.

$$R_{st}(X) = C_1 f_1(X) + C_2 f_2(X) + \dots + C_k f_k(X) + C_{n+1} = \sum_{i=j}^{n+1} C_i f_i(X) \quad (4)$$

где $\{f_i(X)\}, i = 1, 2, \dots, n$ – элементарные функции образа (X);

$f_{n+1}(X) = 1$, а $n + 1$ – число членов ДФ.

Для машинного анализа возможности ДФ в виде (5) составлена программа с использованием пакета Python, исследования показали, что применение

единственной ДФ не позволяет одновременно с допустимой погрешностью определять и сопротивление, и координату стыка (рис. 10).

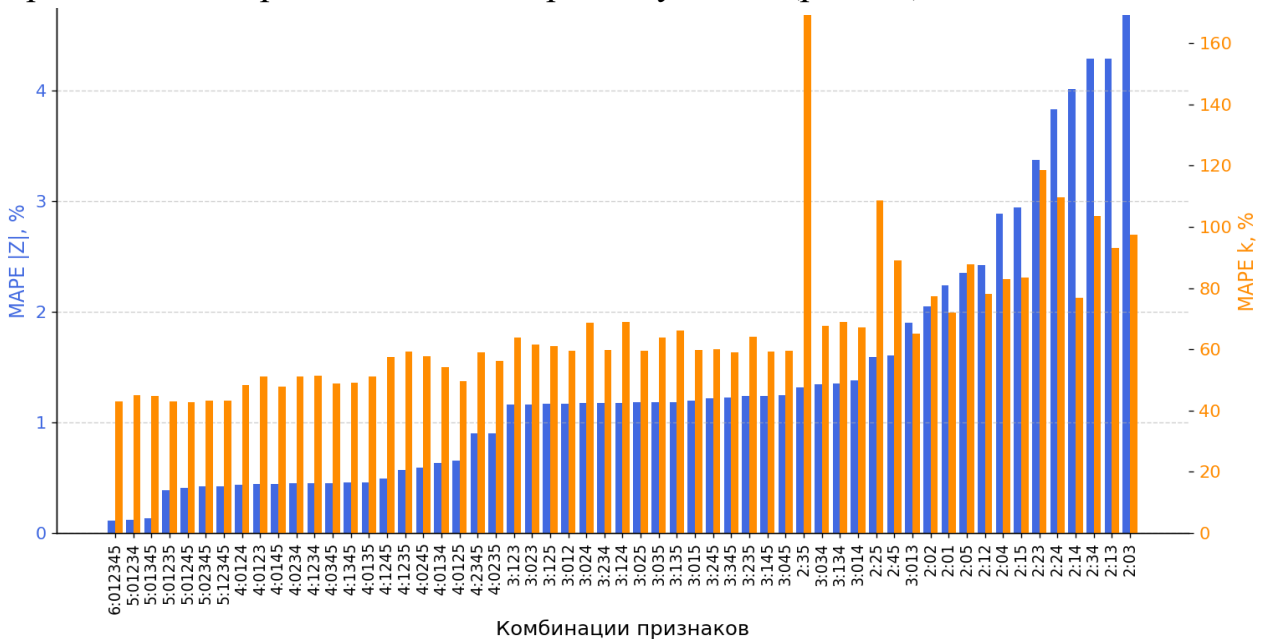


Рисунок 10 – MAPE оценка определения координаты и величины сопротивления ТПС ДФ $d(r_{st}, l_{st}) = f(x_i, x_j, x_k, x_n, x_m, x_p)$

Для решения этой проблемы предложена двухуровневая классификация: весь диапазон сопротивлений разделён на нижний (до 0,1 Ом) и верхний (0,1–2 Ом) классы, внутри каждого сформированы подклассы (15 и 5) для уточнения координаты. Фрагмент алгоритма классификации приведен на рис. 11.

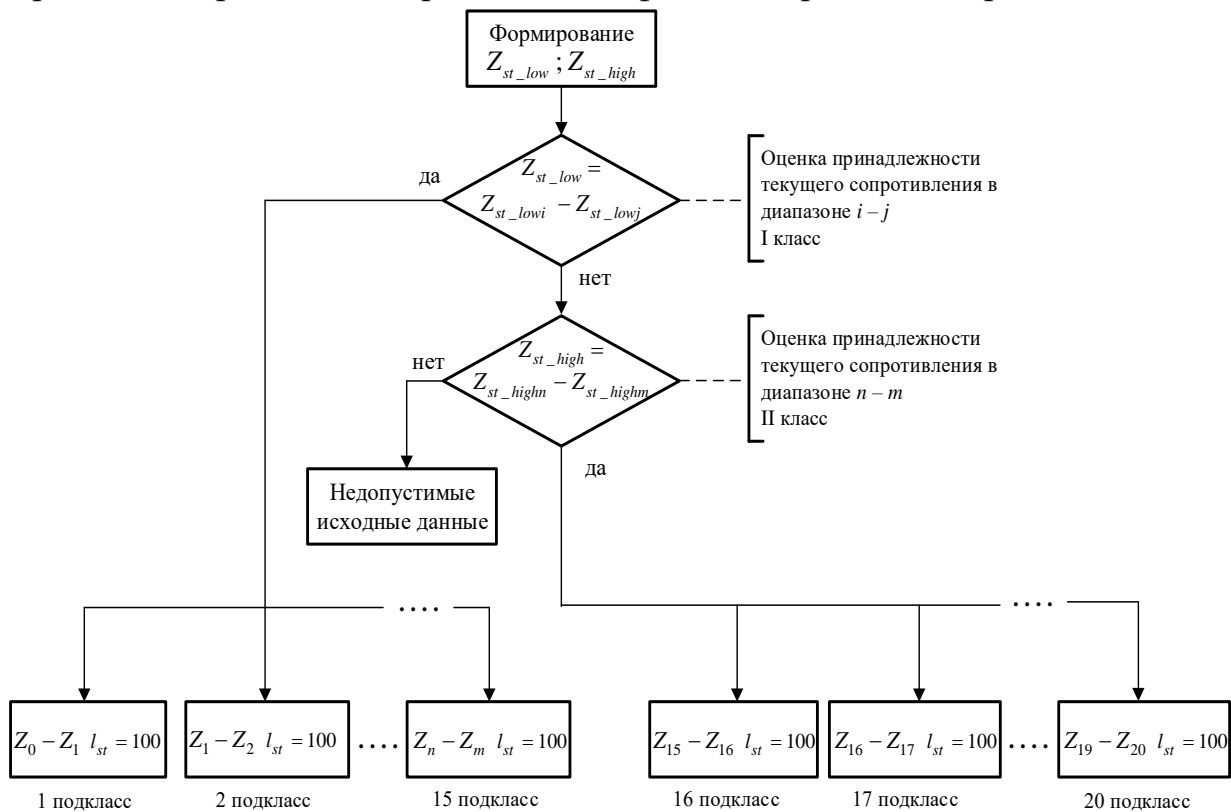


Рисунок 11 – Фрагмент алгоритма классификации сопротивлений ТПС

Согласно алгоритму классификации при построении диагностических моделей сопротивления ТПС, на первом этапе формируется 2 класса сопротивлений:

1. Нижний класс $Z_{st_lowi} - Z_{st_lowj}$;
2. Верхний класс $Z_{st_highn} - Z_{st_highm}$.

В результате получены диагностические функции для нижнего класса

$$d(Z_{low}) = 27064,716 - 7803,729U_1 - 22727,513I_1 - 37,831U_1^2 + 7791,812U_1I_1 + 2635,535I_1^2 + 102,001U_1^3 - 646,066U_1^2I_1 - 499,237U_1I_1^2 - 67,213I_1^3,$$

с (МАРЕ 0,47 % по сопротивлению и 3,50 % по координате) и диагностические функции верхнего класса

$$d(Z_{high}) = -109487,68 + 62959,07U_1 + 22606,96I_1 - 12079,79U_1^2 - 8613,08U_1I_1 - 1623,2I_1^2 + 773,41U_1^3 + 820,7U_1^2I_1 + 308,4U_1I_1^2 + 39,6I_1^3$$

с (МАРЕ 2,46 % и 3,01 % соответственно), которые представлены рис. 12 (а-г).

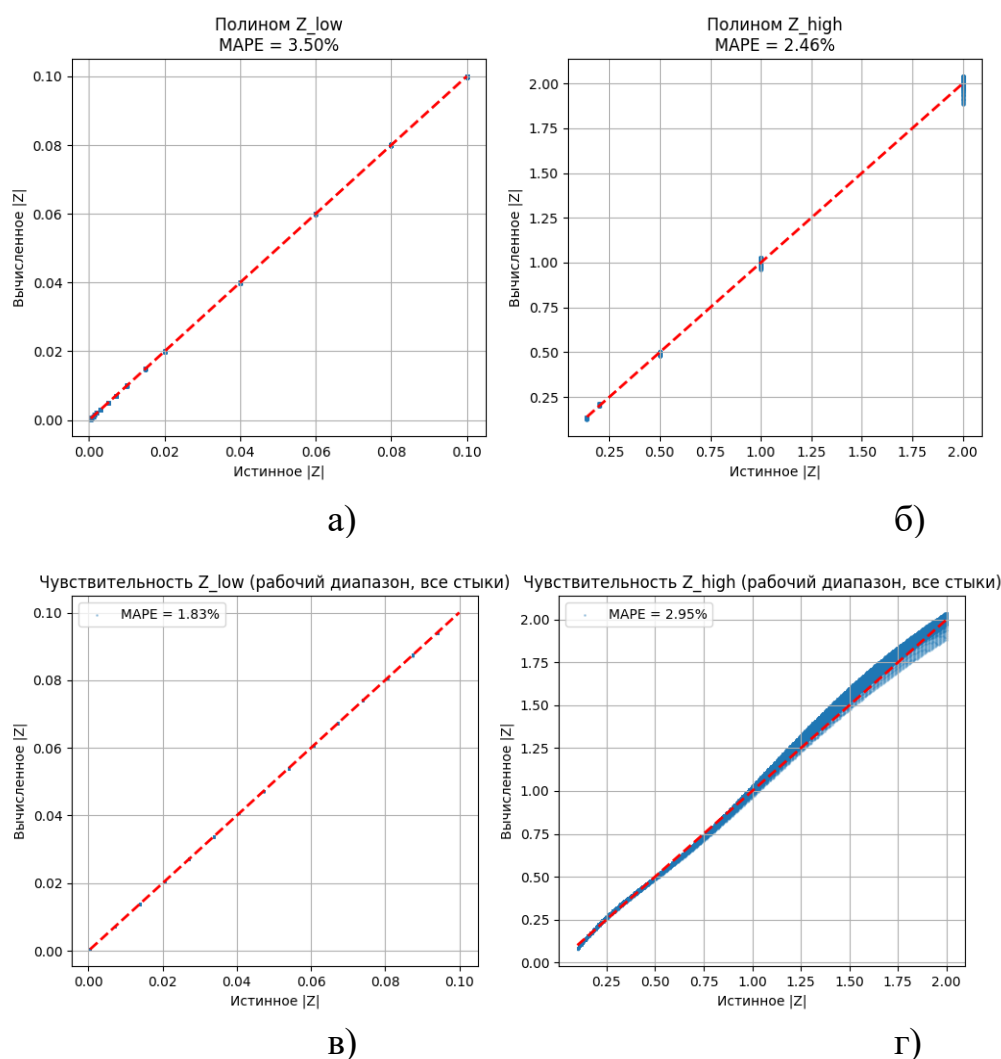


Рисунок 12 – Результаты исследования распознавания модуля сопротивления ТПС и координат по входным параметрам рельсовой линии – напряжению и току

Структурная схема устройства распознавания сопротивления ТПС (рис. 13) включает измерительные каналы на базе датчиков тока и напряжения, микропроцессорный модуль с обученным классификатором и блок решающих правил, что позволяет технически реализовать предложенную методику.

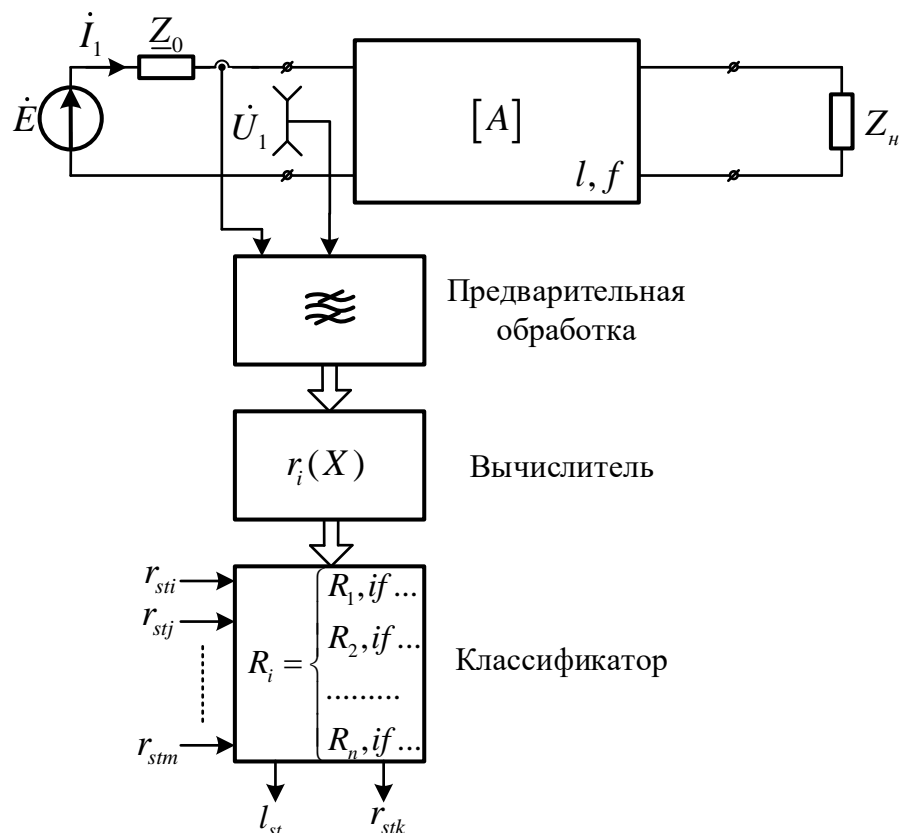


Рисунок 13 – Структурная схема устройства распознавания сопротивлений ТПС

В главе 4 представлена архитектура устройства распознавания сопротивления токопроводящих стыков, реализующая разработанную методику контроля. При технической реализации диагностические функции, полученные в главе 3, необходимо записать в постоянном запоминающем устройстве микропроцессорного модуля.

Архитектура устройства (рис. 14) включает датчики тока и напряжения на базе модулей ЛЕМ, измерительные преобразователи, микропроцессорный модуль с диагностическими функциями с блоком решающих правил.

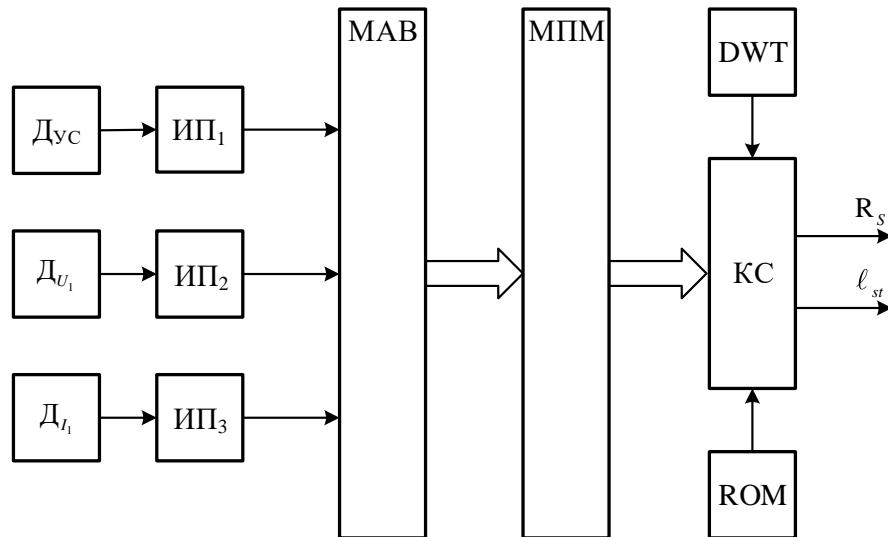


Рисунок 14 – Архитектура устройства распознавания сопротивления ТПС

Для резервирования передачи диагностических данных и сохранения работоспособности схемы при отказе основного канала передачи информации разработана кольцевая схема передачи диагностической информации, которая, в отличие от линейных схем передачи информации, осуществляет кольцевую синхронную передачу между маршрутизаторами (рис. 15).

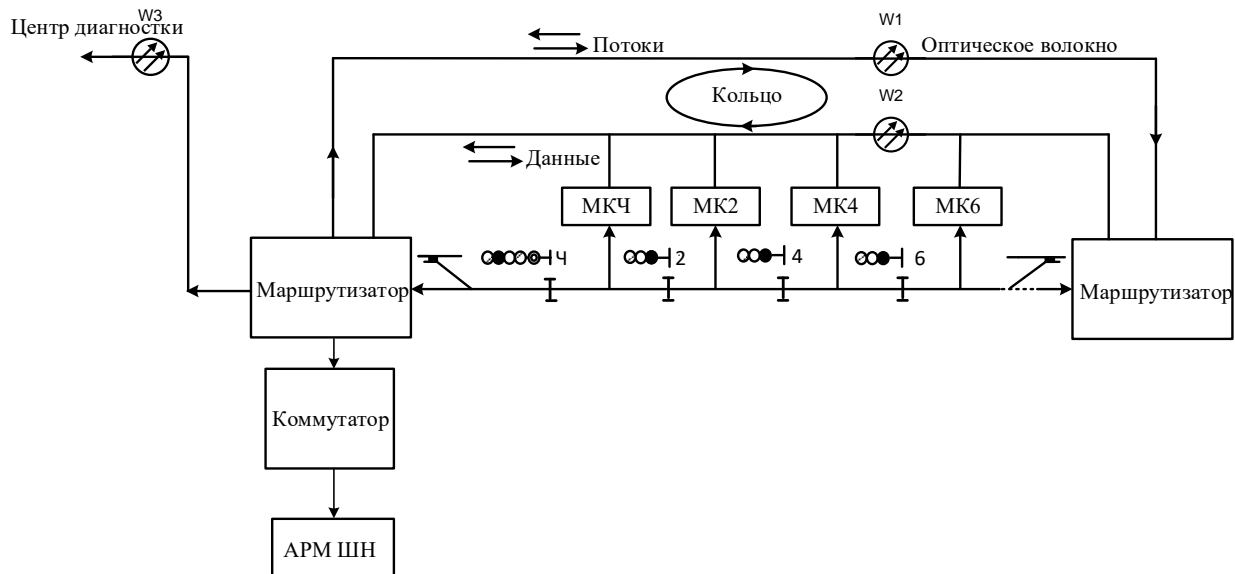


Рисунок 15 – Кольцевая схема передачи диагностической информации между станциями

В кольцевой сети пакеты данных, снимаемых с сигнальных точек Ч, 2, 4, 6, независимо инкапсулируются, т.е. при разбиении информационного сообщения на части к каждой из частей добавляются служебные заголовки в виде метаданных на каждом уровне модели OSI и продолжают движение от источника – сигнальной точки к маршрутизатору по ВОК.

Формирование обобщенной диагностической функции выполнено с использованием множества полиномов, разделенных на два диапазона сопротивлений ТПС – низкий и высокий. Для каждого диапазона синтезированы

диагностические функции (полиномы), а для определения координаты дефектного стыка – 20 диагностических функций. Результаты распознавания сопротивления и координаты стыка представлены на рис. 16 и рис. 17.

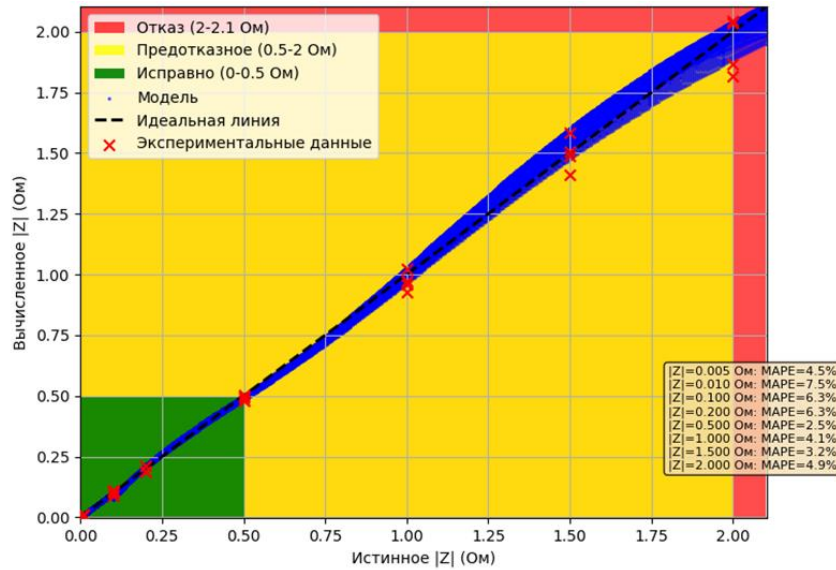


Рисунок 16 – Графическое отображение распознавания сопротивлений ТПС

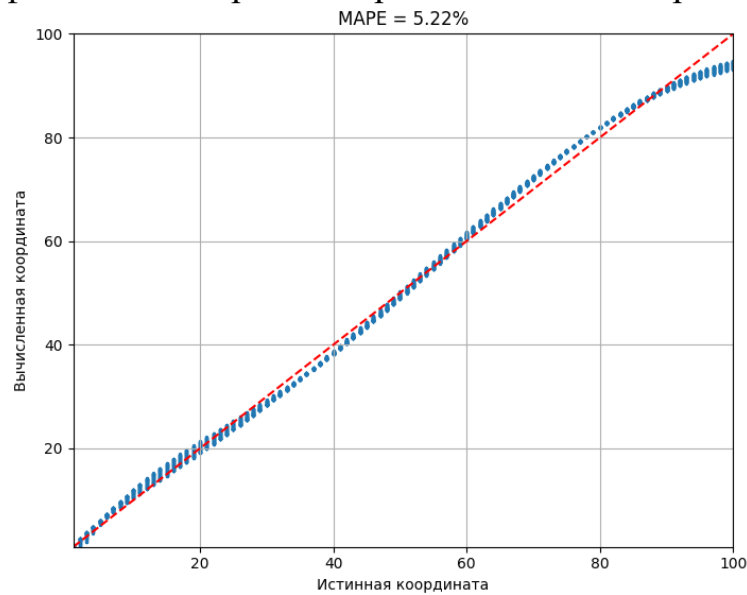


Рисунок 17 – Графическая иллюстрация результата распознавания координаты ТПС с повышенным сопротивлением

Средняя абсолютная процентная ошибка MAPE для оценки величины сопротивления стыка не превышает 1,4 %, а для определения координаты – 5,22 %, что подтверждает достаточную точность предложенной архитектуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные теоретические и практические результаты, полученные в ходе выполнения диссертационных исследований, заключаются в следующем:

1. В результате проведенного анализа отказов рельсовых цепей установлено, что количество отказов по причине повреждения стыковых

соединителей составляет 40 %, а по причине отсутствия контактов – 18 %, и используемые в настоящее время организационные и технические мероприятия проблему не решают.

2. Предложены обобщенные математические модели рельсовых линий в виде распределенно – дискретных схем замещения рельсовых линий с каскадным соединением четырехполюсников рельсовых линий с распределенными параметрами и стыков с сосредоточенными параметрами, позволяющие оценивать вклад сопротивлений ТПС в полное продольное сопротивление рельсовых линий и составить модели, наиболее точно описывающие процессы изменения входных и выходных параметров рельсовых линий. Сравнительный анализ показал, что классическая однородная модель дает относительную погрешность по модулю выходного напряжения 6,15 %, по фазе выходного напряжения – 97,58 %, по модулю входного тока – 6,59 %.

3. Предложены математические модели исследования информативности первичных признаков с использованием коэффициентов чувствительности, которые позволили сформулировать условия и ранжировать информативные признаки. Выявлено, что наиболее приемлемы для диагностики ТПС модули напряжения и тока на входе рельсовой линии.

4. Сформирована архитектура системы диагностики ТПС, базирующаяся на теоретических положениях, представленных во второй и третьей главах. Её функционирование основано на использовании множества диагностических функций, где две из них предназначены для распознавания величины повышенного сопротивления стыка, а остальные двадцать необходимы для локализации его места неисправности. Такое решение обеспечивает высокую достоверность процесса классификации, при котором средняя абсолютная процентная ошибка $MARE$ для оценки величины сопротивления стыка не превышает 1,4 %, а для определения координаты повреждения не более 5,22 %.

5. Разработана структурно – функциональная схема технической диагностики ТПС, объединяющая каналы передачи информации, датчики, блок диагностических функций, блок решающих правил на основе последовательного анализа Вальда, которая позволяет реализовать спроектированную методику автоматизированной диагностики сопротивлений ТПС.

6. Представлена и обоснована целесообразность применения архитектуры кольцевой топологии для передачи диагностических данных по волоконно – оптическим линиям связи. В отличие от линейной топологии, кольцевая архитектура предоставляет резервирование путей передачи данных. Благодаря этому, система мониторинга остается работоспособной при единичных отказах кабелей или оборудования, что существенно повышает ее надежность и отказоустойчивость при диагностике.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:**а) в изданиях, входящих в перечень ВАК**

1. Железнов, Д.В. Модель жизненного цикла компонент рельсовой линии / Д. В. Железнов, Г. М. Третьяков, В. А. Надежкин, С. А. Надежкина // Транспортное дело России. – 2025. – № 8. – С. 266-268. – EDN YWSULY. **(К2)**
2. Надежкин, В.А. Необходимость автоматизированного мониторинга компонент рельсовой линии / В. А. Надежкин, С. А. Надежкина // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 6(114). – С. 146-150. – EDN VABPZW. **(К3)**
3. Тарасов, Е.М. Анализ чувствительности первичных параметров рельсовой цепи к изменению проводимости изоляции / Е. М. Тарасов, В. А. Надежкин, С. А. Надежкина // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2025. – № 4(45). – С. 113-118. – DOI 10.31079/2415-8658-2025-4-113-118. – EDN DJBXJK. **(К3)**
4. Надежкин, В.А. Функциональный контроль элементов железнодорожной автоматики и телемеханики / В. А. Надежкин, И. С. Бредун, С. А. Надежкина // Транспортное дело России. – 2025. – № 5. – С. 232-234. – EDN LNVFWW. **(К2)**
5. Тарасов, Е.М. Методология диагностики технического состояния рельсовых линий / Е. М. Тарасов, П. Ф. Бестемьянов, В. А. Надежкин, С. А. Надежкина // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 3(111). – С. 161-166. – EDN QNMXNY. **(К3)**
6. Надежкин, В. А. Измерительный канал связи для организации передачи расширенных диагностических данных в системах железнодорожной автоматики и телемеханики / В. А. Надежкин, С. А. Надежкина, Е. В. Тришина // Вестник транспорта Поволжья. – 2024. – № 6(108). – С. 83-89. – EDN SEAXDD. **(К3)**
7. Надежкин, В.А. О возможности применения технологий искусственного интеллекта для определения и прогнозирования технического состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / В. А. Надежкин, С. А. Надежкина, А. Р. Мусин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 2. – С. 484-491. – EDN XONKFC. **(К2)**
8. Надежкин, В.А. Оптимизация распознавания состояния рельсовых линий через анализ информативных признаков / В. А. Надежкин, С. А. Надежкина // Транспортное дело России. – 2025. – № 2. – С. 178-180. – EDN OAAVGE. **(К2)**

б) в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

9. Tarasov, E. Formation of a feature system and analysis of their informativeness / E. Tarasov, S. Nadezhkina // Proceedings of the IV international conference on advances in materials, Earth science, and technology: CAMSTech-IV 2024, Bukhara Engineering Technological Institute, 29–31 октября 2024 года. – Bukhara, Uzbekistan, 2026. – P. 060022. – DOI 10.1063/5.0322303. – EDN AVWHSR.
10. Tarasov, E. Classification of rail line conditions using pattern recognition principles / E. Tarasov, S. Nadezhkina, I. Bredun // Proceedings of the IV international conference on advances in materials, Earth science, and technology: CAMSTech-IV 2024, Bukhara Engineering Technological Institute, 29–31 октября 2024 года. – Bukhara, Uzbekistan, 2026. – P. 050018. – DOI 10.1063/5.0322300. – EDN IEYESQ.
11. Tarasov, E. Concept of a cyber-physical system for technical diagnostics and monitoring of railway automation and telemechanics devices / E. Tarasov, A. Tarasova, I. Bredun, S. Nadezhkina // Proc. SPIE 13803, Optical and Computational Technologies for Measurements and Industrial Applications (OptiComp 2025), 138030F (22 September 2025); <https://doi.org/10.1117/12.3076867>.

в) в других изданиях

12. Надежкина, С.А. Функциональная диагностика отказов токопроводящих стыков / С. А. Надежкина // Образование, наука и инновации: современные вызовы: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных : в 2 ч., Мелитополь, 12–13 декабря 2024 года. – Мелитополь: Мелитопольский государственный университет, 2025. – С. 271-274. – EDN ELZKIJ.

13. Надежкина, С.А. Методика контроля состояния компонент рельсовой линии / С. А. Надежкина // Энергетика и автоматизация в современном обществе : Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей, Санкт-Петербург, 15 мая 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2025. – С. 21-25. – EDN PAZUOU.

14. Надежкин, В.А. Оценка влияния на восстанавливаемость устройств ЖАТ использования систем технического диагностирования и мониторинга / В. А. Надежкин, С. А. Надежкина, А. Р. Мусин // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования : Материалы международной научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 444-448. – EDN YSLRWI.

15. Тарасов, Е.М. Разработка модели рельсовой линии с распределенными параметрами / Е. М. Тарасов, С. А. Надежкина // Наука и образование транспорту. – 2025. – № 1. – С. 303-306. – EDN RKSETP.

16. Надежкин, В. А. К вопросу автоматизации технической диагностики и мониторинга / В. А. Надежкин, С. А. Надежкина, П. А. Данилина // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности : материалы межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов, Санкт-Петербург, 20–21 февраля 2025 года. – Москва: Издательско-торговая корпорация "Дашков и К", 2025. – С. 193-195. – EDN ARCJFG.

17. Данилина, П.А. Необходимость разработки методики контроля состояния токопроводящего стыка / П. А. Данилина, С. А. Надежкина // XVIII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием), Вологда, 25–29 ноября 2024 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2025. – С. 815-817. – EDN ALFDOJ.

18. Надежкина, С.А. Формирование методики распознавания состояний рельсовых линий / С. А. Надежкина // Наука и образование: достижения и перспективы : Материалы IX Международной научно-практической конференции, Саратов, 19 декабря 2024 года. – Самара - Саратов: ООО "Амирит", Приволжский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 114-116. – EDN ESVAAO.

19. Тарасов, Е.М. Причины отказов токопроводящих стыков на магистральном железнодорожном транспорте / Е. М. Тарасов, С. А. Надежкина, Е. Г. Моисеев // Наука и образование транспорту. – 2024. – № 1. – С. 206-209. – EDN KXBYST.

в) патенты, свидетельства об официальной регистрации программ ЭВМ

20. Патент на полезную модель № 231143 U1 Российская Федерация, МПК В61L 23/00. Устройство контроля и диагностики параметров аппаратуры рельсовой цепи : заявл. 30.08.2024 : опубл. 13.01.2025 / И. С. Бредун, Е. М. Тарасов, А. Е. Тарасова [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Приволжский государственный университет путей сообщения",. – EDN IONJQL.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663943 Российская Федерация. Программа моделирования линейной электрической цепи постоянного тока с применением законов Кирхгофа : № 2024662247 : заявл. 31.05.2024 : опубл. 14.06.2024 / А. Е. Тарасова, В. А. Надежкин, С. А. Надежкина, Д. А. Илиади ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения». – EDN ASVAXJ.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662247 Российская Федерация. Программа определения неисправного токопроводящего стыка и его координаты: заявл. 19.03.2026 : опубл. 31.03.2026 / С. А. Надежкина, Е. М. Тарасов, И. С. Бредун, В. А. Надежкин, А. Е. Тарасова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Приволжский государственный университет путей сообщения".

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Личный вклад автора в научных работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1,12,17,19] – на основе проведенного анализа статистических данных отказов токопроводящих стыков предложены решения по снижению отказов, обосновано применение методов непрерывного диагностирования для токопроводящих стыков; разработана модель жизненного цикла компонент рельсовой линии; [2] – разработана алгоритмическая модель для имитационного моделирования рельсовой линии, позволяющая локализовать конкретный неисправный стык; [3, 8, 9] – предложена методика оценки параметрической чувствительности, проведена селекция и ранжирование первичных признаков, разработана система признаков для диагностики; [4, 20] – разработана структурная схема функциональной диагностики токопроводящих стыков и устройства контроля и диагностики параметров аппаратуры рельсовой цепи; [5, 7, 10, 13, 16, 18] – предложены методология, принципы и этапы формирования методики распознавания состояний рельсовых линий и классификации сопротивлений токопроводящих стыков с использованием методов машинного обучения; [6, 11, 14] – разработана архитектура системы диагностики с использованием кольцевой топологии передачи данных и обоснованы требования к архитектуре для повышения надежности; [15, 22] – разработана математическая модель рельсовой линии в виде каскадного соединения четырехполюсников с распределенными и сосредоточенными параметрами; [21] – создана программа для ЭВМ, использованная для моделирования электрических параметров рельсовых линий и формирования обучающих выборок.

Надежкина Снежана Андреевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ
ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЫКОВ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ
ПРИНЦИПОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ**

2.9.4. Управление процессами перевозок
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ____ . ____ .2026. Формат 60×90 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. ____ . Тираж 100 экз. Заказ ____ .

Отпечатано в Приволжском государственном университете путей сообщения.
443022, Самара, Заводское шоссе, 18. Тел.: (846) 255-68-36.