

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Приволжский государственный университет путей сообщения»  
(ФГБОУ ВО ПривГУПС)

*На правах рукописи*



**Надежкина Снежана Андреевна**

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

Специальность 2.9.4. Управление процессами перевозок  
(технические науки)

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Тарасов Евгений Михайлович

Самара – 2026

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 5  |
| 1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРИНЦИПОВ ДИАГНОСТИКИ<br>ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЫКОВ .....   | 14 |
| 1.2 Исследование современного состояния контроля сопротивления<br>токопроводящих стыков.....  | 19 |
| 1.3 Современные подходы к диагностированию и мониторингу<br>функционирования ЖАТ.....   | 24 |
| 1.4 Разработка методики контроля сопротивления токопроводящих стыков на<br>основе принципов распознавания образов .....                   | 30 |
| Выводы по первой главе.....   | 34 |
| 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ<br>ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ С<br>РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ..... | 35 |
| 2.1 Характеристика однородной рельсовой линии .....   | 36 |
| 2.2 Первичные параметры однородной рельсовой линии .....  | 39 |
| 2.2.1 Продольное сопротивление рельсовых линий.....   | 39 |
| 2.2.2 Индуктивность и полное продольное сопротивление звеньевой рельсовой<br>линии переменному току.....                                  | 43 |
| 2.2.3 Полная проводимость рельсовой линии.....  | 45 |
| 2.3 Математические модели входных и выходных электрических параметров<br>рельсовой линии.....   | 49 |
| 2.4 Уравнения первичных признаков при четырехполюсной схеме замещения<br>рельсовой линии.....   | 54 |
| Выводы по второй главе.....   | 69 |

|  |     |
|--|-----|
| 3 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ РАСПОЗНАВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЫКОВ .....   | 70  |
| 3.1 Основные принципы восстановления зависимостей – диагностических функций сопротивлений токопроводящих стыков.....           | 72  |
| 3.2 Основные этапы параметрического синтеза диагностической функции.....   | 76  |
| 3.3 Селекция и ранжирование первичных признаков оценкой параметрической чувствительности .....                                 | 85  |
| 3.4 Определение относительного коэффициента чувствительности схемных функций.....  | 86  |
| 3.5 Машинное исследование информативности первичных признаков коэффициентами чувствительности.....                             | 87  |
| 3.6 Разработка алгоритма формирования диагностирующей функции сопротивления ТПС .....  | 94  |
| 3.7 Результаты формирования диагностирующей функции .....  | 101 |
| Выводы по третьей главе.....   | 110 |
| 4 АРХИТЕКТУРА УСТРОЙСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЫКОВ .....   | 112 |
| 4.1 Технические требования к архитектуре.....  | 112 |
| 4.2 Допусковый анализ диагностической функции.....   | 113 |
| 4.3 Структурная схема технической диагностики сопротивления токопроводящих стыков.....   | 117 |
| 4.2 Компоненты архитектуры устройства распознавания ТПС .....  | 119 |
| 4.3 Формирование пакетов данных от сигнальной точки до центра диагностики путем инкапсуляции и деинкапсуляции информации ..... | 131 |
| 4.4 Формирование обобщенной диагностической функции сопротивления и координаты токопроводящих стыков .....                     | 136 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| Выводы по четвертой главе ..... | 141 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....          | 144 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....              | 156 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....               | 161 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В .....              | 175 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....              | 180 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....              | 187 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....               | 188 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....               | 189 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ З .....              | 190 |

## ВВЕДЕНИЕ

**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) [1].

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» [1].

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. Ефанов, Б.Д. Перникис, Н.Н. Лябаха, А.Е. Тарасова, Р.Ш. Ягудина, 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 РНМЛ-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.

# 1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРИНЦИПОВ ДИАГНОСТИКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЫКОВ

## 1.1 Анализ статистических данных об отказах рельсовых цепей, связанных с изменением сопротивления рельсовых линий

Обеспечение высокого уровня надежности и безопасности перевозочного процесса является приоритетной задачей холдинга «РЖД» [1-2]. Реализация этого неразрывно связана с необходимостью повышения уровня эксплуатационной устойчивости технических средств инфраструктуры, в частности объектов железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), являющихся одним из важнейших элементов систем интервального управления движением поездов, от исправной и бесперебойной работы которых зависит стабильность графика движения поездов, поддержание необходимого показателя пропускной способности железнодорожных линий [3-6]. Наиболее уязвимыми считаются напольные устройства ЖАТ, поскольку они находятся в постоянной эксплуатации в условиях действия интенсивных электромагнитных, механических и климатических воздействий. Среди них основными элементами, выполняющие функцию первичных датчиков контроля состояния железнодорожного участка и обеспечивающие непосредственный сбор информационных данных о состоянии рельсовой линии, являются электрические рельсовые цепи [7-9].

Статистический анализ отказов устройств ЖАТ, проведенный по данным хозяйства автоматики и телемеханики за 2024 год и отраженный на рис.1.1, доказывает, что главными причинами отказов 1 категории является монтаж статов и релейных шкафов, на которые приходится 501 случай, устройства защиты – 433 случая, кабельные линии – 310 случаев, рельсовые линии – 215 обстоятельств. Зарегистрированные неисправности свидетельствуют о необходимости совершенствования методов контроля этих компонентов железнодорожной инфраструктуры.

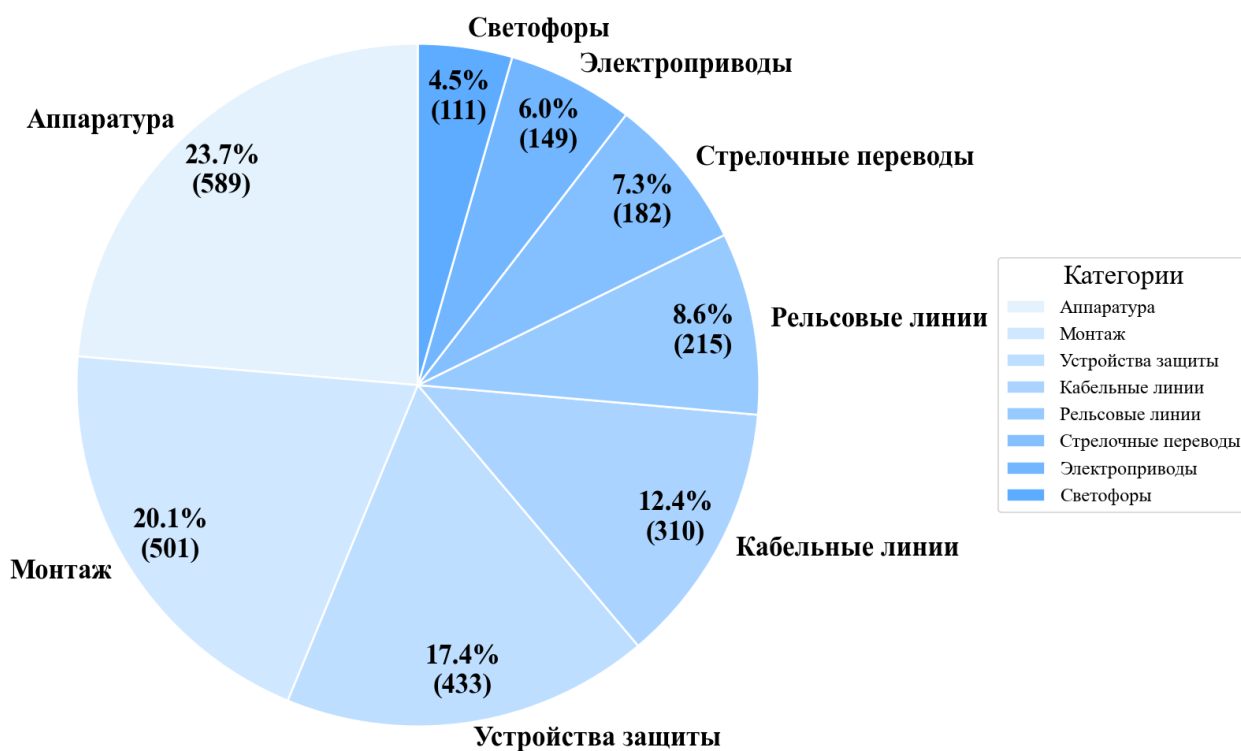


Рисунок 1.1 – Распределение отказов устройств СЦБ по 1 классу железнодорожных линий по элементам за 2024 г.

При исследовании структуры распределения отказов 1-й и 2-й категории более детально (рис. 1.2), фокусируясь на сбоях в работе рельсовой линии, выявлено, что значительная доля неисправностей возникает по причине дефектов в рельсовых стыках, занимающие второе место по неисправностям – 22 %.

Таким образом, больший процент отказов, в частности 60 % всех неисправностей железнодорожного пути, приходится на рельсы и рельсовые стыки в совокупности, что свидетельствует о необходимости формирования подходов к непрерывному мониторингу и диагностики для своевременного выявления предотказных состояний объектов и, соответственно, предотвращения неисправностей, приводящих к продолжительным простоям и задержкам поездов.

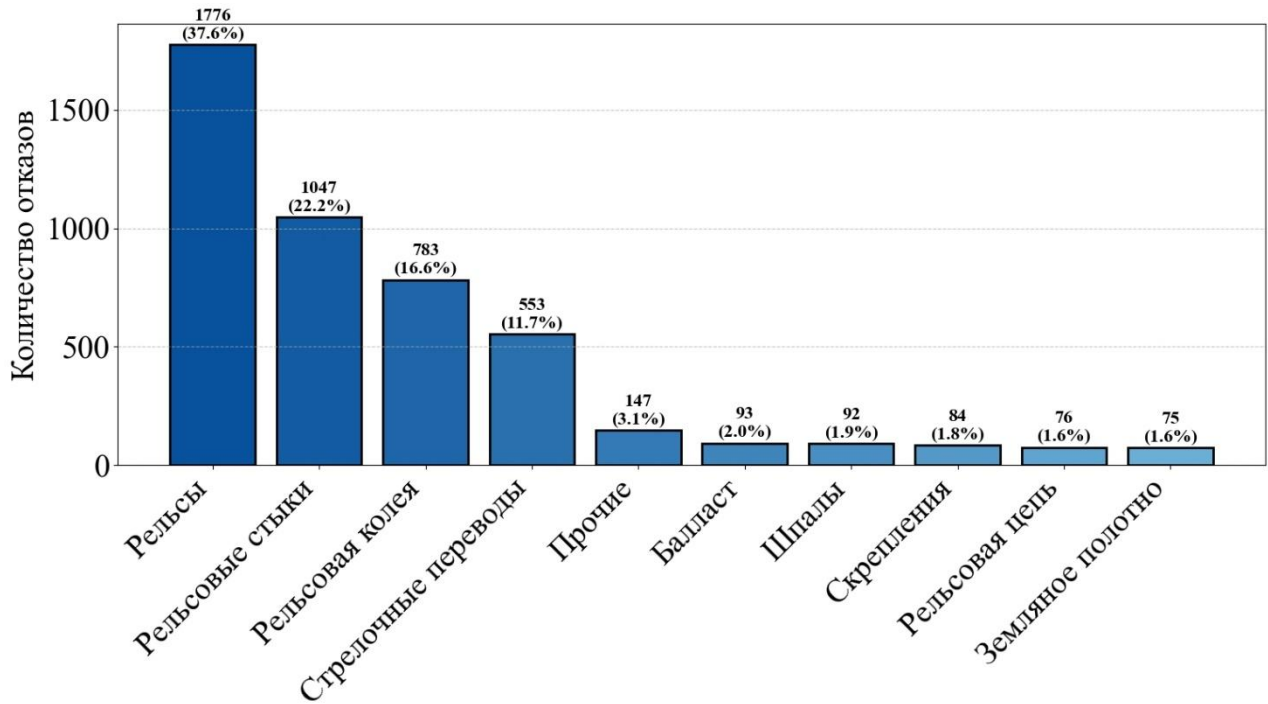


Рисунок 1.2 – Распределение отказов железнодорожного пути за 2020 – 2024 гг.

Для оценки современного состояния надежности напольных устройств ЖАТ и определения тенденций, которые явно отражают изменение технического состояния элементов рельсовой линии, проведен анализ динамики отказов по категориям (рис. 1.3). Наибольшая доля в структуре отказов на протяжении продолжительного периода времени с 2020 г. по 2024 г., связанных непосредственно со старением и износом элементов, а также естественным устареванием материалов и эксплуатирующимися компонентами, занимают деграционные отказы.

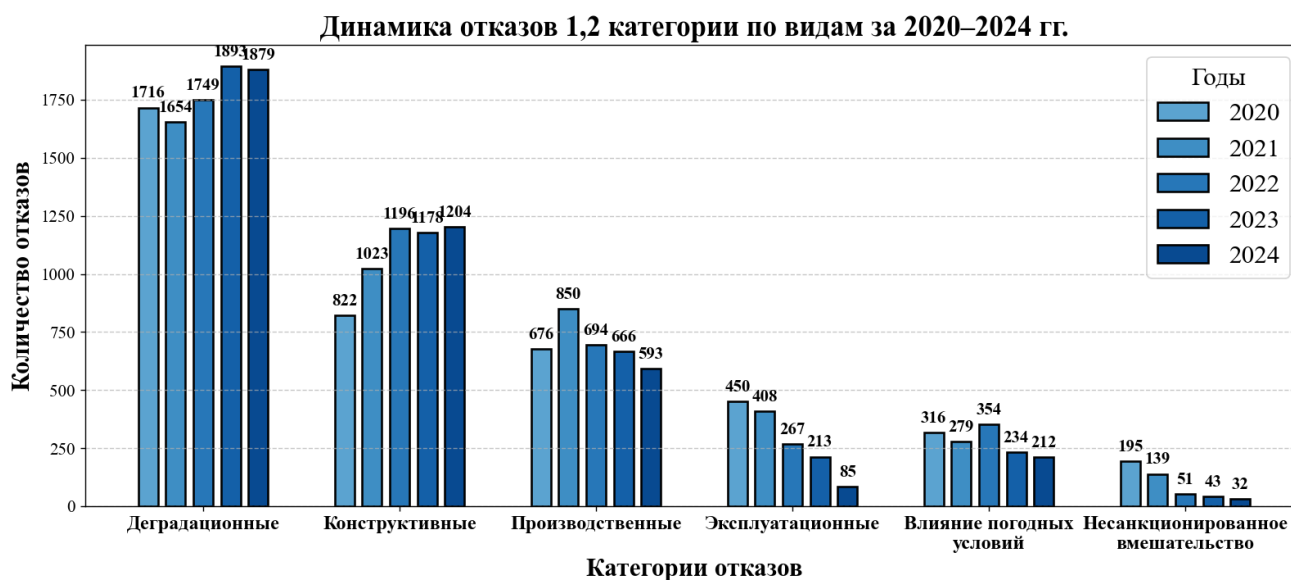


Рисунок 1.3 – Гистограмма по характеру отказов в хозяйстве железнодорожной автоматики и телемеханики по видам за 2020 – 2024 гг.

На фоне общего сокращения числа отказов по причине конструктивных и производственных факторов, наблюдается устойчивый тренд роста деградационной категории неисправностей, связанной непосредственно с увеличением срока эксплуатации напольного оборудования, в частности рельсовых цепей и их основных компонентов – токопроводящих рельсовых стыков и изолирующих стыков, так как в 2020 году зафиксировано 1716 случаев, в то время как к 2024 году их составило 1879, что свидетельствует о несвоевременной замене непрерывно эксплуатирующихся элементов, у которых жизненный цикл подошел к критической точке невозврата, а также о недостаточной эффективности организации планово – предупредительных ремонтов. К 2024 году деградационные отказы составляют более 55 % от общего числа фиксированных неисправностей, что подтверждает актуальность своевременного перехода к обслуживанию по фактическому техническому состоянию и формирования автоматизированных способов диагностики элементов ЖАТ.

Надежность рельсовых цепей во многом определяется техническим состоянием токопроводящих рельсовых стыков, которые, обеспечивают пропуск сигнального и тягового тока по железнодорожным путям. Анализ соотношения

количества возникающих неисправностей токопроводящих стыков (ТПС) и рельсовых цепей (РЦ) за последние годы показывает, что за исследуемый период доля нарушений контакта стыковых соединителей сократилась, однако динамика 18 % является неоправданно большой в контексте влияния на стабильность графика перевозочного процесса в целом, так как отказы рельсовых цепей, напрямую связанные с отказами ТПС, приводят к значительным задержкам поездов, что указывает на необходимость улучшения стратегии технического обслуживания объектов хозяйства автоматики и телемеханики (рис. 1.4).

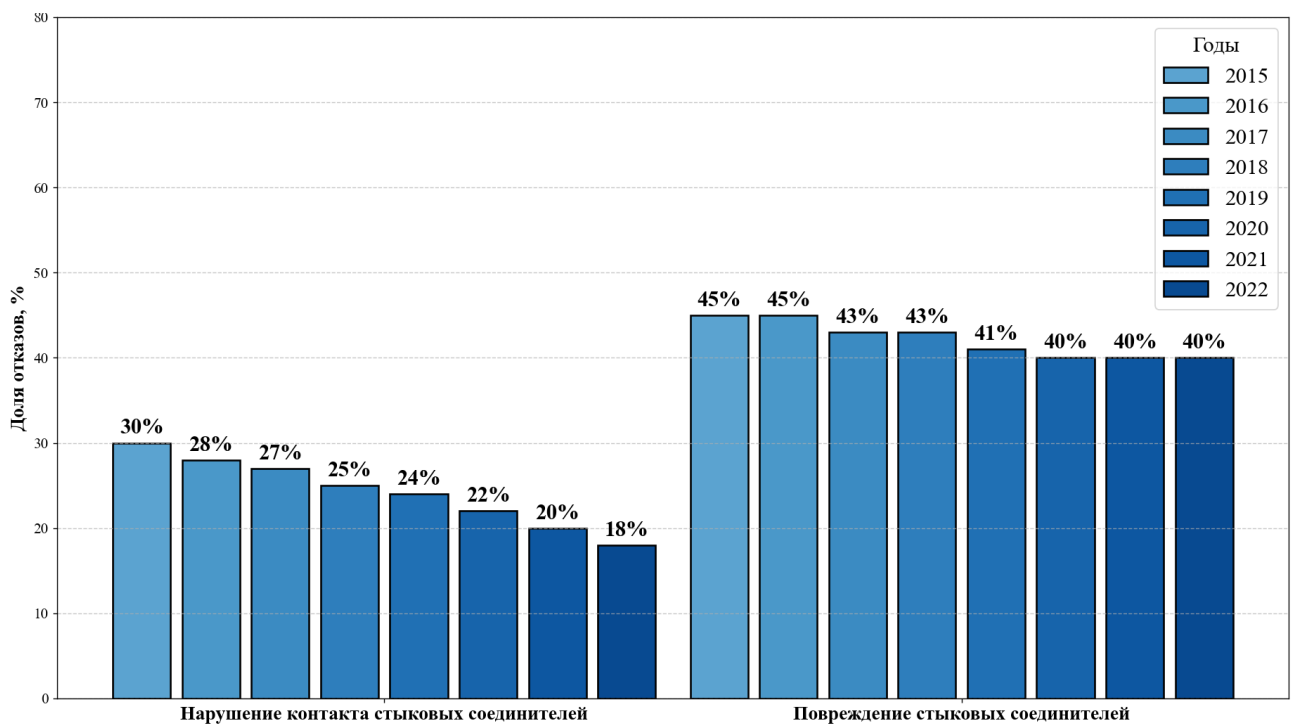


Рисунок 1.4 – Основные причины возникновения отказов в работе рельсовой цепи за восьмилетний период

Повреждения стыковых соединителей, в частности обрыв соединителя, отсутствие стыкового соединителя или его неисправность в процессе эксплуатации, остаются основной доминирующей причиной отказов (40 %), что обосновывает актуальность создания системы непрерывного и автоматизированного мониторинга текущего состояния ТПС [10]. Такая тенденция позволит своевременно локализовать место возникновения дефекта и в кратчайшие

сроки устранить неисправность, что благоприятно скажется на бесперебойности работы перевозочного процесса.

## **1.2 Исследование современного состояния контроля сопротивления токопроводящих стыков**

По своей конструкции токопроводящие стыки представляют собой сборные стыки, при которых рельсы соединяются при помощи металлических накладок, стянутых болтами, а проводимость токов обеспечивается как через сами накладки (с переменным переходным сопротивлением, зависящим от степени затяжки болтов и состояния поверхностей), так и через специальные стыковые соединители [11-12].

Грубые неисправности, такие как полный обрыв приварного соединителя или разрыв штепсельного обнаруживаются внешним осмотром, легким простукиванием молотком и измерением активного сопротивления стыка, но скрытые дефекты, например, обрыв жил многопроволочного троса внутри стальной манжеты или коррозия в месте соединения, требуют применения специализированных методов измерений и приборов. Особую сложность представляет измерение малых сопротивлений, характерных для исправных стыков и имеющих порядок десятков и сотен мкОм, на фоне влияния мощных тяговых токов и переходных сопротивлений.

Электрическое сопротивление токопроводящего стыка складывается из параллельно соединенных сопротивлений трех основных элементов: рельсовых накладок, основного и дублирующего стыковых соединителей. Согласно техническим нормам ОАО «РЖД» [12], активное сопротивление собранного стыка нормируется и зависит от типа рельсов и соединителей. Для наиболее распространенных рельсов Р65 с приварными медными соединителями сечением 70 мм<sup>2</sup> максимально допустимое сопротивление составляет 170 мкОм, а для стальных приварных или штепсельных – 340 мкОм. В условиях эксплуатации стык

считается исправным, если его сопротивление не превышает сопротивления целого рельса длиной 3 м при длине звена 12,5 м или 6 м при длине звена 25 м [13].

Проанализируем наиболее распространенные методы оценки состояния токопроводящих стыков, базирующиеся на применении индикаторных и измерительных устройств. В прошлом для диагностики стыковых соединений задействовалась аппаратура, функционировавшая по принципу сопоставления величины падения напряжения непосредственно на стыке и на контрольном отрезке рельса, либо реализующая мостовые схемы измерений — в частности, приборы серии СЧ-3 или ЦНИИ-56 [14]. На сегодняшний день мониторинг сводится исключительно к внешнему осмотру и ручным замерам, отличающимся значительной погрешностью. Рассматриваемые же подходы и алгоритмы контроля не могут быть интегрированы в системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ).

Согласно технологии обслуживания устройств СЦБ [15], состояние стыковых приварных рельсовых соединителей проверяют визуальным осмотром, и с использованием индикатора тока рельсовых цепей ИРЦ-25/50 (ИРЦ-75) для определения целостности электрической цепи, ручной установкой индикатора тока на провод каждого токопроводящего стыка. Ввод измеренных значений сопротивлений в СТДМ, если это предусмотрено в технологическом процессе обслуживания, осуществляется вручную.

Известен также способ двух вольтметров [13]. Суть этого способа заключается в одновременном измерении падения напряжения на токопроводящем стыке и на отрезке целого рельса фиксированной длины, обычно составляющем один метр. При протекании по рельсу одного и того же тока отношение этих напряжений оказывается пропорционально отношению сопротивления стыка к удельному сопротивлению рельса.

Существенным недостатком классических методов является невозможность определения конкретного неисправного элемента (накладки или одного из соединителей) в составе стыка. Для решения этой задачи был предложен и запатентован способ диагностирования [16], представленный на рис. 1.5.

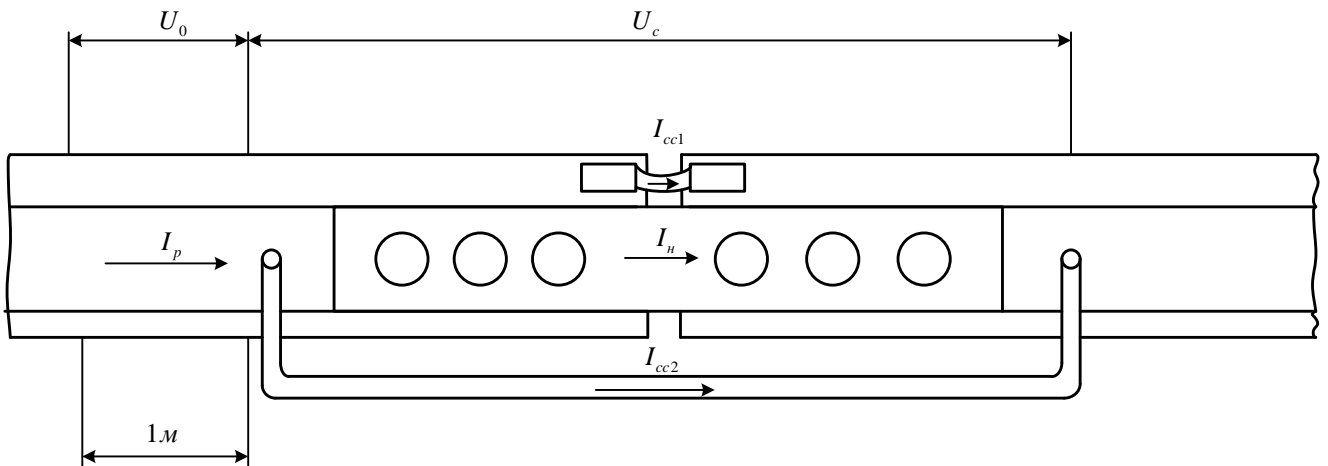


Рисунок 1.5 – Способ диагностирования состояния элементов токопроводящих рельсовых стыков

Способ основан на дополнительном измерении токов в основном ( $I_{cc1}$ ) и дублирующем ( $I_{cc2}$ ) стыковых соединителях с помощью токовых клещей или измерительных катушек. Зная ток в рельсе ( $I_p = \frac{U_0}{z_p}$ ), вычисляют относительные

фактические значения токов в элементах:

- в основном соединителе:  $k_{cc1} = \frac{I_{cc1} \cdot z_p}{U_0}$ ;
- в дублирующем соединителе:  $k_{cc2} = \frac{I_{cc2} \cdot z_p}{U_0}$ ;
- в накладках:  $k_n = 1 - \frac{(I_{cc1} + I_{cc2}) \cdot z_p}{U_0}$ .

Сравнивая полученные значения с нормативными, можно точно указать, какой именно элемент имеет повышенное сопротивление и требует замены или ремонта.

Для автоматизации этого процесса разработано устройство [17], структурная схема которого представлена на рис. 1.6.

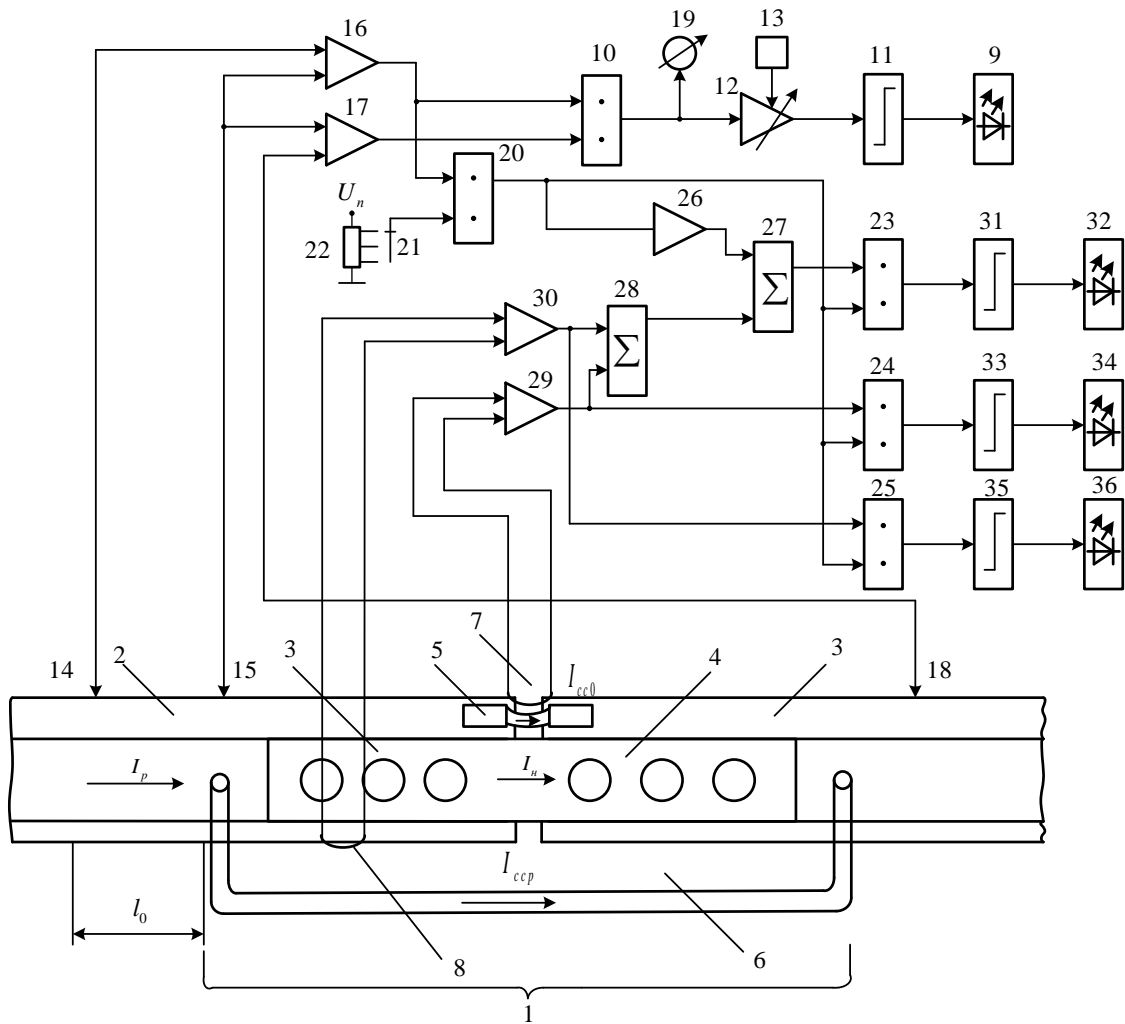


Рисунок 1.6 – Устройство для диагностирования состояния элементов токопроводящих рельсовых стыков

Устройство подключается к рельсам с помощью трех контактов, а на соединители устанавливаются измерительные катушки. Схема включает операционные усилители, делители напряжения, сумматоры и пороговые элементы с блоками сигнализации. Это позволяет не только измерять общее сопротивление стыка, но и независимо контролировать состояние каждого из трех токоведущих элементов, сигнализируя о достижении предотказного состояния или отказе.

Для ручного контроля в эксплуатации широко применяются переносные приборы. К ним относятся специализированные измерители сопротивления рельсовых стыков ИСПС-01, выпускаемые в двух модификациях: ИСПС-01/1 для участков с электротягой постоянного тока (до 1500 А через стык) и ИСПС-01/2 для

участков с электротягой переменного тока (до 250 А через стык). Данный прибор позволяет измерять сопротивление стыков в диапазоне от 25 до 500 мкОм с автоматическим выбором предела (рис 1.7).



Рисунок 1.7 - Измеритель сопротивления рельсовых стыков ИСРС-01

Наряду со специализированными приборами, для решения задач диагностики все чаще применяются современные универсальные измерительные комплексы, такие как модули МИР-Ш.



Рисунок 1.8 - Модуль универсальный измерительный  
мобильный МИР-Ш

Эти модули, работающие в паре со смартфоном по протоколу Bluetooth, представляют собой многофункциональные средства измерений с высокими

метрологическими характеристиками. Пределы допускаемой основной погрешности при измерении напряжения и тока составляют 0,01% от показаний, что вполне достаточно для точных измерений токов на элементах токопроводящего стыка. Благодаря встроенному программному обеспечению, отображающему результаты на экране смартфона, появляется возможность вести протоколы измерений и сохранять результаты непосредственно в электронном виде.

Отдельного внимания заслуживает применение индикатора тока рельсовых цепей ИТРЦ-М, который позволяет путем бесконтактного измерения токов на рельсах в зоне токопроводящего стыка, в основном и дублирующем соединителях определять состояние элементов ТПС [18].



Рисунок 1.9 – Индикатор тока рельсовых цепей ИТРЦ-М

Существующие наработки в области методов измерения создают предпосылки для создания универсальных измерительных приборов, в том числе на микропроцессорной базе. Это позволило бы интегрировать функции контроля в стационарные системы диагностирования и мониторинга, обеспечив переход от периодических ручных проверок к непрерывному автоматизированному мониторингу состояния всех элементов рельсовой линии.

### **1.3 Современные подходы к диагностированию и мониторингу функционирования ЖАТ**

Для того, чтобы обеспечить устойчивое функционирование оборудования ЖАТ и, соответственно, повысить скорость своевременного восстановления работоспособности текущих диагностических систем, в настоящее время

применяются системы автоматизированного функционального диагностирования, которые, в свою очередь, строятся на элементной микропроцессорной базе и дают возможность автоматического определения технического состояния эксплуатируемого наземного объекта с высокой периодичностью, благодаря чему формируются комплексы непрерывной диагностики за текущим состоянием устройств ЖАТ [19].

С целью централизации анализа поступающей диагностической информации о контрольном состоянии эксплуатируемого наземного объекта с линейных постов, концентрированная информация транспортируется в узлы сбора содержательных данных, называемых концентраторами информации центральных постов, которые, в свою очередь, размещаются в административных зданиях дистанций СЦБ, после чего данные о состоянии объекта направляются специализированные центры, т. е. центры мониторинга [20-23].

Каждая из СТДМ позволяет реализовать концепцию контроля состояния устройств ЖАТ, которая заключается в следующем: рост отказоустойчивости и ремонтпригодности наземного оборудования производится благодаря постоянному диагностированию, обработки и автоматизированному анализу информации, которая передается с контролируемых объектов [24-25].

Фундаментом для построения систем мониторинга служит четкая классификация состояний технических объектов. Согласно ГОСТ 27.002–2015 [26], выделяют исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное состояния. Для ответственных систем, к которым относятся средства ЖАТ, дополнительно вводят защитные и опасные неработоспособные состояния [26]. Однако практика эксплуатации показала, что для своевременного предотвращения отказов необходимо выделять во множестве работоспособных состояний так называемое предотказное состояние.

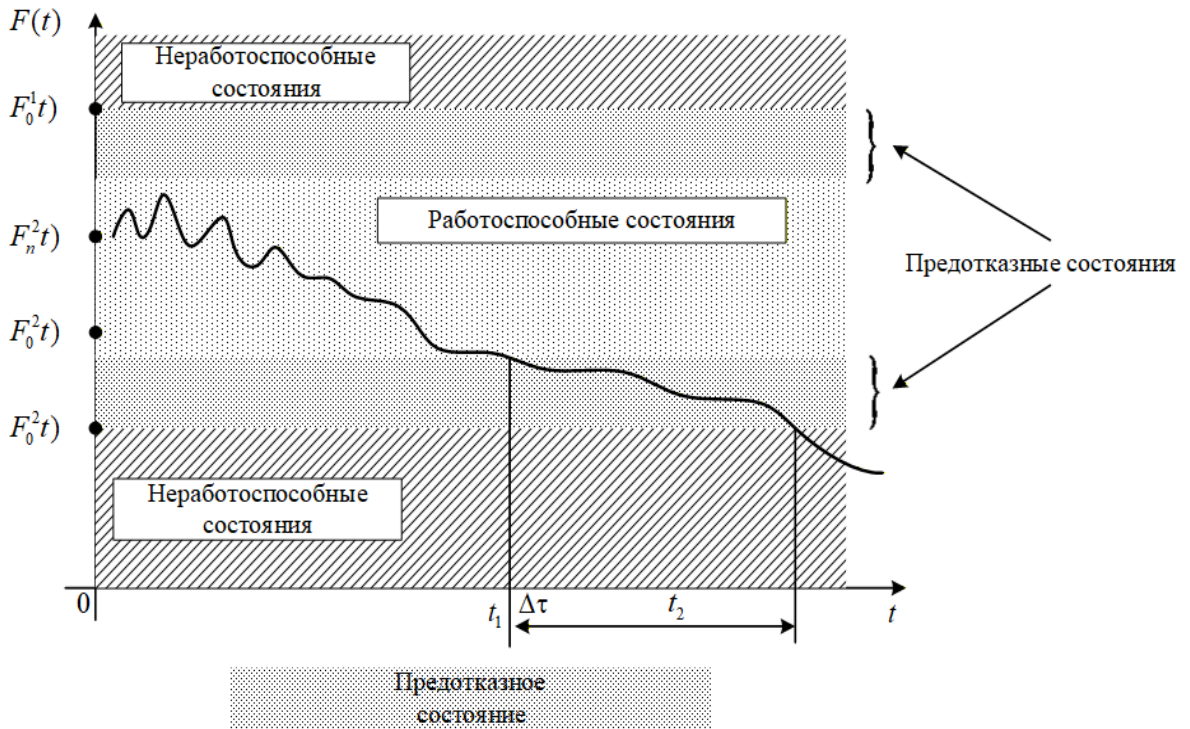


Рисунок 1.10 – Классификация состояний технических объектов с выделением предотказного состояния

Выявление предотказного состояния позволяет организовать профилактические мероприятия и предотвратить переход в неработоспособное состояние, что особенно важно для устройств, отказ которых ведет к нарушению графика движения [19].

По способу взаимодействия с объектом диагностирования различают тестовое и функциональное диагностирование [27-28].

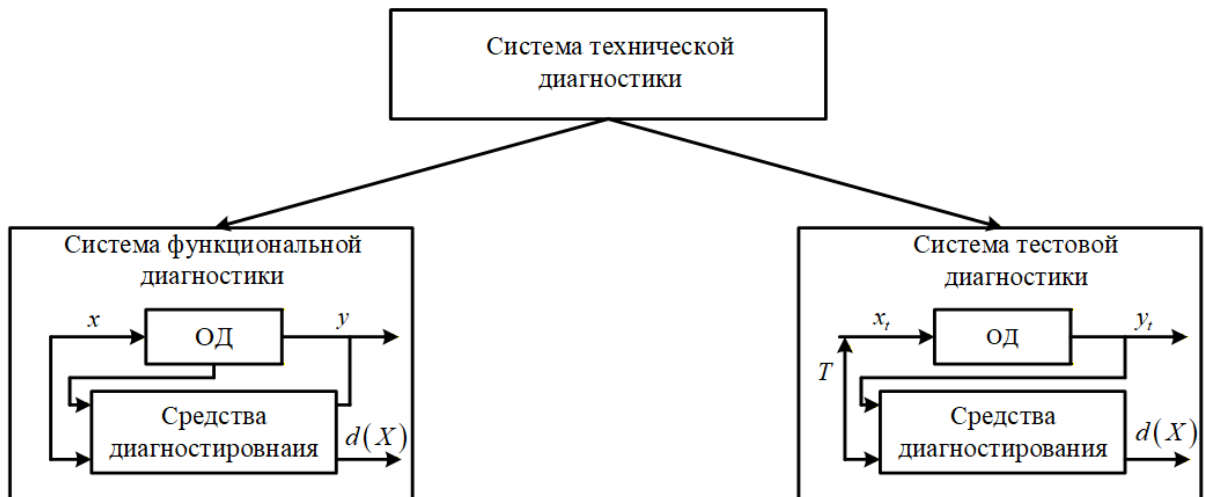


Рисунок 1.11 – Виды диагностирования

Тестовое диагностирование, в свою очередь, предполагает подачу на объект специальных тестовых воздействий и применяется в основном при наличии резервных комплектов или в периоды отсутствия движения поездов. В системах ЖАТ, функционирующих непрерывно, преимущественно используется функциональное диагностирование, при котором контроль осуществляется в рабочем режиме без отключения оборудования.

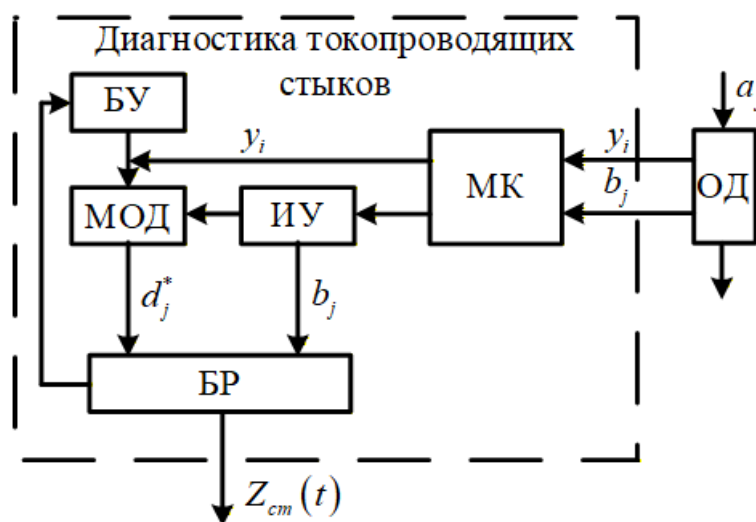


Рисунок 1.12 – Структура функционального диагностирования

Структурная схема функциональной диагностики, представленная на рис. 1.12, включает объект диагностирования, измерительные каналы, блоки обработки информации и систему распознавания состояний. При этом диагностический процесс сводится к сравнению текущих параметров с эталонными значениями, определяемыми моделью объекта.

Современные системы мониторинга (АПК-ДК, АСДК, АДК-СЦБ) строятся по многоуровневому иерархическому принципу (рис. 1.13).

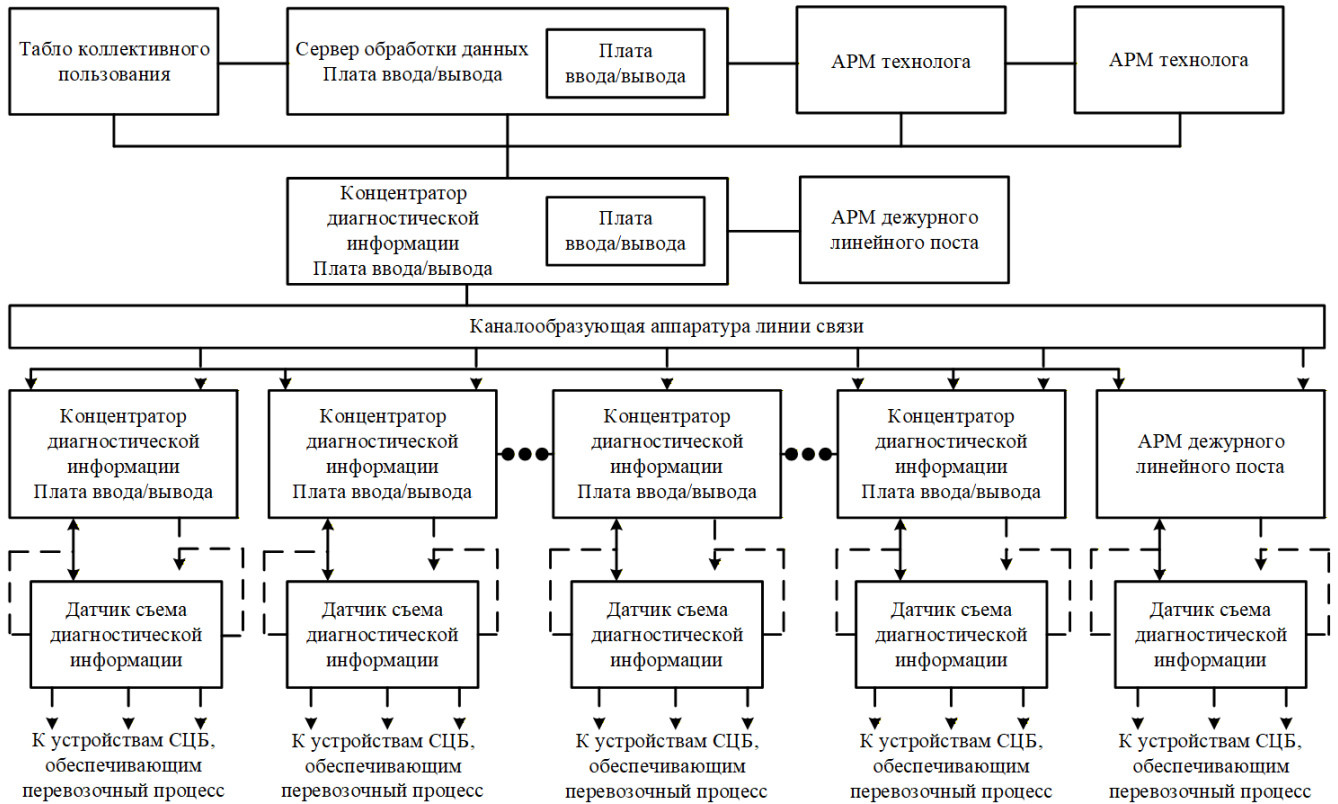


Рисунок 1.13 – Обобщенная организационно-структурная схема СТДМ

На нижнем уровне к объектам ЖАТ подключаются измерительные контроллеры, которые собирают как дискретные, так и аналоговые параметры. Концентраторы линейных постов выполняют первичную обработку и передают данные на центральные посты дистанций сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), а затем – в ситуационные центры (центры мониторинга), где информация анализируется технологами. Такая структура обеспечивает эффективное распределение функций и позволяет масштабировать систему.

Для диагностики ТПС рельсовых линий в настоящее время применимы как прямые методы контроля, так и косвенные методы, основанные на анализе параметров рельсовых цепей. Однако прямые методы трудоёмки и не позволяют вести непрерывный мониторинг, а косвенные методы, реализованные в существующих системах технического диагностирования и мониторинга (СТДМ), как правило, не выделяют сопротивление ТПС в качестве отдельного диагностического параметра [29].

Рассмотрение структуры и функционала применяемых систем СТДМ показывает синхронность их развития в одинаковых направлениях. Все они реализуют концепцию непрерывного мониторинга и диагностирования устройств ЖАТ.

Контролируемые СТДМ напряжения на выходе рельсовой цепи информативно недостаточны для диагностирования отдельных компонент рельсовой линии, в частности ТПС и не позволяют реализовать систему поддержки принятия решений (СППР) в центре диагностики.

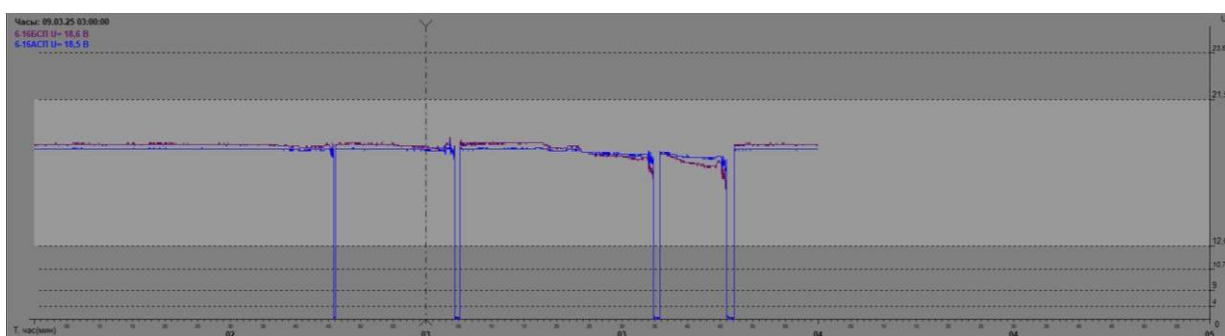


Рисунок 1.14 – График нормальной работы рельсовой цепи  
в шунтовом режиме

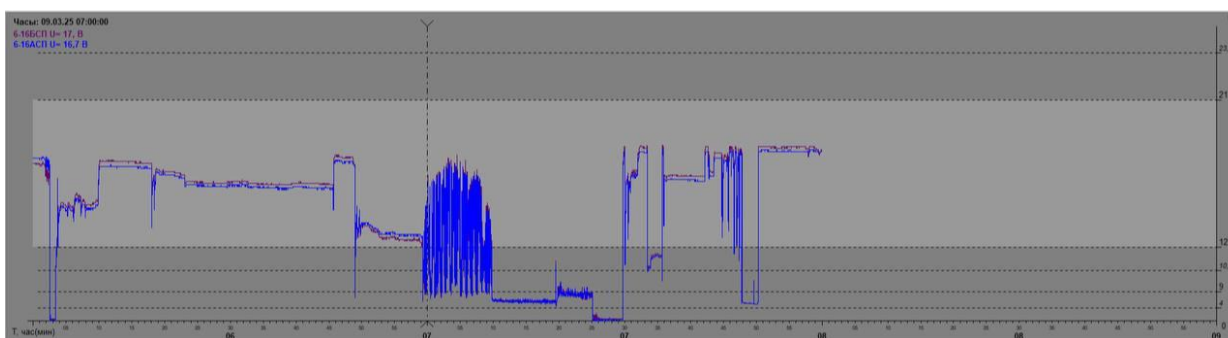


Рисунок 1.15 – Динамика напряжения в момент появления сбоя в  
рельсовой цепи

На рисунках 1.14 и 1.15 отображены графики изменения выходного напряжения РЦ, зафиксированные существующей системой технического диагностирования и мониторинга. Явно видно от первых малозаметных отклонений до критического выхода параметров за допустимые границы, однако

фиксируя лишь уровень напряжения в рельсовой цепи невозможно определить конкретно из-за какого элемента (устройства) возникло предотказное состояние.

Поэтому функциональные возможности существующих систем применительно к диагностике ТПС ограничены: они контролируют напряжение в рельсовой цепи, но не позволяют выделить вклад отдельного стыка в общее продольное сопротивление рельсовой линии [30]. Это не даёт возможности своевременно выявлять предотказные состояния ТПС, связанные с увеличением его сопротивления.

Сопротивление ТПС входит в состав полного продольного сопротивления РЛ, однако его изменение трудно выделить на фоне изменения других параметров (проводимости изоляции, индуктивности и т.д.). Существующие системы СТДМ не решают задачу непрерывного распознавания величины и координаты ТПС с повышенным сопротивлением, что приводит к запоздалому выявлению предотказных состояний и, как следствие, к отказам рельсовых цепей.

Таким образом, анализ существующих методов и систем диагностирования показывает, что для повышения надёжности и безопасности движения поездов необходима разработка специализированной методики распознавания сопротивления ТПС, основанной на измерении комплекса электрических параметров рельсовой линии и применении принципов распознавания образов. Это позволит не только выявлять факт увеличения сопротивления ТПС, но и определять его координату и степень приближения к отказному состоянию.

#### **1.4 Разработка методики контроля сопротивления токопроводящих стыков на основе принципов распознавания образов**

Диагностика токопроводящих стыков, согласно регламентам, является сложным и многофакторным процессом и обладает широким спектром неопределенностей, связанных с ручным проведением измерений с невысокой точностью, дискретностью контрольных замеров и ручным вводом измеренных данных в систему диагностики. Также они имеют невысокую точность измерений,

связанных с трудоёмкостью и в условиях рискованных ситуаций, т.к. измерения проводятся в непрерывном технологическом процессе функционирования железных дорог. Для повышения точности, обеспечения непрерывности процесса контроля, высокого уровня отказоустойчивости ТПС, необходимо разрабатывать методы, методики, модели и средства непрерывной диагностики ТПС с использованием современных информационных технологий, включая принципы распознавания состояний ТПС позволяющих осуществлять не только качественную, но и количественную оценку исходной информации.

В диссертационной работе предложена структура единого комплекса оценивания сопротивлений ТПС для распознающих систем, устанавливающая последовательность задач для корректного решения и применения адекватных методик по назначению.

Для оценивания технического состояния ТПС необходимо разработать и применять новые модели рельсовых линий с выделением ТПС, методики синтеза информационно-измерительных систем, технологии распознавания образов с машинным обучением классификатора, основанных на совокупности множестве признаков, составляющих образы состояний объекта диагностики – ТПС.

При разработке методики оценивания состояний ТПС с использованием принципов распознавания необходимо выполнить следующие требования:

- в диагностических функциях учитывать многофакторность процесса диагностики состояния ТПС при безусловном выполнении условий достоверности результатов;
- обеспечивать функциональную диагностику без дополнительных требований к режиму работы;
- минимального времени принятия решений при оценке сопротивлений ТПС;
- заблаговременного оценивания сопротивлений ТПС с целью формирования информации о предотказном состоянии;
- возможности распараллеливания процесса измерения значений первичных признаков и предварительной обработки информации.

Теоретические положения диссертационной работы при разработке моделей, методик для распознавания сопротивления ТПС, базируются на следующих принципах:

1) Принципе системности – при формировании решающих правил диагностики необходимо классифицировать не только качественные значения диагностических параметров, но и их количественные значения;

2) Принципе многообразия – необходимо в качестве первичных признаков использования не только электрические параметры на входе и выходе четырехполюсника рельсовой линии с ТПС, но и обобщенные функции признаков в виде комплексных входных и выходных сопротивлений, передаточных функций токов, напряжений и др.

3) Принципе декомпозиции – процесс формирования системы распознавания сопротивлений ТПС в виде моделей, каналов передачи информации, диагностических функций, модулей решающих правил, систем и правил принятия решения;

4) Принципе итеративности – проведения комплексного распознавания сопротивлений ТПС в виде последовательности методик: методики формирования диагностических функций, определения их сложности; методики принятия решения о величине сопротивления ТПС.

Названные принципы позволяют определить задачи, связанные с распознаванием сопротивлений ТПС:

– формирование априорного словаря первичных информативных признаков в определенной мере, описывающих траекторию изменения сопротивления ТПС;

– преобразование априорного словаря признаков в рабочий словарь признаков и оценкой их информативности и ранжированием;

– разработка распределенно - дискретных моделей рельсовой линии с выделением компоненты токопроводящего стыка из общей схемы замещения рельсовой линии, применяемой в настоящее время;

– выбор вида и сложности диагностических функций;

- разработка алгоритма распознавания сопротивлений ТПС с определением возможностей множественности диагностических функций;
- разработки методики обучения диагностических функций и проверки на тестовой выборке образов.
- формирование решающих правил на основе дерева решений.
- разработка архитектуры системы распознавания сопротивлений ТПС.

## Выводы по первой главе

1. Рельсовые стыки, в частности ТПС, являются одним из наиболее уязвимых элементов хозяйства автоматики и телемеханики, обуславливая более 22 % неисправностей. При этом отказы проявляются из-за 40% повреждения стыковых соединителей, и 18% нарушения контакта стыковых соединителей.

2. Существующие способы технического контроля состояния ТПС на сегодняшний день имеют существенные недостатки, связанные с оценкой напряжений и токов на элементах рельсовой цепи, без конкретизации причины изменения напряжений и токов. Применяемый планово-предупредительный характер технического обслуживания имеет избыточность, связанную с неоптимальностью выполнения графика технологического процесса обслуживания, когда отсутствует контроль за жизненным циклом компонент рельсовой цепи, в частности токопроводящего стыка, что не позволяет адресное техническое обслуживание на диагностируемом участке железной дороги элементов, у которых истекает жизненный цикл.

3. Предложенная автором методика непрерывного распознавания текущего состояния ТПС включает в себя формирование множества диагностирующих функций на основе образов состояний, сформированных из входных и выходных электрических информативных параметров рельсовой линии, позволяющих автоматизировано и своевременно локализовать координату, производить мониторинг величины сопротивления ТПС, а также диагностировать предотказное состояние ТПС.

## 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Для разработки математических моделей электрических параметров рельсовых линий последние рассматриваются как линии с распределенными параметрами, в которых для каждого момента времени ток  $i_i$  и напряжение  $u_i$  непрерывно изменяются при изменении рассматриваемой координаты  $x_{(i+1)}$  неоднородности линии [31]. Это происходит вследствие того, что линии с распределенными параметрами обладают изменяемыми первичными параметрами, влияющими на вторичные параметры и, соответственно, на уравнения состояния линий.

Рельсовые линии с распределенными параметрами (РЛРП) в общем случае рассматриваются как линии однородные и неоднородные. РЛРП считается однородной, если первичные параметры участка  $x_i$  равны параметрам  $x_{(i-1)}$  участка. И наоборот, если параметры  $x_i$  и  $x_{(i-1)}$  участков не равны, то линия неоднородная.

Для исследования закономерности изменения сопротивлений ТПС рельсовые линии на первом этапе рассматриваются однородными, а затем, на втором этапе, исследуются параметры и определяется неоднородность линии, и на этой закономерности влияния неоднородностей на входные и выходные электрические параметры выдвигается гипотеза о возможности распознавания сопротивления ТПС по информации электрических входных и выходных параметров рельсовой линии. Для этого необходимо разработать математические модели электрических входных и выходных параметров РЛРП и исследовать их зависимости от изменения первичных параметров линии и формировать на их основе априорное множество первичных информативных признаков.

Математические модели электрических параметров однородных рельсовых линий, являющихся первичными информативными признаками системы распознавания состояний ТПС, представляют описание реальных процессов в линии в виде уравнений для анализа поведения схемы в части изменения полного продольного сопротивления рельсовой линии [32-33].

Решение задачи разработки математических моделей входных и выходных электрических параметров рельсовой линии связано с необходимостью «перевода» прикладной задачи с физическими параметрами на формальный математический язык, т. е. для реального объекта – рельсовой цепи должна быть построена ее математическая, цифровая модель [34].

Основное назначение математической модели (ММ) – описание с использованием логико – математических конструкций основных свойств физического объекта, его параметров, внутренних и внешних связей.

## 2.1 Характеристика однородной рельсовой линии

В общей теории математического моделирования (ММ) любой объект, в том числе рельсовые линии с распределенными параметрами, характеризуется внутренними, внешними и выходными параметрами, а также фазовыми переменными [35].

Внутренние параметры модели описывают поведение продольных сопротивлений и поперечных проводимостей однородной рельсовой линии:

$$W = \{r_o, L_o, g_o, C_o\}, \quad (2.1)$$

где  $r_o$  – продольное сопротивление (активная составляющая);

$L_o$  – продольная индуктивность рельсовой линии (индуктивная составляющая);

$g_o$  – проводимость, характеризующая утечки тока через шпалы, балластную призму, землю;

$C_o$  – междурельсовая емкость, характеризующая накопление энергии электрического поля.

Каждый параметр множества (2.1) может быть функцией, вектором, зависящим от частоты сигнала опроса рельсовых линий, величины приложенного напряжения и т.д.

Выходные параметры модели характеризуют различные функциональные зависимости, например, передаточные функции по напряжению, току, входные – выходные комплексные сопротивления и т.д. Вектор выходных параметров при представлении в виде передаточных функций по напряжению изображается, как

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} .$$

Внешние параметры отображают внешние характеристики по отношению к объекту – рельсовой линии, среде передачи информации. Внешние параметры в общем случае описываются выражением  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , где  $q_1, q_2, \dots, q_n$  – климатические, динамические, термические воздействия.

Еще одним параметром в уравнениях математической модели являются фазовые переменные, отражающие входные и выходные электрические параметры однородной рельсовой линии. Минимальный размер фазовых переменных составляют измеряемые параметры рельсовой линии на входе и выходе:

$$M = \{\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2\} . \quad (2.2)$$

В общем случае, фазовые и выходные параметры  $M$  представляются операторами от векторов  $W, H, Q$  и могут описывать состояния объекта – сопротивления ТПС и определены решением систем уравнений и преобразованиями гиперболических функций. С учетом этого, обобщенная математическая модель может быть представлена в виде следующих систем уравнений:

$$\begin{cases} \bar{P}(\bar{W}, \bar{H}, \bar{Q}) = 0 \\ \bar{M} = \bar{\alpha}(\bar{H}) \end{cases}$$

где  $\bar{P}$ ,  $\alpha$  – операторы, определяющие характер и вид математической модели объекта исследования.

При разработке ММ входных и выходных электрических параметров рельсовой линии с распределенными параметрами устройства непрерывного распознавания состояний ТПС одной из основных задач является информационное описание признаков, характеризующих изменения сопротивления ТПС, и, следовательно, полного продольного сопротивления РЛ [36 – 38].

Из теории рельсовых цепей, включающих в себя рельсовые линии, являющиеся чувствительным элементом первичного датчика, известно, что электрические параметры датчика описываются уравнениями состояний, связывающими входные  $\dot{U}_1, \dot{I}_1$  и выходные величины  $\dot{U}_2, \dot{I}_2$ , и отображенные на схеме элементом длинной линии (рис.2.1):

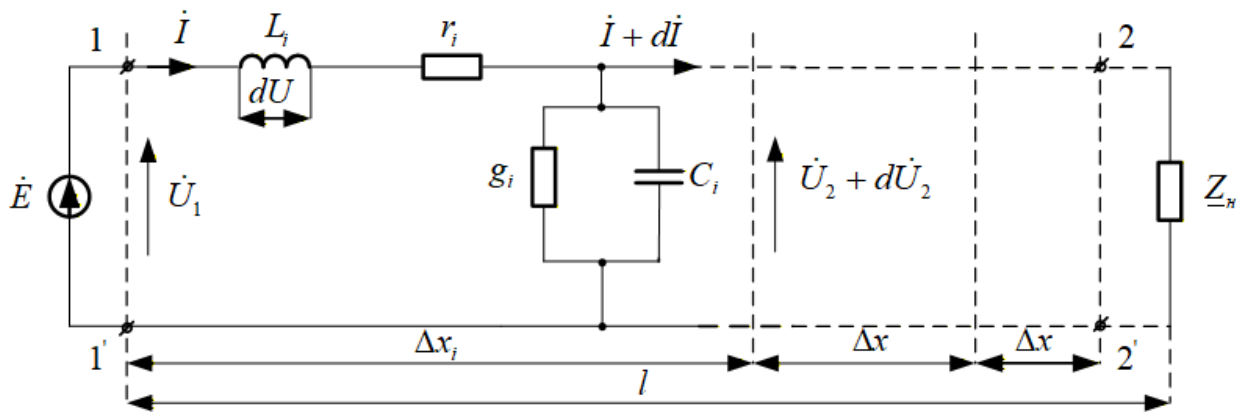


Рисунок 2.1 – Схема элементарного участка однородной рельсовой линии

На величины входных и выходных токов и напряжений оказывают влияние не только изменение сопротивления ТПС, представляющие целевую функцию, но и изменения первичных параметров рельсовой линии, являющиеся возмущающими воздействиями и обозначенные на рис. 2.1 как  $Z = \{r_i, L_i, g_i, C_i\}$ , зависящие от климатических условий, динамических воздействий, деградации изоляции изолирующих стыков.

В рельсовых линиях внутренние первичные параметры являются погонными, равномерно распределенными вдоль рельсовой линии, и, соответственно, на рис.2.1 пассивные параметры представлены как сумма продольных резистивных и индуктивных сопротивлений и поперечных проводимостей и междурельсовых емкостей. Для исследования зависимостей входных и выходных токов и напряжений проведем анализ характера первичных параметров рельсовых линий, основных компонент ММ и влияющих на изменение величин входных и выходных токов и напряжений.

## **2.2 Первичные параметры однородной рельсовой линии**

Эффективность передачи сигналов опроса по рельсовым линиям в первую очередь зависят от первичных и вторичных параметров рельсовых линий, характеризующихся продольным сопротивлением и поперечной проводимостью междурельсовой изоляции. Все первичные параметры рельсовой линии являются погонными величинами, отнесенными к одному километру рельсовой линии.

Отличительной особенностью рельсовых линий с распределенными параметрами является значительная проводимость балластного материала и шпал, и при определенных условиях основная часть энергии стекает с рельсов в земляное полотно, образуя параллельный тракт протекания тока от источника к приемнику, а также от одного к другому рельсу [39 – 40]. Поэтому для оценки характера токов и напряжений на концах рельсовой линии, формирующих информационный базис распознавания сопротивления ТПС в комплексе полного продольного сопротивления рельсовых линий, рассмотрим природу и зависимости первичных параметров РЛ.

### **2.2.1 Продольное сопротивление рельсовых линий**

Рельсовая линия, как правило, состоит из звеньевых рельсов длиной 25 м и стыковых соединителей, при моделировании рассматриваемых в виде активных и

реактивных составляющих полного сопротивления РЛ. Рассмотрим активное и индуктивное сопротивления рельсов, возникающие вследствие протекания гармонического синусоидального тока по рельсовой линии, в итоге составляющих полное продольное сопротивление рельсовой линии  $Z_{рл}$ .

Активное сопротивление рельсовых линий (отдельных рельс) может быть установлено по формуле Неймана, определённого в результате исследования явления распространения гармонического сигнала – электрических волн в стали (ферромагните):

$$R_a = \frac{l}{u} = \sqrt{\mu_0 \mu_{er} \rho \omega}, \quad (2.3)$$

где:  $l$  - длина рельса (25 м);

$u$  - величина периметра (поперечного сечения);

$\rho$  - удельное сопротивление стали;

$\omega$  - угловая частота;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  - магнитная проницаемость;

$\mu_{er}$  - относительная магнитная проницаемость рельсовой стали.

В соответствии с (2.3), на величину активного сопротивления рельса гармоническому сигналу влияет: частота гармонического сигнала, подключенного к рельсам, форма периметра рельса, тип рельс: Р50; Р65; Р75, проводимость (величина обратно пропорциональная  $R_u$ ) изоляции, магнитная проницаемость стали, а также различия летней и зимних температур окружающего воздуха. Под действием этих факторов ктивное сопротивление рельса протекающему току может колебаться до 1,92 раза [41].

Рассмотрим эквивалентное сопротивление  $2^x$  рельсов  $Z_{2p}$ , для чего воспользуемся формулой:

$$Z_{2p} = \frac{Z_p' Z_p'' - Z_m^2}{Z_p' Z_p'' + 2Z_m}, \quad (2.4)$$

где  $Z_p'$  и  $Z_p''$  - сопротивления рельсов, соответственно, первого и второго;

$Z_m$  - взаимное сопротивление, обусловленное индуктивностью между рельсами, определяемое как:

$$Z_m = 0,05 - j0,144(1,53 + \lg l_p \sqrt{g}), \quad (2.5)$$

где  $l_p$  - расстояние между рельсами.

Если сопротивление рельсов обозначить, как  $Z' = Z_p'' = Z_p$  (при условии равенства сопротивлений рельсов), то выражение (2.4) принимает вид:

$$Z_{p1} = \frac{1}{2}(Z_{1p} + Z_m) \quad (2.6)$$

Теперь, если в формулу (2.6) подставить выражение магнитного сопротивления (2.5), и, выразив через действительные мнимые части, получим:

$$Z_{p1} = A - jB \quad (2.7)$$

где  $A = \frac{r_{pa}}{2} + 0,05,$

$$B = j0,144 \left[ 1,53 - 5,2 \frac{r_a}{2} + \lg(\sqrt{R_a} \cdot \sqrt{g}) \right].$$

Если рассматривать двухпутный участок железной дороги, то формула для расчёта эквивалентного сопротивления четырёх рельсов используя вышеописанные преобразования, будет иметь вид:

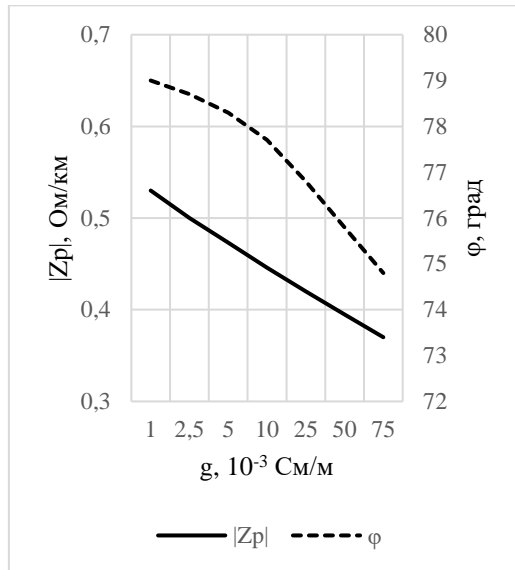
$$Z_{p11} = M - jN \quad (2.8)$$

где  $M = \frac{r_{pa}}{4} + 0,05,$

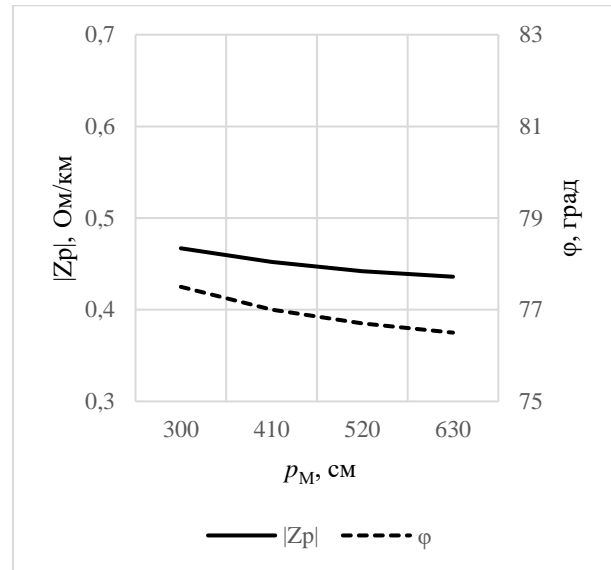
$$N = j0,144 \left[ 1,53 - 5,2 \frac{r_a}{4} + \lg(\sqrt[4]{R_a \cdot P_m^2} \cdot \sqrt{g}) \right].$$

$P_m$  - ширина междупутья.

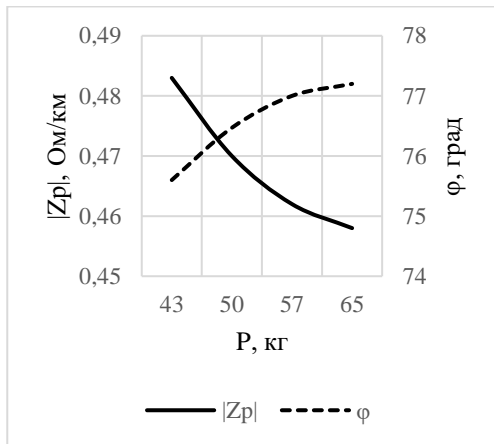
Используя полученные уравнения, произведён расчёт полного сопротивления рельсов (модуля и фазы) в зависимости от проводимости изоляции  $g$ , ширины междупутья  $P_m$ , веса рельсов  $P$ . Результаты расчетов представлены на рис. 2.2 (а - з):



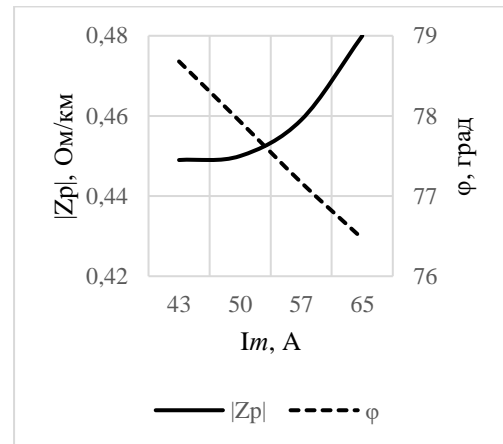
а)



б)



в)



з)

Рисунок 2.2 – Графики исследования зависимости полного сопротивления рельсов (модуля и фазы) от  $\underline{Z}_{pl} = f(g, p_m, P, I_m)$

Анализ зависимостей  $\underline{Z}_{pl} = f(g, p_m, P, I_m)$  показывает, что при наихудших условиях минимальное отклонение модуля сопротивления от среднего значения составляет  $\pm 0,015$ , а аргумент  $\varphi_p \approx 1^\circ$ .

Как отмечено выше, если рельсовые линии блок – участков звеньевые, то для стабилизации продольного сопротивления рельсовых линий ТПС зашунтированы стыковыми соединителями. В этом случае, как правило, сопротивления рельсовых линий однородное, что позволяет обеспечить высокую чувствительность

первичного датчика – рельсовой линии к фиксации вступления поезда на путь и обрыву рельсовых линий. При таком рассмотрении, рельсовая линия представляется как каскадное соединение рельсовых плетей длиной 25 м и ТПС, а для этого требуется при рассмотрении полного сопротивления рельсовой линии исследовать и индуктивную составляющую сопротивления рельсовых линий.

### 2.2.2 Индуктивность и полное продольное сопротивление звеньевой рельсовой линии переменному току

Приложенное к началу рельсовой линии напряжение  $U(t, x)$  (рис. 2.1) создаёт переменный ток в рельсовой линии, который вызывает появление магнитного потока, разделяющегося на два потока: первый в пределах каждого рельса, второй – между рельсами на соединителях, и, соответственно, индуктивность двух рельсов  $L_p$  представляется в виде:

$$L_p = L_e \cdot (L_i + \sum_{i=1}^n L_{st}), \quad (2.9)$$

где  $L_i$  – внутренняя индуктивность;

$\sum_{i=1}^n L_{st}$  – суммарная индуктивность стыковых соединителей.

При этом, нормативная индуктивность приварных стыковых соединителей  $L_{np} = 1,27 \cdot 10^{-6}$  Гн, а индуктивность штепсельных –  $L_{um} = 1,9 \cdot 10^{-6}$  Гн.

Внутренняя индуктивность в значительной степени зависит от частоты тока опроса датчика – рельсовых линий; магнитных проницаемостей – стали:

$$L_i = f(\rho, \mu_0, \mu_{st}, f) = \frac{0,6}{u} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{st} \rho}{\omega}} = \frac{0,6 R_a}{\omega}, \quad \text{Гн}, \quad (2.10)$$

где  $\omega = 2\pi f$ .

Внешняя индуктивность, как правило, зависит от геометрических размеров:

$$L_e = 0,4 \cdot 10^{-3} \ln \frac{a-b}{b} \quad (2.11)$$

где  $a$  – расстояния между центрами рельсов одного пути;

$b = \frac{u}{2\pi}$  – размер эквивалентного периметра рельса, как проводника.

В случае асимметрии токов в рельсах необходимо рассматривать индивидуально две цепи рельс – земля, и учитывать индуктивность такой цепи:

$$L'_e = 0,1 \cdot 10^{-3} \left( 1 + 2 \ln \frac{2}{1,78b\sqrt{4\pi g \omega}} - j \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.12)$$

При протекании тока по цепи рельс - земля переменное магнитное поле, образуется вокруг каждого рельса, наводит во втором рельсе ЭДС взаимоиנדукции  $M_{12}$ , определяемую по формуле:

$$M_{12} = 0,1 \cdot 10^{-3} \left[ 1 + 2 \ln \frac{2}{1,78(a-b)\sqrt{4\pi g \omega}} - j \frac{\pi}{2} \right]. \quad (2.13)$$

Если рассматривать рельсовые линии как последовательно соединённые рельсовые нити, обладающие  $M_{12}$ , то имеем:

$$L_e = 2(L'_e - M_{12}),$$

Подстановкой в полученную формулу составляющих  $L'_e$ , согласно (2.12) и  $M_{12}$  из (2.13) получим:

$$L_e = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \left( \frac{a-b}{b} \right). \quad (2.14)$$

Таким образом, полное продольное сопротивление звеньевой рельсовой линии переменному току имеет вид:

$$Z_{pl} = 2 \left( r_a + \sum_{i=1}^n r_{st} \right) + j\omega L_n = |Z| e^{j\varphi_z}. \quad (2.15)$$

При исследовании характера изменения токов и напряжений на концах рельсовой линии, формирующих информационный базис распознавания состояния продольного сопротивления нормально замкнутой электрической рельсовой линии, используемого в качестве чувствительного элемента первичного датчика информации, факторами, влияющими на точность определения величины

продольного сопротивления, кроме полного активного сопротивления рельсовых линий и их индуктивности, необходимо изучить важный параметр – междурельсовую проводимость изоляции  $g$  рельсовых линий, величину обратно пропорциональную сопротивлению изоляции.

### 2.2.3 Полная проводимость рельсовой линии

Ток опроса, протекающий по рельсовой линии, разветвляется через проводимость изоляции от одного рельса к другому по цепи «первый рельс – шпала – балластная призма – земляное полотно – земля – балластная призма – земляное полотно – шпала – второй рельс», и его величина зависит от составляющих цепи – проводимости изоляции, типа шпал, вида скреплений и т.д.

Ток утечки между рельсами протекает по проводникам с различной электропроводимостью: участок пути от рельса до балластного слоя обладает электрической проводимостью; балласт, шпала, земляное полотно, земля в которых имеется влажность, ионной проводимостью.

С учётом проводимости изоляции между рельсами, схема замещения линии распределенными параметрами для расчёта величин тока утечки принимает вид, представленный на рисунке 2.3:

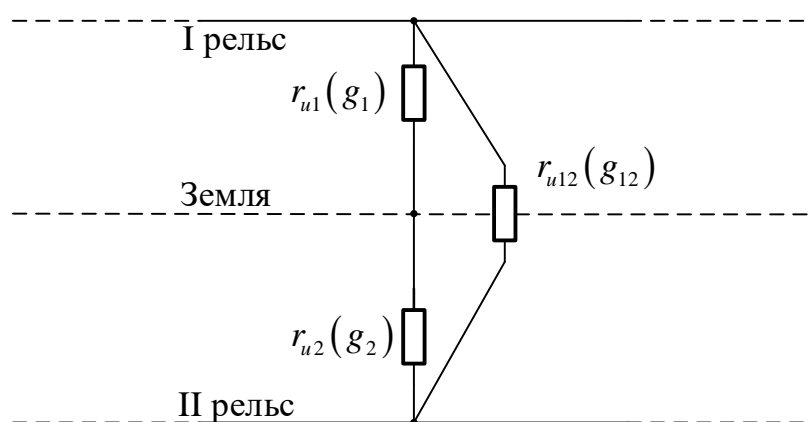


Рисунок 2.3 – Расчётная модель переходного сопротивления (проводимости) изоляции между рельсами

Часть тока утечки при протекании через балласт и землю растекается в них по сложной схеме в различных направлениях. Поэтому при обрыве стыковых соединителей или изломе рельсов непрерывность электрического тока не нарушается, т.к. появляются пути протекания тока через шпалы, балластный материал, землю. На рис. 2.3 сопротивления  $r_{u1}$  и  $r_{u2}$  характеризуют комплекс переходных сопротивлений между каждым рельсом и землёй, сопротивление которой (земли) принимается равным 0.

Рассмотрим математическую модель переходных сопротивлений  $r_{u1}$  и  $r_{u2}$  составляющих путь утечки тока «рельс – земля» [42].

В основу формирования математической модели переходного сопротивления «рельсы – шпалы – балластная призма – земляное полотно – земля» примем следующие условия. Рельсовая линия с однородным сопротивлением, обладающая предельным сопротивлением  $Z_p$  (на 1 км длины) обладает дискретным контактом с землей через последовательно соединенные сопротивление шпалы  $R_{ш}$ , балласта  $R_b$ , и земляного полотна  $R_n$ . Удельные электрические сопротивления шпал  $\rho_{ш}$ , балластной призмы  $\rho_b$ , и земляного полотна  $\rho_n$  - постоянны во времени. Электрические параметры рассматриваемой системы «рельсы - шпалы - балластная призма - земляное полотно - земля» линейны по всей протяжённости и в диапазоне изменения протекающих токов.

Рассмотренный физический смысл отразим в виде расчётной схемы дискретного участка утечки тока с рельсов в землю (рис. 2.4):

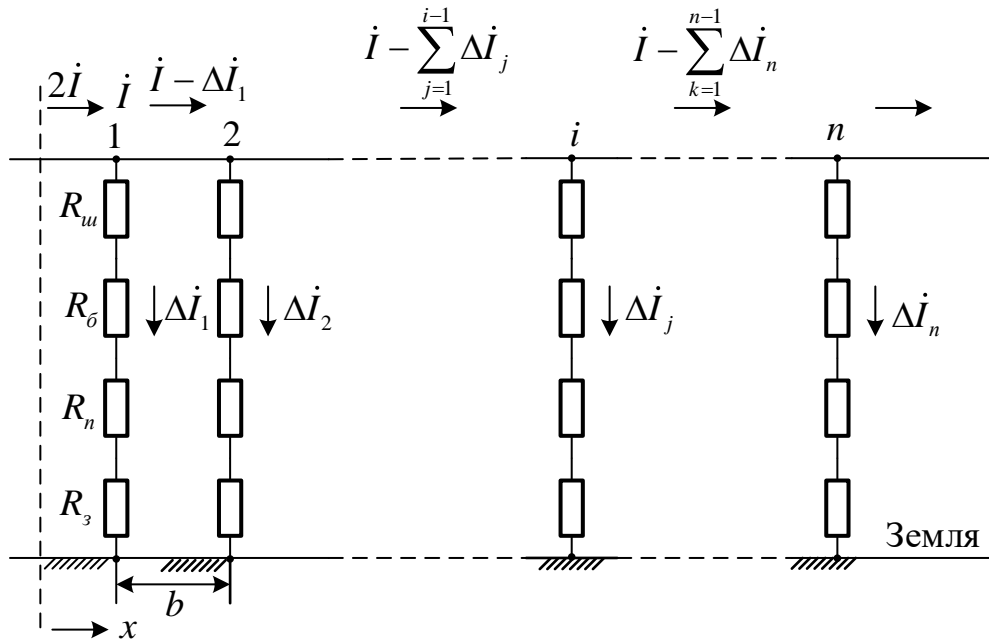


Рисунок 2.4 – Расчётная схема утечки тока с рельсов в землю

Ток опроса рельсовых линий изменяется по гармоническому закону и втекает в точке 0 в рельсовую линию. Ток изменяется по закону  $2Ie^{j\omega t}$ .

Из рассмотрения электрических процессов в рельсе сопротивлением  $Z_p$  следует, что потенциал рельса на месте контакта с координатой  $x$  описывается выражением:

$$\dot{U}_i(x) = \Delta\dot{U}_{ui} + \Delta\dot{U}_{\delta i} + \Delta\dot{U}_{ni} + \Delta\dot{U}_{zi}, \quad (2.16)$$

где  $\Delta\dot{U}_{ui}, \Delta\dot{U}_{\delta i}, \Delta\dot{U}_{ni}, \Delta\dot{U}_{zi}$  – составляющие потенциалов на границе раздела сред: а) «рельсы – шпала» и «шпала – балласт», б) «шпала – балласт» и «балласт – земляное полотно», в) «балласт – земляное полотно» и «земляное полотно – земля»;  $\Delta\dot{U}_{zi}$  – граничный потенциал «земляное полотно – земля».

Если выразить (2.16) через ток в конкретной  $i$ -ой координате, то выражение (2.16) принимает вид:

$$\dot{U}_i(x) = \Delta\dot{I}_i(x)(R_u + R_\delta + R_n + R_з), \quad (2.17)$$

где  $\Delta\dot{I}_i(x)$  – ток, стекающий с рельсов в землю на  $i$ -ой координате и сопротивлений элементов, через которые стекает ток, это: сопротивление шпал, балластного

материала, земляного полотна и земли. Составляющие  $R_{ш}, R_{б}, R_n, R_з$  имеют геометрические величины, и соответственно:

$$R_{ш} = \rho_{ш} \frac{h_{ш}}{l_{ш} \cdot w_{ш}}; \quad (2.18)$$

$$R_{б} = \rho_{б} \frac{h_{б}}{l_{б} \cdot w_{б}}; \quad (2.19)$$

$$R_n = \rho_n \frac{h_n}{l_n \cdot w_n}; \quad (2.20)$$

$$R_з = \frac{1}{w_n} r_n'', \quad (2.21)$$

где  $h_{ш}, h_{б}, h_n$  – толщина шпалы, балластного материала, и земляного полотна;

$l_{ш}, l_{б}, l_n$  – длина шпалы, ширина балластного слоя, и земляного полотна;

$w_{ш}, w_{б}, w_n$  – средняя ширина шпалы, длина участка балластной призмы и земляного полотна.

Фундаментальные исследования Э. Зунде в 1936 г. позволило получить выражения для определения переходного сопротивления «проводник – земля».

$$r_n'' = \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{1,12}{\alpha \gamma} \quad (2.22)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление земли,  $\alpha$  – радиус проводника, или окружность вокруг рельса,  $\gamma$  – коэффициент распространения.

Преобразованием выражений (2.16 – 2.17) несложно получить математическую модель переходного сопротивления системы «рельс – шпала – балластная призма – земляное полотно – земля» в виде:

$$r_n = 0,142 \cdot 10^{-3} \rho_{ш} + 0,128 \cdot 10^{-3} \rho_{б} + \frac{10^{-3}}{1,5 + 5,8 / H_n} \rho_n + 2,2 \cdot 10^{-3} \rho. \quad (2.23)$$

Значения сопротивлений  $r_{u1}$  и  $r_{u2}$  при отсутствии внешних подключений к первому или второму рельсам равны между собой, т.е.  $r_{u1} = r_{u2} = r_з$  и рельсовая линия по сопротивлениям считается симметричной.

Рассмотрим параметры рельсовой линии, являющиеся составляющими в (2.23). Так, коэффициент поверхностной проводимости  $\rho$  определяется выражением [43]:

$$\rho = \frac{g_{12}}{g_3} = \frac{r_{u3}}{r_{u12}}, \quad (2.24)$$

И на основании (2.24) и схемы замещения (рис. 2.4) получим:

$$\begin{aligned} g &= \frac{g_3}{2} + g_{12}; & g_3 &= g \frac{2}{1+2\rho}; \\ g_{12} &= \frac{2\rho}{1+2\rho}; & r_3 &= r_u \frac{1+2\rho}{2}; \\ r_u &= \frac{r_{u12}(r_{u1} + r_{u2})}{r_{u1} + r_{u2} + r_{u12}}; & r_{u12} &= r_u \frac{1+2\rho}{2\rho}. \end{aligned}$$

Коэффициент поверхностной проводимости  $\rho$ , характеризующий отношение между сопротивлениями изоляции, различен, при различных видах шпал:

$\rho = 9,1$  - железобетонные шпалы, щебёночный балласт;

$\rho = 3,2$  - деревянные шпалы и песчаный балласт;

$\rho = 1,8$  - деревянные шпалы и щебёночный балласт.

Активное сопротивление  $r_o$  и продольная индуктивность  $L_o$  составляют полное продольное сопротивление,  $\bar{Z}_o = r_o + j\omega L_o$ , а проводимость  $g_o$  и емкость  $C_o$  – полную проводимость между рельсами  $Y_o = g_o + j\omega C_o$ .

### 2.3 Математические модели входных и выходных электрических параметров рельсовой линии

Математическое описание исследуемых процессов в РЛРП зависит от:

– природы реальных процессов, протекающих в РЛ, и их зависимости от первичных параметров линии на основе законов распространения электромагнитной волны вдоль линии с распределенными параметрами;

- адекватности описания процессов и зависимости входных и выходных электрических параметров от пассивных первичных параметров рельсовых линий;
- требуемой достоверности исследования реальных входных и выходных параметров рельсовых линий [44].

Для исследования влияния продольного сопротивления рельсовой линии и поперечной проводимости с емкостной составляющей на распознавание сопротивлений изолирующих стыков, необходимо разработать математические модели входных и выходных электрических параметров  $\dot{I}_1, \dot{U}_1, \dot{U}_2 = f(L_o, r_o, g_o, C_o)$ .

Как отмечено ранее, рельсовая линия рассматривается как длинная линия с распределенными параметрами, где в качестве линий передачи энергии служат рельсы с продольными параметрами, активным сопротивлением и индуктивностью, а поперечными параметрами является проводимость изоляции и междурельсовая ёмкость.

В соответствии с законами электротехники, в цепях с сосредоточенными параметрами входные и выходные электрические параметры цепи  $\dot{U}_1 = f(t)$ ,  $\dot{I}_1 = f(t)$ ,  $\dot{U}_2 = f(t)$ , являются функциями только одного параметра, времени ( $t$ ). В цепях с распределёнными параметрами входные и выходные электрические параметры являются функциями  $2^x$  переменных: времени ( $t$ ) и координаты ( $x$ ), соответственно информативный базис распознавания сопротивления ТПС представляется в виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= f(t, x), \\ \dot{I}_1 &= f(t, x), \\ \dot{U}_2 &= f(t, x), \end{aligned} \tag{2.25}$$

где  $x$  – координата, отсчитываемая от начала линии вдоль направления распределения параметров.

Следовательно, рельсовую линию блок – участка железной дороги при подключении к ним в координате  $x$  источника гармонического сигнала возможно представить виде однородной линии с распределёнными параметрами как

совокупность бесконечно малых участков длины  $dx$ , где  $x$  – расстояние от начало длины линии (рис. 2.5):

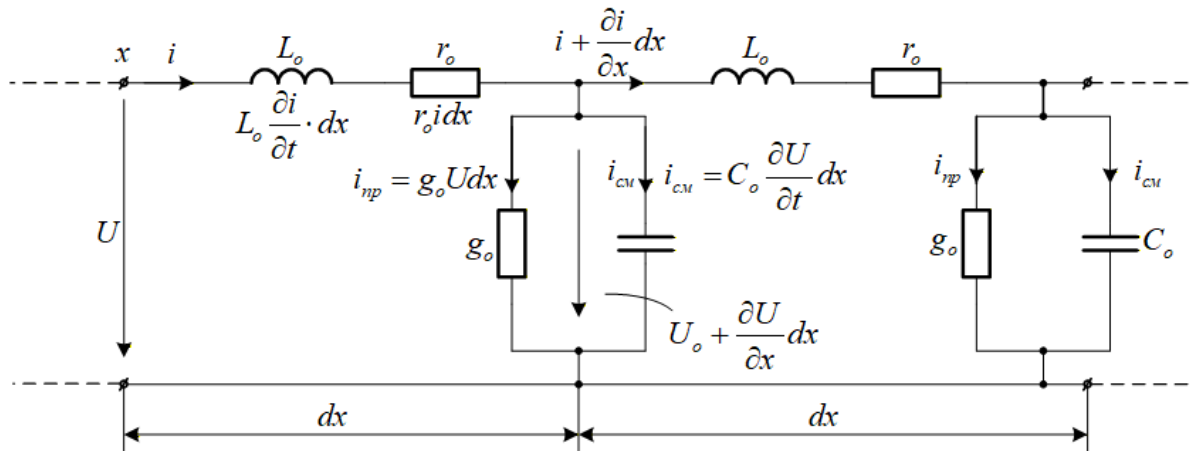


Рисунок 2.5 – Дифференциальная схема замещения рельсовой линии с распределёнными параметрами

Параметры  $L_o, r_o, g_o, C_o$  являются первичными параметрами элементарного участка рельсовой линии и зависят от конструктивных особенностей путей: верхнего строения, типа используемых шпал, рельс, балластного материала и т.д.

При этом,  $L_o, r_o$  являются составляющими продольного сопротивления рельсовой линии, величина которой зависит от типа рельсовой линии – стыковой или бесстыковой, если стыковой, то типа соединителей: медные приварные, стальные приварные или штепсельные.

Величины  $g_o$  и  $C_o$  составляют поперечную проводимость между рельсами, величина которой зависит от материала верхнего строения пути (песок щебень), типа шпал: железобетонные, деревянные.

Используя направления токов и напряжений, обозначенных на рис. 3.6, система уравнений, описывающих потери энергии на элементарном участке, получим:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial U(x,t)}{\partial x} &= r_o i(x,t) + L_o \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} &= g_o U(x,t) + C_o \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

В рельсовых цепях переменного тока источником питания являются генераторы синусоидальных гармонических сигналов, и, следовательно, токи и напряжения в любой координате расположения стыка  $x$  представляются синусоидальными функциями во времени  $t$ , и система уравнений (2.26) преобразуется в следующей последовательности.

Падение напряжения на участке  $dx$ :

$$-\frac{\partial U_1}{\partial x} = I_1(r_o + j\omega L_o), \quad (2.27)$$

а утечка тока на участке:

$$-\frac{\partial I_1}{\partial x} = U_1(g_o + j\omega C_o). \quad (2.28)$$

Решение уравнений (2.27) и (2.28) возможно дифференциацией соотношения (2.27) и с использованием выражения (2.28) получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} &= \frac{\partial I_1}{\partial x}(r_o + j\omega L_o); \\ \frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} &= U_1(r_o + j\omega L_o)(g_o + j\omega C_o); \end{aligned} \quad (2.29)$$

Обозначим правую часть уравнения (2.29) как коэффициент распространения  $\gamma = \sqrt{(r_o + j\omega L_o)(g_o + j\omega C_o)}$ , и подставив  $\gamma$  в выражение (2.29), получим:

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} = \gamma^2 U_1 \quad (2.30)$$

Из курса ТЛЭЦ и ТОЭ известно, что решение уравнения (2.30) имеет вид:

$$U_1 = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (2.31)$$

Продифференцируем (2.31) относительно тока и получим:

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = \gamma(Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}) \quad (2.32)$$

Если подставить выражения (2.32) в (2.27), получим уравнение относительно тока  $I_1$ :

$$I_1(r_o + j\omega L_o) = \gamma(Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}) \quad (2.33)$$

Операцией отношения полного продольного сопротивления рельсовой линии  $Z_o$  к полной проводимости  $Y_o$  получим выражение волнового сопротивления:

$$Z_g = \sqrt{\frac{Z_o}{Y_o}} = \sqrt{\frac{r_o + j\omega L_o}{g_o + j\omega C_o}}.$$

Применим выражения для  $Z_g$  в (2.33), получим систему уравнений с двумя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} I_1 Z_g &= (Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}) \\ U_1 &= (Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}) \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

После определения постоянных интегрирования  $A$  и  $B$  получим соотношения для определения напряжения и тока в любой координате длиной однородной линии:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_2 \operatorname{ch} \gamma l - I_2 Z_g \operatorname{sh} \gamma l \\ I_1 &= \frac{1}{Z_g} U_2 \operatorname{sh} \gamma l - I_2 \operatorname{ch} \gamma l \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Система уравнений (2.35) представлена для случая, когда  $x = l$ , где  $l$  – длина рельсовой линии ( $l$  – координата конца РЛ) и позволяет вычислять множество электрических параметров рельсовой линии  $M_{u,i} = (U_1, U_2, I_1)$ , представляющих информационное обеспечение системы распознавания ТПС, на любой координате  $x$ , в том числе в начале  $x=0$ , и в конце рельсовой линии  $x=l$ :  $M_{u,i}$ , а также они устанавливают зависимость токов и напряжений от первичных пассивных параметров  $r_o, L_o, g_o, C_o$ . Система уравнений (2.35) справедлива для любых нагрузок по концам рельсовой линии  $Z_o$  и  $Z_n$ .

## 2.4 Уравнения первичных признаков при четырехполюсной схеме замещения рельсовой линии

Для удобства анализа и синтеза устройства непрерывного распознавания сопротивления ТПС, рельсовая линия с распределенными параметрами рассматривается как четырехполюсник [43, 45 – 46].

Если представлять рельсовую цепь в виде основной схемы замещения, у которой ограничительное сопротивление и сопротивление нагрузки представлены в виде реактивных двухполюсников, а рельсовая линия в виде четырехполюсной схемы замещения, то структурная схема такой цепи имеет вид, отраженный на рис. 2.6.

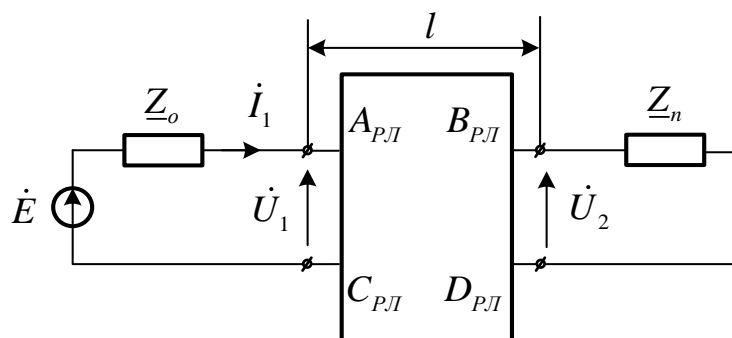


Рисунок 2.6 – Обобщённая схема рельсовой цепи, с четырехполюсником рельсовой линии

где  $\underline{Z}_o$  – согласующий и ограничивающий ток двухполюсник в начале рельсовой линии;

$\underline{Z}_n$  – входной импеданс классификатора рельсовой цепи, являющийся нагрузкой рельсовой линии;

$[A_{RL}, B_{RL}, C_{RL}, D_{RL}]$  – коэффициенты рельсовой линии, замещенной четырехполюсником;

$l$  – длина рельсовой линии блок – участка;

$\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2$  – комплексные переменные электрические параметры рельсового четырехполюсника.

Таким образом, входные и выходные комплексные электрические параметры рельсового четырёхполюсника, в общем случае зависят от первичных параметров рельсовой линии  $L_0, r_0, g_0, C_0$  и координаты – длины элементарного участка

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= f(r_0, L_0, C_0, g_0, x), \\ \dot{I}_1 &= f(r_0, L_0, C_0, g_0, x), \\ \dot{U}_2 &= f(r_0, L_0, C_0, g_0, x).\end{aligned}\tag{2.36}$$

Наиболее влияющими параметрами на точность определения сопротивления ТПС являются первичные параметры рельсовых линий, а именно, активное сопротивление, индуктивность рельсовых линий, проводимость изоляции и междурельсовая емкость.

В соответствии с гипотезой выдвинутой и описанной выше (раздел 2.1), при изменении сопротивлений ТПС изменяются комплексные амплитуды токов  $\dot{I}_1$  и напряжений  $\dot{U}_1$  на входе и  $\dot{U}_2$  на выходе рельсовой линии.

Уравнение передачи четырёхполюсника после упорядочения напряжений и токов в системе  $A$  – параметров имеет вид:

$$\left. \begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_2 A + \dot{I}_2 B \\ \dot{I}_1 &= \dot{U}_2 C + \dot{I}_2 D\end{aligned}\right\},\tag{2.37}$$

где  $A, B, C, D$  - параметры четырёхполюсника рельсовой линии.

Из курса ТЛЭЦ известно, что такой четырёхполюсник характеризуется только двумя независимыми параметрами, а 2 параметра зависимы т.к. для них справедливы условия:  $AD - BC = 1, A = D$ .

В рельсовых цепях в качестве сигнала опроса используются гармонический синусоидальный сигнал, и параметры четырёхполюсника выражаются через комплексные гиперболические функции. Параметры четырёхполюсника РЛ длиной  $l$  имеют вид [47 – 48]:

$$\left. \begin{aligned}A &= ch\gamma l, B = Z_g sh\gamma l, \\ C &= \frac{1}{Z_g} sh\gamma l, D = A = ch\gamma l\end{aligned}\right\}.\tag{2.38}$$

Основой построения системы распознавания сопротивления ТПС является априорное множество первичных признаков, сформированное из комплексных амплитуд напряжений на входе и выходе, и токов на входе рельсовой линии. Априорный словарь признаков из курса теории распознавания образов формируется из признаков, которые наиболее информативны, с точки зрения безошибочной классификации (вычисления) сопротивления ТПС, а с другой – физически реализуемы и измеримы доступными средствами [49 – 51].

Как следует из вышеизложенного, состояния внутренних параметров (первичных признаков), зависящих от продольных неоднородностей, вызванных изменением сопротивлений ТПС, отражаются на изменении сигналов на его входе и выходе:  $\dot{I}_1, \dot{U}_1, \dot{U}_2$ .

Необходимость моделирования режима свободного состояния рельсовых линий и исправного состояния аппаратуры рельсовой цепи связана с тем, что в нормальном режиме производится мониторинг работоспособности аппаратуры рельсовой цепи и диагностика состояний рельсовых линий [52]. Для контроля состояния аппаратуры и целостности рельсовых ТПС разрабатываются математические модели, определяются границы изменения решающей функции при исправных рельсовых линиях, и в случае изменения установленных границ определяется величина и локация ТПС с увеличенным сопротивлением [53]. Также в нормальном режиме осуществляется тестовая проверка правильности определения сопротивления стыка и его локации.

На рис. 2.7 представлена каскадная неразветвленная обобщенная схема рельсовой цепи – датчика информации о состоянии сопротивления рельсовой линии.

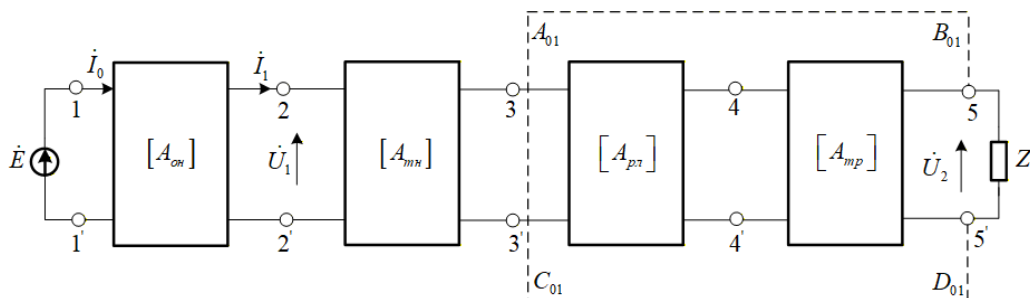


Рисунок 2.7 – Каскадная обобщённая схема первичного датчика состояния РЛ

Физическая реализация источника питания состоит из питающей сети промышленной частоты 50 Гц, преобразователя частоты и ограничивающих входной ток элементов, которые на схеме представлены четырёхполюсниками [37, 38]:

- согласующего и ограничивающего ток в начале рельсовой линии  $[A_{он}]$ ;
- понижающего трансформатора  $[A_{мл}]$ ,
- замещающего чувствительный элемент датчика – рельсовую линию  $[A_{рл}]$ ;
- согласующего и понижающего напряжение трансформатора  $[A_{мп}]$ .

Условия согласованного режима рельсовой линии с элементами, подключенными по её концам:

$$Z_{он} = Z_{н}.$$

Обобщенный четырёхполюсник рельсовой линии в работе представлен как каскадное соединение четырёхполюсника рельсовой линии  $[A_{рл}]$  и согласующего трансформатора в конце РЛ  $[A_{мп}]$ .

Коэффициенты обобщённого четырёхполюсника  $[A_{01}, B_{01}, C_{01}, D_{01}]$  возможно получить применением правила перемножения матриц:

$$[A_{01}] = [A_{рл} \cdot A_{мп}].$$

В соответствии с целевой задачей распознавания состояний полного продольного сопротивления рельсовых линий, а именно, сопротивлений ТПС, выделим последние из полного сопротивления рельсовой линии, тогда каскадная схема замещения рельсовой линии преобразуется в вид, отображенный на рис 2.8:

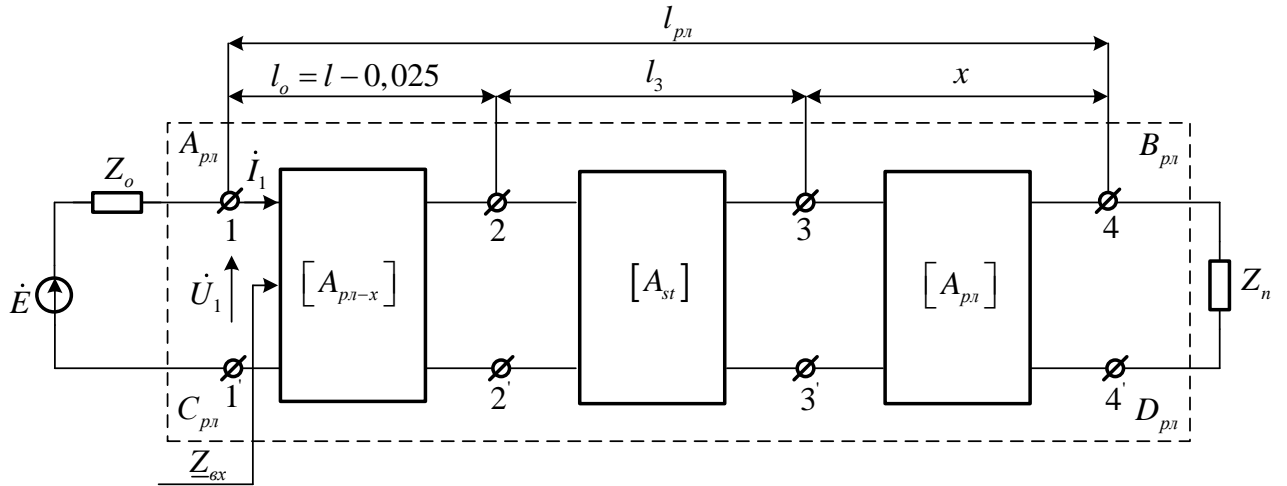


Рисунок 2.8 – Каскадная схема замещения рельсовой линии с выделением из схемы токопроводящих стыков

где  $Z_n = 0,198e^{64^{\circ}20'}$ ,  $Z_o = 0,292e^{80^{\circ}}$  [54].

Рельсовый токопроводящий стык представляет собой схему со сосредоточенными параметрами в виде последовательного соединения активного и индуктивного сопротивления стыкового соединителя:

$$Z_{st} = r_{st} + j\omega L_{st}.$$

Матрица четырехполюсника ТПС с учетом звена рельсовой линии, получается в результате перемножения матриц:

$$A_{st} = [A_{st} \cdot A_{pl}], \quad (2.39)$$

$$A_{pl} = \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p = ch\gamma l_3 & B_p = Z_6 sh\gamma l_3 \\ C_p = \frac{1}{Z_6} sh\gamma l_3 & D_p = ch\gamma l_3 \end{bmatrix}.$$

$$A_c = \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p = 1 & B_p = Z_c \\ C_p = 0 & D_p = 1 \end{bmatrix}.$$

$$Z_p = (r_o + j\omega L_o); G = (g_o + j\omega C_o); l_3 = 25 \text{ м} = 0,025 \text{ км}.$$

Коэффициенты матрицы однородной РЛ длиной  $(l-x)$  имеют вид:

$$A_p = ch\gamma(l-x); B_p = Z_6 sh\gamma(l-x); C_p = \frac{1}{Z_6} sh\gamma(l-x); D_p = ch\gamma(l-x). \quad (2.40)$$

Соответственно, коэффициенты матрицы однородной РЛ длиной  $x$  имеют вид:

$$A_{px} = ch\gamma(x); B_{px} = Z_6 sh\gamma(x); C_{px} = \frac{1}{Z_6} sh\gamma(x); D_{px} = ch\gamma(x). \quad (2.41)$$

где  $Z_6 = \sqrt{(r_o + j\omega L_o)(g_o + j\omega C_o)}$  – волновое сопротивление;

$\gamma = \sqrt{(r_o + j\omega L_o)(g_o + j\omega C_o)}$  – коэффициент распространения.

Матрица основной схемы замещения с учетом выделения неоднородности, вызванной сопротивлением токопроводящего стыка, получается перемножением трех матриц: однородной рельсовой линии длиной  $(l-x)$  (2.40); матрицы одиночного токопроводящего стыка с звеном рельсовой линии длиной  $l_3$  (2.39) и матрицы однородной рельсовой линии длиной  $x$  (2.41).

Коэффициенты согласующего трансформатора определяются справочно, [55-57] и предоставляются матрицей:

$$[A_{mp}] = \begin{bmatrix} A_{mp} & B_{mp} \\ C_{mp} & D_{mp} \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

Коэффициент обобщенной матрицы  $[A_{01}]$  при каскадном соединении четырёхполюсников определяется операцией умножения матриц (2.40 и 2.42):

$$\begin{cases} A_{01} = A_{pl}A_{mp} + B_{pl}C_{mp} = ch\gamma l \cdot A_{mp} + Z_6 sh\gamma l \cdot C_{mp}, \\ B_{01} = A_{pl}B_{mp} + B_{pl}D_{mp} = ch\gamma l \cdot B_{mp} + Z_6 sh\gamma l \cdot D_{mp}, \\ C_{01} = C_{pl}A_{mp} + D_{pl}C_{mp} = \frac{1}{Z_6} sh\gamma l \cdot A_{mp} + ch\gamma l \cdot C_{mp}, \\ D_{01} = C_{pl}B_{mp} + D_{pl}D_{mp} = \frac{1}{Z_6} sh\gamma l \cdot B_{mp} + ch\gamma l \cdot D_{mp}. \end{cases} \quad (2.43)$$

Так как согласующее – понижающий трансформатор также соединён каскадно и, соответственно, схему, представленную на рис. 2.8, можно преобразовать в вид:

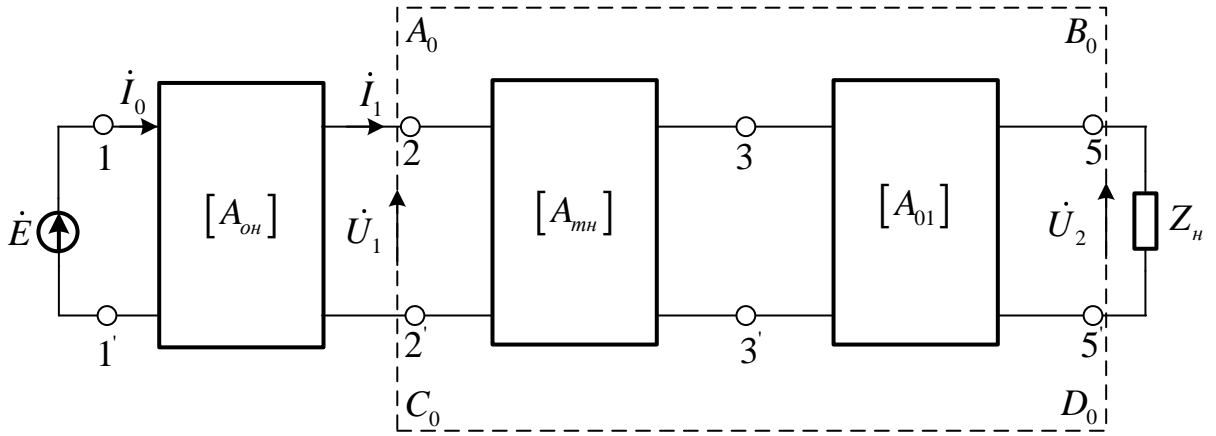


Рисунок 2.9 – Преобразованная обобщенная схема замещения рельсовой цепи

Определяем матрицу  $[A_0]$  перемножением матриц  $[A_{mn}]$  и  $[A_{01}]$ :

$$\begin{cases} A_0 = A_{mn}A_{01} + B_{mn}C_{01} = A_{mn}(ch\gamma l \cdot A_{mp} + Z_6 sh\gamma l \cdot C_{mp}) + B_{mn}\left(\frac{1}{Z_6} sh\gamma l \cdot A_{mp} + ch\gamma l \cdot C_{mp}\right), \\ B_0 = A_{mn}B_{01} + B_{mn}D_{01} = A_{mn}(ch\gamma l \cdot B_{mp} + Z_6 sh\gamma l \cdot D_{mp}) + B_{mn}\left(\frac{1}{Z_6} sh\gamma l \cdot B_{mp} + ch\gamma l \cdot D_{mp}\right), \\ C_0 = C_{mn}A_{01} + D_{mn}C_{01} = C_{mn}(ch\gamma l \cdot A_{mp} + Z_6 sh\gamma l \cdot C_{mp}) + D_{mn}\left(\frac{1}{Z_6} sh\gamma l \cdot A_{mp} + ch\gamma l \cdot C_{mp}\right), \\ D_0 = C_{mn}B_{01} + D_{mn}D_{01} = C_{mn}(ch\gamma l \cdot B_{mp} + Z_6 sh\gamma l \cdot D_{mp}) + D_{mn}\left(\frac{1}{Z_6} sh\gamma l \cdot B_{mp} + ch\gamma l \cdot D_{mp}\right). \end{cases} \quad (2.44)$$

На рис. 2.10 представлена основная схема замещения рельсовой цепи:

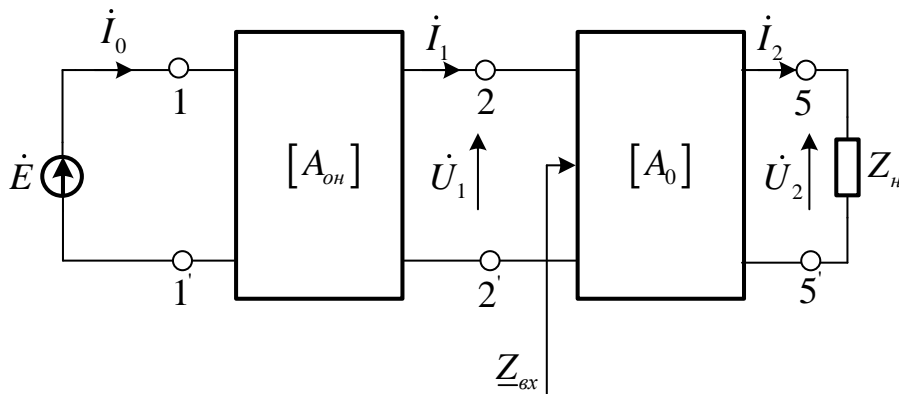


Рисунок 2.10 – Основная схема замещения рельсовой цепи

Предлагаемый в работе метод вычисления сопротивления ТПС предполагает измерения напряжения и тока  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{I}_1$  и  $\dot{U}_2$  на зажимах 2–2' и 5–5', (рис. 2.10),

поэтому определим уравнения состояний (математические модели) с использованием основной схемы замещения:

$$\dot{E} = A_{он} \dot{U}_1 + B_{он} \dot{I}_1, \quad (2.45)$$

Произведем замену в выражении (2.45):

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 Z_{ex}, \\ \dot{E} &= A_{он} \dot{I}_1 Z_{ex} + B_{он} \dot{I}_1 = \dot{I}_1 (A_{он} Z_{ex} + B_{он}), \end{aligned} \quad (2.46)$$

а ток

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{A_{он} Z_{ex} + B_{он}}. \quad (2.47)$$

Входное сопротивление  $Z_{ex}$  определяется как:

$$Z_{ex} = \frac{A_o \dot{Z}_H + B_o}{C_o \dot{Z}_H + D_o}. \quad (2.48)$$

Подставив (2.48) в (2.47), получим:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}(C_o \dot{Z}_H + D_o)}{A_{он}(A_o \dot{Z}_H + B_o) + B_{он}(C_o \dot{Z}_H + D_o)}. \quad (2.49)$$

Напряжение  $\dot{U}_1$  выразим через ток  $\dot{I}_1$  в (2.38), получим:

$$\dot{E} = A_{он} \dot{U}_1 + \frac{B_{он} \dot{U}_1}{Z_{ex}} = \dot{U}_1 \frac{(A_{он} Z_{ex} + B_{он})}{Z_{ex}}. \quad (2.50)$$

Подставим (2.42) в (2.40), получим модель для напряжения:

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{E}(A_o \dot{Z}_H + B_o)}{A_{он}(A_o \dot{Z}_H + B_o) + B_{он}(C_o \dot{Z}_H + D_o)}. \quad (2.51)$$

Математическая модель комплексной амплитуды напряжения на выходе рельсового четырехполюсника участка приближения:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E} \cdot Z_H}{(C_o Z_H + D_o) Z_o + A_o Z_H + B_o} \quad (2.52)$$

С учётом (2.44) и (2.49, 2.51, 2.52) получим математические модели входных и выходных электрических параметров рельсовой линии, являющихся информативными параметрами в комплексной форме:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_1 = \dot{E} & \left\{ \left[ C_{mH} (ch\gamma\ell \cdot A_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot C_{mp}) + D_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot A_{mp} + ch\gamma\ell \cdot C_{mp} \right) \right] Z_H + \right. \\
& \left. + C_{mH} (ch\gamma\ell \cdot B_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot D_{mp}) + D_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot B_{mp} + ch\gamma\ell \cdot D_{mp} \right) \right\} / \\
A_{oH} & \left\{ \left[ A_{mH} (ch\gamma\ell \cdot A_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot C_{mp}) + B_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot A_{mp} + ch\gamma\ell \cdot C_{mp} \right) \right] Z_H + \right. \\
& \left. + A_{mH} (ch\gamma\ell \cdot B_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot D_{mp}) + B_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot B_{mp} + ch\gamma\ell \cdot D_{mp} \right) \right\} + \\
& + B_{oH} \left\{ \left[ C_{mH} (ch\gamma\ell \cdot A_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot C_{mp}) + D_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot A_{mp} + ch\gamma\ell \cdot C_{mp} \right) \right] Z_H + \right. \\
& \left. + C_{mH} (ch\gamma\ell \cdot B_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot D_{mp}) + D_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot B_{mp} + ch\gamma\ell \cdot D_{mp} \right) \right\}. \tag{2.53}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{U}_1 = \dot{E} & \left\{ \left[ A_{mH} (ch\gamma\ell \cdot A_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot C_{mp}) + B_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot A_{mp} + ch\gamma\ell \cdot C_{mp} \right) \right] Z_H + \right. \\
& \left. + A_{mH} (ch\gamma\ell \cdot B_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot D_{mp}) + B_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot B_{mp} + ch\gamma\ell \cdot D_{mp} \right) \right\} / \\
A_{oH} & \left\{ \left[ A_{mH} (ch\gamma\ell \cdot A_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot C_{mp}) + B_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot A_{mp} + ch\gamma\ell \cdot C_{mp} \right) \right] Z_H + \right. \\
& \left. + A_{mH} (ch\gamma\ell \cdot B_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot D_{mp}) + B_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot B_{mp} + ch\gamma\ell \cdot D_{mp} \right) \right\} + \\
& + B_{oH} \left\{ \left[ C_{mH} (ch\gamma\ell \cdot A_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot C_{mp}) + D_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot A_{mp} + ch\gamma\ell \cdot C_{mp} \right) \right] Z_H + \right. \\
& \left. + C_{mH} (ch\gamma\ell \cdot B_{mp} + Z_\epsilon sh\gamma\ell \cdot D_{mp}) + D_{mH} \left( \frac{1}{Z_\epsilon} sh\gamma\ell \cdot B_{mp} + ch\gamma\ell \cdot D_{mp} \right) \right\}. \tag{2.54}
\end{aligned}$$

$$\dot{U}_2 = \frac{E \cdot Z_H}{\left\{ [C_{mH} (ch\gamma\ell \cdot A_{mp} + Z_B sh\gamma\ell \cdot C_{mp}) + D_{mH} \left( \frac{1}{Z_B} sh\gamma\ell \cdot A_{mp} + ch\gamma\ell \cdot C_{mp} \right)] \right\}} \times$$

$$\times \frac{\quad}{Z_H + [C_{mH} (\operatorname{ch} \gamma l \cdot B_{mp} + Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot D_{mp}) + D_{mH} (\frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \cdot B_{mp} + \operatorname{ch} \gamma l \cdot D_{mp})]} \times$$

$$\times \frac{\quad}{Z_o + [A_{mH} (\operatorname{ch} \gamma l \cdot A_{mp} + Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot C_{mp}) + B_{mH} (\frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \cdot A_{mp} + \operatorname{ch} \gamma l \cdot C_{mp})]} \times$$

$$\times \frac{\quad}{Z_H + [A_{mH} (\operatorname{ch} \gamma l \cdot B_{mp} + Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot D_{mp}) + B_{mH} (\frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \cdot B_{mp} + \operatorname{ch} \gamma l \cdot D_{mp})]} .$$

Раскроем скобки:

$$\dot{U}_2 = \frac{E \cdot Z_H}{C_{mH} \cdot \operatorname{ch} \gamma l \cdot A_{mp} Z_H Z_o + C_{mH} Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot C_{mp} Z_H Z_o + D_{mH} \cdot \frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \cdot A_{mp} Z_H Z_o}$$

---


$$+ D_{mH} \cdot \operatorname{ch} \gamma l \cdot C_{mp} Z_H Z_o + C_{mH} \cdot \operatorname{ch} \gamma l \cdot B_{mp} Z_o + C_{mH} Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot D_{mp} Z_o + D_{mH} \cdot \frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \cdot B_{mp} Z_o +$$

---


$$+ D_{mH} \cdot \operatorname{ch} \gamma l \cdot D_{mp} Z_o + A_{mH} \cdot \operatorname{ch} \gamma l \cdot A_{mp} Z_H + A_{mH} Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot C_{mp} Z_H + B_{mH} \cdot \frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \cdot A_{mp} Z_H +$$

---


$$+ B_{mH} \cdot \operatorname{ch} \gamma l \cdot C_{mp} Z_H + A_{mH} \cdot \operatorname{ch} \gamma l \cdot B_{mp} + A_{mH} Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot D_{mp} + B_{mH} \cdot \frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \cdot B_{mp} B_H \cdot \operatorname{ch} \gamma l \cdot D_{mp}$$

Преобразуем выражение:

$$\dot{U}_2 = \frac{E \cdot Z_H}{A_{mH} (\operatorname{ch} \gamma l \cdot A_{mp} Z_H + Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot C_{mp} Z_H + \operatorname{ch} \gamma l \cdot B_{mp} + Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot D_{mp}) + B_{mH} (\frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \times$$

---


$$\times A_{mp} Z_H + \operatorname{ch} \gamma l \cdot C_{mp} Z_H + \frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \cdot B_{mp} + \operatorname{ch} \gamma l \cdot D_{mp}) + C_{mH} (\operatorname{ch} \gamma l \cdot B_{mp} Z_o + Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot D_{mp} Z_o +$$

---


$$+ \operatorname{ch} \gamma l \cdot A_{mp} Z_H Z_o + Z_B \operatorname{sh} \gamma l \cdot C_{mp} Z_H Z_o) + D_{mH} (\frac{1}{Z_B} \cdot \operatorname{sh} \gamma l \cdot A_{mp} Z_H Z_o + \operatorname{ch} \gamma l \cdot C_{mp} Z_H Z_o +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \cdot B_{mp} Z_o + \operatorname{ch} \gamma l \cdot D_{mp} Z_o) = \frac{E \cdot Z_H}{A_{mH} (\operatorname{ch} \gamma l \cdot A_{mp} Z_H + \operatorname{ch} \gamma l \cdot B_{mp} + C_{mp} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_H Z_B +} \\
& \frac{+ D_{mp} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_B) + B_{mH} (A_{mp} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_H \frac{1}{Z_B} + B_{mp} \operatorname{sh} \gamma l \frac{1}{Z_B} + C_{mp} \operatorname{ch} \gamma l \cdot Z_H + D_{mp} \operatorname{ch} \gamma l) +}{+ C_{mH} (A_{mp} \operatorname{ch} \gamma l \cdot Z_H Z_o + B_{mp} \operatorname{ch} \gamma l \cdot Z_o + C_{mp} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_H Z_o Z_B + D_{mp} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_o Z_B) +} \\
& \frac{+ D_{mH} (A_{mp} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_H Z_o \frac{1}{Z_B} + B_{mp} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_o \frac{1}{Z_B} + C_{mp} \operatorname{ch} \gamma l \cdot Z_H Z_o + D_{mp} \operatorname{ch} \gamma l \cdot Z_o)}{=} \\
& = \frac{E \cdot Z_H}{A_{mH} [\operatorname{ch} \gamma l (A_{mp} Z_H + B_{mp}) + \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_B (C_{mp} Z_H + D_{mp})] + B_{mH} [\operatorname{sh} \gamma l \frac{1}{Z_B} (A_{mp} Z_H + B_{mp}) +} \\
& \frac{+ \operatorname{ch} \gamma l (C_{mp} Z_H + D_{mp})] + C_{mH} [\operatorname{ch} \gamma l \cdot Z_o (A_{mp} Z_H + B_{mp}) + \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_H Z_B (C_{mp} Z_H + D_{mp})] +} \\
& \frac{+ D_{mH} [\operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_o \frac{1}{Z_B} (A_{mp} Z_H + B_{mp}) + \operatorname{ch} \gamma l \cdot Z_o (C_{mp} Z_H + D_{mp})]}{.}
\end{aligned}$$

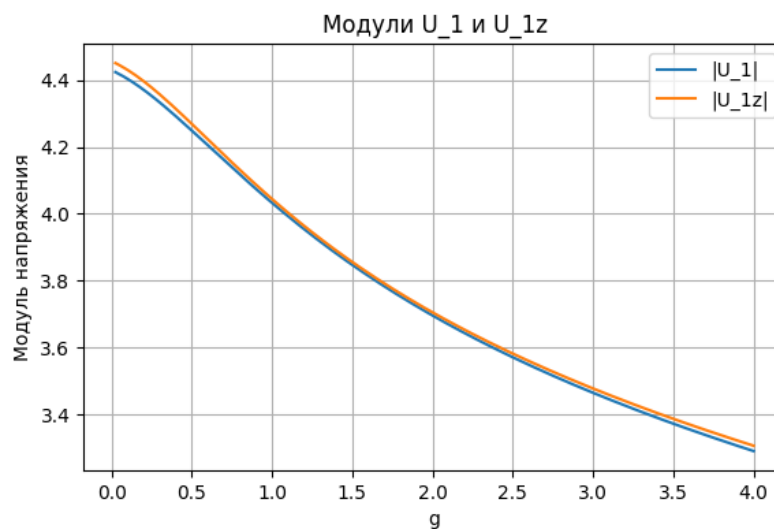
Итогом вычислений служит формула:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_2 &= \frac{E \cdot Z_H}{(A_{mp} Z_H + B_{mp}) (A_{mH} \operatorname{ch} \gamma l + B_{mH} \operatorname{sh} \gamma l \frac{1}{Z_B} + C_{mH} \operatorname{ch} \gamma l \cdot Z_o + D_{mH} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_o \frac{1}{Z_B}) +} \\
& \frac{(C_{mp} Z_H + D_{mp}) (A_{mH} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_B + B_{mH} \operatorname{ch} \gamma l + C_{mH} \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_o Z_B + D_{mH} \operatorname{ch} \gamma l \cdot Z_o)}{=} \\
& = \frac{E \cdot Z_H}{(A_{mp} Z_H + B_{mp}) [\operatorname{ch} \gamma l (A_{mH} + C_{mH} Z_o) + \operatorname{sh} \gamma l \cdot \frac{1}{Z_B} (B_{mH} + D_{mH} Z_o)] + (C_{mp} Z_H + D_{mp}) \times} \\
& \frac{\times [\operatorname{ch} \gamma l (B_{mH} + D_{mH} Z_o) + \operatorname{sh} \gamma l \cdot Z_B (A_{mH} + C_{mH} Z_o)]}{.}
\end{aligned}$$

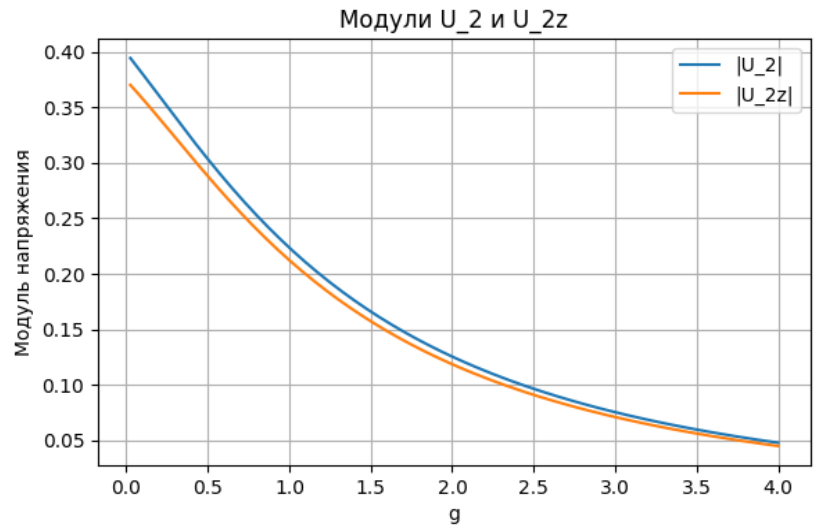
Машинная программа исследования изменения входных и выходных электрических параметров рельсовой линии с использованием программно-математического пакета Python представлена в приложении А.

Задача моделирования двух вариантов схемы замещения – замещение РЛ одним четырехполюсником с параметрами  $Z_{pl} = 0,8e^{65^\circ}$  при  $l = 1$  км, учитывающим равномерно распределенную (однородную) схему и замещение  $n$ -четырёхполюсниками с  $l = 25$  м (длина стандартного звена РЛ) с сосредоточенными сопротивлениями ТПС, заключается в оценке зависимости изменений входных и выходных параметров рельсового четырехполюсника и вида схемы замещения. Автором проведены машинные исследования входных и выходных электрических параметров РЛ при замещении всей рельсовой линии одним четырехполюсником с однородными параметрами длиной 2,5 км и при представлении РЛ как  $n$  – четырехполюсников длиной  $l/n$  в нормальном режиме.

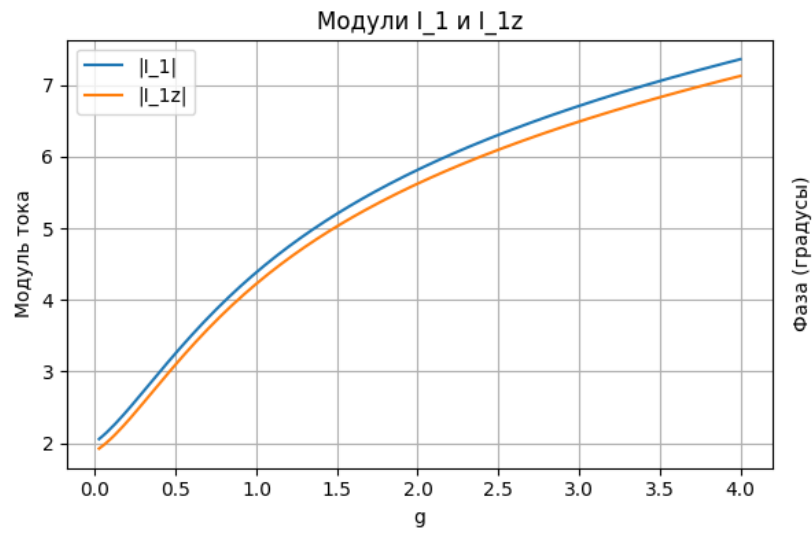
В приложении Б представлены сводные таблицы результатов исследований, а графическое представление изменения модулей напряжений на входе, выходе и тока на входе РЛ, при частоте тока опроса рельсовых линий 50 Гц представлены на рис. 2.10 а, 2.10 б и 2.10 в, графики изменения фаз напряжений и токов на 2.10 г.



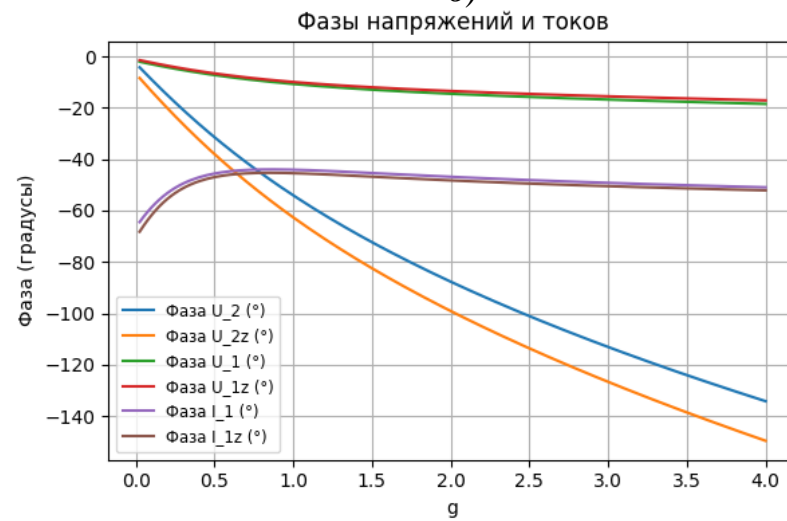
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.11 – Результаты машинного исследования изменения модулей и фаз напряжения и тока на входе и выходе РЛ на частоте 50 Гц

Как следует из графиков, представленных на рис. 2.11 а-г, с увеличением проводимости изоляции модули напряжения на выходе и входе РЛ уменьшаются, а ток увеличивается, что подтверждает зависимости входных сопротивлений РЛ  $Z_{ex} = f(g)$ . При этом, функции напряжений и токов зависят от схемы замещения РЛ и у распределенно – дискретных схем напряжения и токи имеют меньшие значения, обусловленные влиянием сопротивлений ТПС.

В таблице 2.1 представлены максимальные абсолютные и относительные погрешности вычисления выходных электрических параметров РЛ, выраженные математическими моделями с равномерно распределенными и дискретно распределенными схемами замещения рельсовых линий.

Таблица 2.1 – Результаты оценки погрешностей замещения рельсовой линии различными схемами

| Абс.<br>ошибка<br>$ U_2 $ | Абс.<br>ошибка<br>фазы $U_2$ | Абс.<br>ошибка<br>$ U_1 $ | Абс.<br>ошибка<br>фазы $U_1$ | Абс.<br>ошибка $ I_1 $ | Абс.<br>ошибка<br>фазы $I_1$ |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| 0,02425                   | 15,39577                     | 0,027029                  | 1,376091                     | 0,233728               | 3,76717                      |
| Отн.<br>ошибка<br>$ U_2 $ | Отн.<br>ошибка<br>фазы $U_2$ | Отн.<br>ошибка<br>$ U_1 $ | Отн.<br>ошибка<br>фазы $U_1$ | Отн.<br>ошибка $ I_1 $ | Отн.<br>ошибка<br>фазы $I_1$ |
| 6,149441                  | 97,581792                    | 0,610994                  | 29,186651                    | 6,59324                | 5,843605                     |

Анализ погрешностей показал, что при частоте тока опроса РЛ 50 Гц и длине элементарного четырехполюсника РЛ – 25 м или 0,025 км и  $n = 200$ , напряжения и токи на входе  $\dot{U}_1$  и  $\dot{I}_1$  и выходе  $\dot{U}_2$  РЛ уменьшаются, в частности:

- относительная погрешность модуля напряжения на выходе РЛ на 6,149 %;
- относительная погрешность напряжения на входе РЛ на 0,610 %;
- относительная погрешность тока на входе РЛ на 6,593 %;

- относительная погрешность фазы напряжения на выходе РЛ на 97,582 %;
- относительная погрешность фазы тока на входе РЛ на 5,844 %.

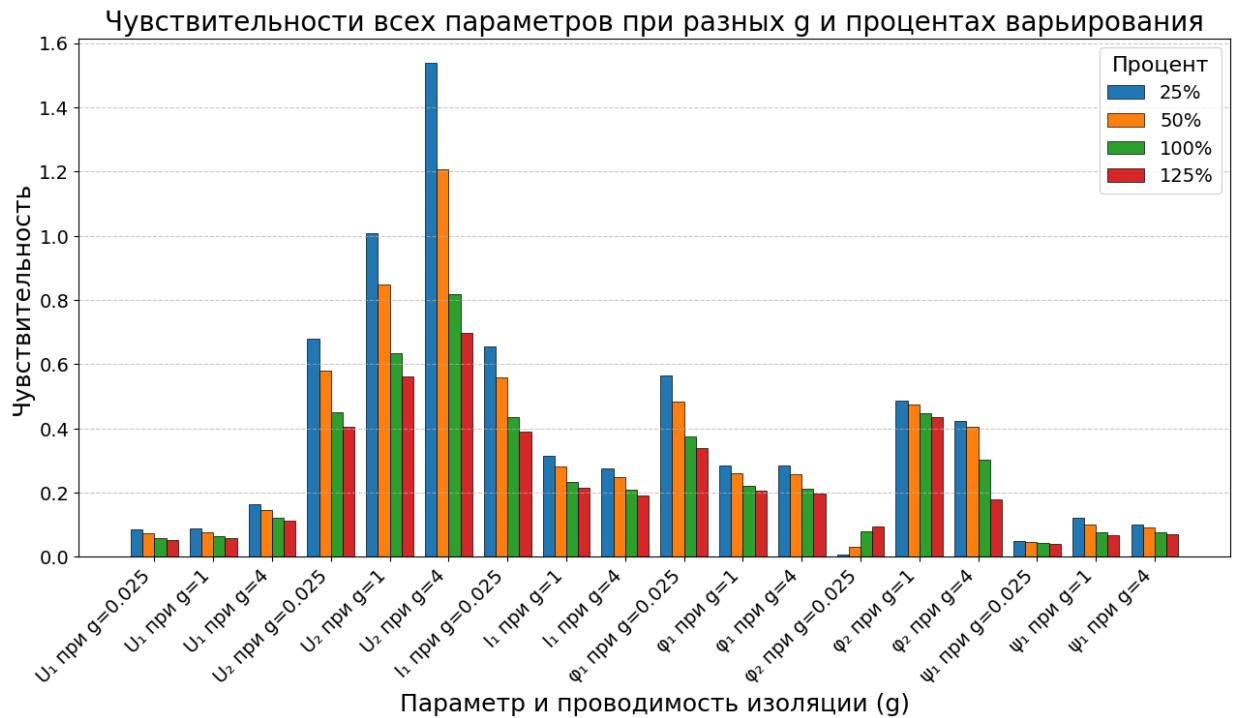


Рисунок 2.12 – Результаты оценки чувствительности электрических параметров при разных показателях проводимости изоляции

Таким образом, для получения более точных результатов при синтезе СТДМ схему замещения рельсовой линии необходимо представить как каскадное соединение  $n$  - четырехполюсников рельсовых линий, соединенных между собой четырехполюсниками стыковых соединителей.

## Выводы по второй главе

1. Разработка математических моделей входных и выходных параметров РЛ при диагностике сопротивлений ТПС предполагает рассмотрение рельсовой линии как длинной линии, характеризующейся внутренними, внешними и выходными параметрами, описываемыми выражением  $\bar{P}(\bar{W}, \bar{H}, \bar{Q}) = 0$ , где  $W = \{r_o, L_o, g_o, C_o\}$ ,

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}, \quad Q = \{\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2\}, \quad \text{а компонента } \bar{P} \text{ является оператором,}$$

определяющим вид схемы замещения РЛ.

2. Информационное описание состояний РЛ через первичные признаки, характеризующие состояния РЛ, формирует множество, включающее в себя измеряемые значения  $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2$ , зависящие от полной проводимости изоляции  $Y_{из} = g_o + j\omega C_o$  и полного продольного сопротивления  $Z_{пл} = r_o + j\omega L_o$ , что позволяет синтезировать устройства распознавания сопротивлений рельсовых линий.

3. Предложено схему замещения рельсовой линии реализовать в виде каскадно соединенных сопротивлений ТПС и рельсовых линий с равномерно распределенными параметрами. Проведенные машинные исследования выходных электрических параметров РЛ показали, что результаты моделирования рельсовой линии с равномерно распределенными параметрами и дискретно – распределенными параметрами отличаются по относительной погрешности  $|U|_2 \leq 6,149\%$ ,  $|U|_1 \leq 0,611\%$ ,  $|I|_1 \leq 6,593\%$ , а фазы  $\varphi_{U_2} \leq 95,582\%$ ,  $\varphi_{U_1} \leq 29,187\%$  и  $\psi_{I_1} \leq 5,843$ .

4. Проведенные исследования разработанных различных математических моделей устанавливают требования необходимости при синтезе устройства распознавания сопротивлений ТПС представить рельсовую линию как каскадное сопротивление  $n$  – четырехполюсников рельсовых линий, соединенных между собой четырехполюсниками стыковых соединителей.

### 3 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ РАСПОЗНАВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЫКОВ

Состояния ТПС могут быть непрерывно определены принципами распознавания образов, суть которых заключается в непрерывном измерении электрических параметров рельсовой линии, зависящих от сопротивления стыков  $M_{u,i} = f(r_{st})$ , формирования из измеренной информации множества первичных признаков, составляющих образы состояний  $X_{ij} = M_{u,i}$ , являющихся аргументами решающей функции определения величины сопротивления стыков  $R_{st}(X_{ij}) = f\{M_{u,i}\}$ , с использованием решающего правила:

$$R_{stx} = \begin{cases} r_0, & \text{if } d(x_i) \in X_{ij;0}, \\ r_1, & \text{if } d(x_i) \in X_{ij;1}, \\ \dots & \dots \\ r_m, & \text{if } d(x_i) \in X_{ij;m}. \end{cases} \quad (3.1)$$

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.

Рассмотрим некоторые понятия и терминологию теории распознавания образов применительно к непрерывному определению сопротивления ТПС.

Информационным обеспечением распознавания образов, характеризующих сопротивления рельсовых линий, являются первичные признаки  $(r_0, r_1, \dots, r_m) \equiv (U_1, \varphi_1, I_1, \psi_1, U_2, \varphi_2)$ , в качестве которых используются множество входных и выходных электрических параметров сигнала опроса рельсовой линии, характеризующие состояния объекта распознавания – сопротивления ТПС в любой момент времени [58-59]. Применительно к поставленной задаче – оценке изменения продольного сопротивления рельсовой линии, из-за изменения

сопротивления ТПС, размерность пространства признаков величина регулируемая и она может быть изменена в зависимости от требуемой точности определения сопротивления ТПС, определения локации расположения неоднородности рельсовой линии из-за изменения сопротивления одного или нескольких стыков. Размерность пространства признаков может быть расширена применением обобщенных признаков, когда в качестве признаков используются элементарные функции двух аргументов – электрических параметров рельсовой линии [60 – 61].

Множество информативных первичных признаков в любой момент времени составляют образ состояний объекта  $X_i = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ , где  $x_i$  – единичный признак, применительно к задаче – модуль напряжения или тока на входе рельсовой линии, или их начальная фаза  $X_i = \{U_1, \varphi_1, I_1, \psi_1, U_2, \varphi_2\}$ .

Состояние объекта распознавания в любой момент времени характеризует класс состояний, применительно поставленной задаче, некоторый класс, с центрами  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$  или иначе сопротивление [62-64]. Применительно к непрерывности определения сопротивления ТПС, удобнее всего воспользоваться терминологией классового анализа, т.к. величина сопротивления ТПС определяется в дискретных отрезках значений сопротивлений в определенном диапазоне, т.к. диапазон изменения значительный, поэтому удобно весь диапазон разделить на конечное число классов с центрами классов  $r_i$ , применяемыми при машинном обучении устройства непрерывного вычисления сопротивления стыков. Данный прием позволяет сократить длину обучающей выборки, и повысить точность определения сопротивления, за счет уменьшения размерности системы неопределенных уравнений [65].

Применительно к распознаванию сопротивления ТПС в качестве классов можно применить множество априорно назначенных сопротивлений ТПС с величинами сопротивлений, превышающих нормативные значения, принадлежность образа представляется через решающую функцию  $d(X_i) \in R_i$ , а образ формируется через электрические измеряемые параметры рельсовой линии.

Параметрами, отличающими один образ от другого, можно описать через признаки  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , которые формируют вектор признаков образ состояний. Совокупность всех признаков в образах составляет образ.

Из изложенного следует, что для построения системы контроля сопротивления ТПС на первом этапе необходимо:

- определить набор измеряемых информативных признаков, зависящих от изменения сопротивления ТПС;
- моделировать образы состояний, для этого разработать математические модели информативных признаков.

Из курса теории рельсовых цепей [7] известно, что при изменении продольного сопротивления рельсовой линии изменяются напряжения и токи на входе и выходе рельсовой линии:

$$\dot{U}_1 = U_1 e^{j\varphi_1}, \dot{I}_1 = I_1 e^{j\psi_1}, \dot{U}_2 = U_2 e^{j\varphi_2}, \dot{I}_2 = I_2 e^{j\psi_2}.$$

Однако при распознавании сопротивления ТПС, токи на выходе рельсовой линии не могут быть использованы в качестве информативных признаков, т.к. они сильно коррелированы с напряжением на выходе рельсовой линии  $U_2$  через закон Ома, при постоянстве величины двухполюсника сопротивления нагрузки.

### **3.1 Основные принципы восстановления зависимостей – диагностических функций сопротивлений токопроводящих стыков**

Восстановление зависимостей представляет раздел машинного обучения, формирующее математические модели функций, в данном случае диагностических функций, описывающих зависимости между функцией и изменяемым параметром – сопротивлением токопроводящего стыка. Суть проблемы восстановления зависимости заключается в том, что имеется выборка входных и выходных электрических параметров рельсового четырехполюсника, зависящих от сопротивления ТПС, но неизвестна конкретная величина сопротивления ТПС, поэтому необходимо синтезировать диагностическую функцию, достоверно

отражающую реальную величину сопротивления токопроводящего стыка. При восстановлении функциональных зависимостей выходной диагностической функции от изменения параметров схемы (сопротивления ТПС) могут быть выделены различные постановки задач, которые при параметрической диагностике сводятся к минимизации относительной погрешности диагностики. Применительно к диагностике ТПС – задача восстановления зависимостей сводится к синтезу диагностической функции вида:

$$R_{st}(X) = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^n x_i x_j C_{ij}, \quad (3.2)$$

где  $X$  – образы состояний;

$x_i, x_j$  – информативные признаки;

$C_{ij}$  – коэффициенты полинома диагностической функции.

Токопроводящий стык представляется как сложная компонента схемы и характеризуется рядом параметров, одни из которых являются основными – рельсовые линии в комплексе ТПС, другие – второстепенные – различные согласующие устройства по концам рельсовой линии. Кроме этого, на величину диагностируемого ТПС влияют различные возмущения в виде изменения проводимости изоляции, колебания величины напряжения источника питания и т.д.

Поэтому задача построения диагностической функции (3.2) формулируется следующим образом: требуется синтезировать диагностическую функцию, инвариантную к возмущающим воздействиям и достоверно (с минимальной относительной погрешностью) распознающую состояния сопротивления токопроводящего стыка.

Рассмотрим состояния токопроводящего стыка. Токопроводящий стык является неисправным, если его параметры (применительно к поставленной задаче) сопротивления находятся в некоторых заданных параметрах. Выход за пределы заданных параметров приводит к состоянию «неисправен».

В данном контексте сопротивление ТПС понимается как комплекс сопротивлений ветвей протекания тока через накладку через приварной соединитель и через обводной штепсельный соединитель.

ТПС относительно пропуска тока работоспособен, если его основные параметры – сопротивления ветвей растекания токов – находятся в пределах заданной нормы, и его величина, в целом, находится в заданном (нормативном) диапазоне. Утрата работоспособности – обрыв соединителей, ухудшение контакта накладки с рельсами – приводит к увеличению сопротивления ТПС, соответственно, продольного сопротивления рельсовой линии, приводящего к отказу рельсовой цепи.

Относительно конкретного стыка с повышенным сопротивлением применима терминология «отказ» токопроводящего стыка. Очевидно понятие «отказ элемента» рельсовой цепи в определенной мере условно. В действительности, работоспособность ТПС определяется значениями основных его параметров, определяющих сопротивление. В это же время набор параметров (параллельных ветвей протекания сигнального тока) и зоны их нормальных значений определяются в зависимости от технологических требований и условий изготовления, эксплуатационных условий и степени важности каждой компоненты ТПС. Известно, что обоснование зон нормальных значений основных путей протекания сигнального тока связано с определенными трудностями, обусловленными широкой номенклатурой соединителей, технологией сварки и т.д.

Выделение в состоянии ТПС только двух состояний «работоспособное» и «отказавшее» представляется идеализированным, хотя между этими состояниями имеется множество предотказных состояний со степенью важности зоны предотказа.

Таким образом, при распознавании состояния сопротивления ТПС они характеризуются двумя классами: исправного (работоспособного) и отказавшего, с множеством подклассов от исправного до отказавшего состояний (рис.3.1).

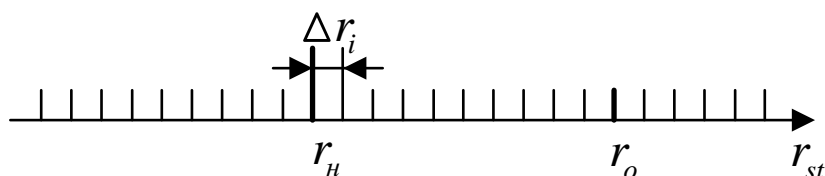


Рисунок 3.1 – Графическая иллюстрация состояний сопротивлений токопроводящих стыков

В соответствии с рис.3.1, значительный интерес представляет зона от нормативных сопротивлений  $r_n$  до сопротивлений, характеризующих отказ  $r_{om}$ , и эта зона представляет подкласс предотказных состояний, подлежащих распознаванию.

Методика распознавания сопротивлений ТПС реализуется по схеме, отображенной на рис. 3.2:

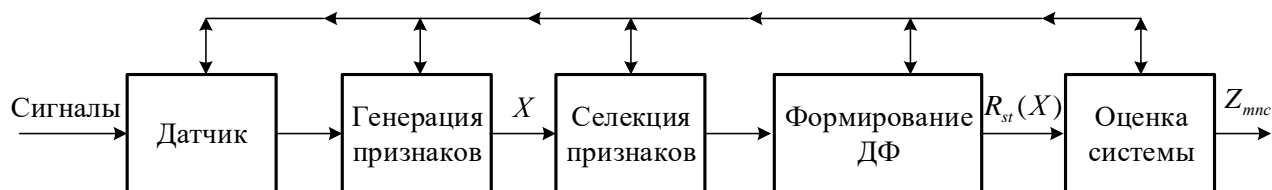


Рисунок 3.2 – Обобщенная схема методики распознавания сопротивления ТПС

Алгоритм методики предполагает решение следующих вопросов:

1. Задача генерации информативных признаков предполагает выделение из множества сигналов выбор тех, которые достаточно полно описывают образ (состояния ТПС в  $i$  – ый момент времени);
2. Задача выделения наиболее полезных признаков – отбор, селекция и ранжирование наиболее полезных и информативных признаков из множества  $m_x$ ;
3. Задача обучения диагностической функции (ДФ) решается посредством разделения пространства признаков на обучающую, тестовую и контрольную, выбора вида и сложности ДФ и ее обучения;

4. Задача количественной оценки правильности распознавания сопротивления посредством анализа относительной погрешности вычисления сопротивления ТПС.

### 3.2 Основные этапы параметрического синтеза диагностической функции

Основой системы технической диагностики и мониторинга сопротивлений ТПС является формирование диагностической функции минимальной сложности, достоверно позволяющей распознавать сопротивления ТПС.

Параметрический синтез диагностической функции ТПС предполагает формирование оптимальной диагностической функции  $R_{st_0}(X)$  с учетом информативных параметров – признаков, т.е. построения системы «информативные признаки – диагностическая функция». Основой параметрического синтеза являются математические модели, адекватно отражающие реальные процессы, протекающие в РЛ. Адекватная математическая модель дает возможность реализовать итерационный процесс синтеза оптимальной ДФ, позволяющей с требуемой точностью вычислять сопротивления ТПС.

На рис. 3.3 представлены этапы и задачи синтеза оптимальной диагностической функции.

Рассмотрим последовательность выполнения итерационного процесса синтеза  $R_{st_0}(X)$ .

I. Математические модели объекта исследования – ТПС представляются в комплексе полного продольного сопротивления РЛ в форме матриц  $[A]$  параметров. Рельсовые линии рассматриваются как однородные длинные линии, описываемые уравнениями состояний (телеграфными уравнениями) в дифференциальной форме.

Математические модели позволяют формировать пространства первичных признаков  $\dot{U}_1 = (t, x), \dot{U}_2 = (t, x), \dot{I}_1 = (t, x)$ , однозначно зависящих от продольного

сопротивления рельсовой линии, в том числе от сопротивления ТПС  $r_{st}$ , и их координат расположения (локации).

II. Формирование множества классов предполагает определение границ пространства классов: границы исправного состояния, переходящего в предотказное  $r_n$ , границы перехода предотказного состояния в отказавшее состояние токопроводящего стыка  $r_{om} = r_{st} \kappa$ , где  $\kappa$  – коэффициент, определяющий кратное увеличение сопротивления ТПС, при котором происходит отказ рельсовой цепи. Как отмечено выше, при диагностике представляет интерес диапазон от  $r_n$  до  $r_{om}$ , т.е. зона предотказного состояния.

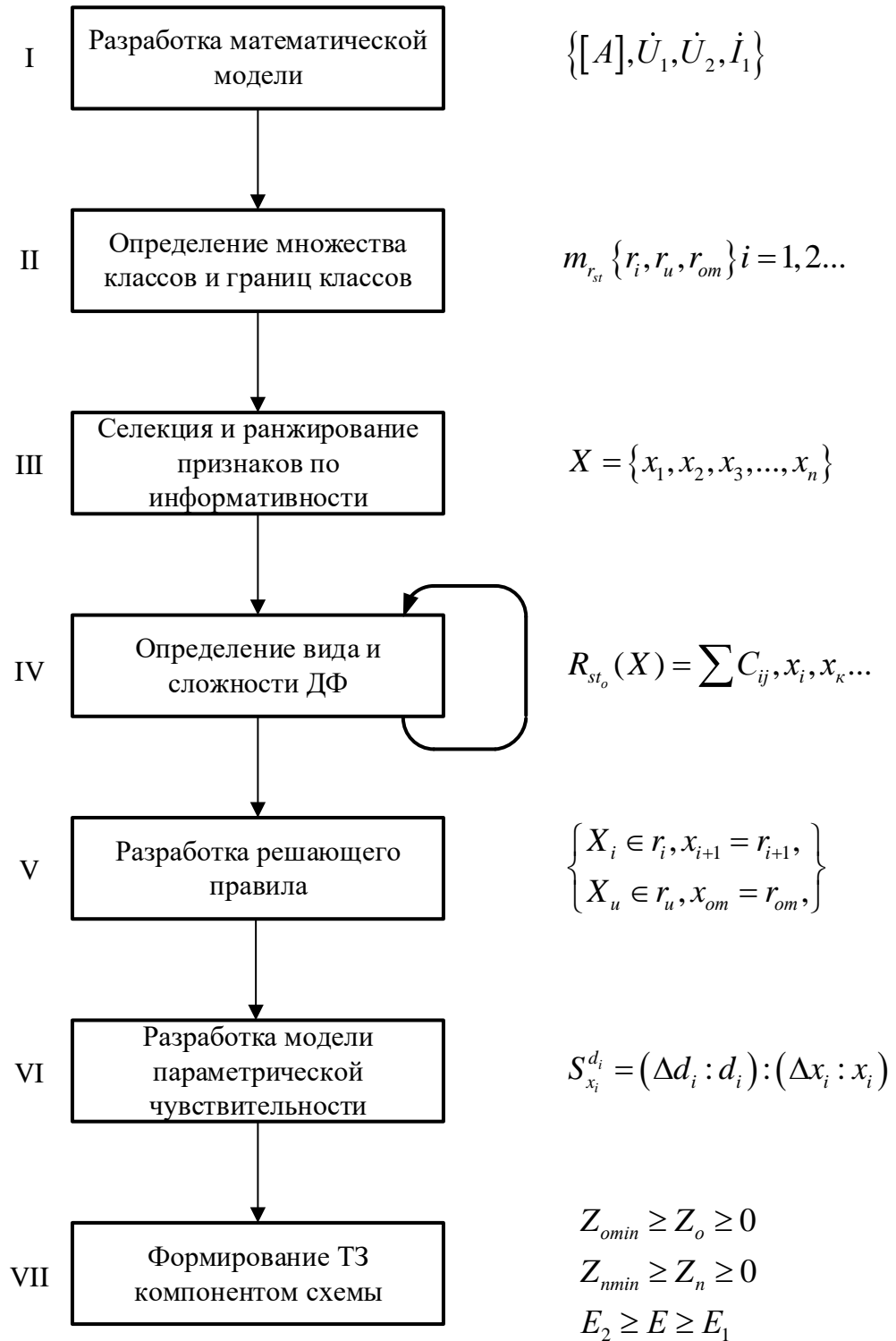


Рисунок 3.3 – Итерационный процесс синтеза ДФ

При этом множество классов сопротивлений представляется как

$$M_{r_{st}} = \{r_n, r_1, r_2, \dots, r_n, r_{om}\} \quad (3.3)$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_n$  – представляют собой небольшие приращения сопротивлений ТПС, например  $r_2 = r_1 + \Delta r$ ,  $r_3 = r_2 + \Delta r$ , а  $\Delta r$  выбирается по условиям корректного машинного обучения ДФ.

Если рассматривать формирование классов с позиции информативных признаков, имеем:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{1i} &= f(t, x_i, r_i), & \dot{I}_{1i} &= f(t, x_i, r_i), & \dot{U}_{2i} &= f(t, x_i, r_i), \\
 \dot{U}_{1j} &= f(t, x_j, r_j), & \dot{I}_{1j} &= f(t, x_j, r_j), & \dot{U}_{2j} &= f(t, x_j, r_j), \\
 \dot{U}_{1k} &= f(t, x_k, r_k), & \dot{I}_{1k} &= f(t, x_k, r_k), & \dot{U}_{2k} &= f(t, x_k, r_k), & (3.4) \\
 \dots & & \dots & & \dots & \\
 \dot{U}_{1n} &= f(t, x_n, r_n), & \dot{I}_{1n} &= f(t, x_n, r_n), & \dot{U}_{2n} &= f(t, x_n, r_n),
 \end{aligned}$$

Необходимо обратить внимание, что значения информативных признаков из множества (3.4) при формировании обучающей тестовой и контрольной выборок друг от друга отличаются.

III. Этап селекции и ранжирования признаков предполагает формирование рабочего множества информативных признаков из априорного словаря признаков. В настоящее время используется два этапа формирования рабочего словаря признаков:

- на первом этапе осуществляется формирование пространства признаков максимальной размерности  $R^N$  – max ;
- на втором этапе осуществляется отбор (селекция) наиболее информативных признаков согласно цели исследования с размерностью  $r^n < R^N$ , где  $n, N$  – размерности пространства признаков,  $r, R$  – пространства признаков априорного и рабочего множества, соответственно.

При селекции и ранжировании признаков используются два подхода: процедура осуществляется вне системы распознавания и с участием распознающих свойств обученного классификатора. В первом случае селекция осуществляется вне зависимости от цели распознавания, а во втором – с учетом назначения системы распознавания, например, при диагностике сопротивлений ТПС, используется эффект увеличения продольного сопротивления рельсовой линии. И,

следовательно, оценивается параметрическая чувствительность выходной функции.

Оценка параметрической чувствительности может органично применяться при анализе информативных свойств первичных признаков – электрических параметров четырехполюсника рельсовой линии на его входе и выходе, составляющих образы состояний, т. к. по определению под чувствительностью понимается реакция выходных параметров схемы (первичных информативных признаков:  $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2$ ) на малое изменение информативного (диагностируемого) параметра  $r_{st}$ , т.е. сопротивления ТПС [66 – 70]. Количественная оценка такой (параметрической) чувствительности оценивается коэффициентом чувствительности  $S_{(U_1, I_1, U_2)}^{r_{st}}$ .

Результатом исследования параметрической чувствительности является определение и формирование рабочего множества информативных признаков, имеющих наибольшую чувствительность к изменению диагностируемого параметра. Данный подход селекции и ранжирования признаков, предложенный автором посредством исследования параметрической чувствительности схемных функций, рассмотрен в разделе 3.3.

IV. Следующая задача, связанная с построением системы диагностики ТПС, основана на отыскании оптимальных диагностических функций. Основной функционал диагностической функции заключается в определении принадлежности измеренных и обработанных исходных данных, отражающих сопротивление ТПС к одному из классов состояний, или конкретному значению сопротивления стыка. Для этого многомерный вектор первичных информативных признаков преобразуется в образы состояний:

$X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , где  $X_i$  – образ состояний,  $x_1, x_n$  – измеренные первичные признаки, характеризующие состояние стыка с использованием некоторой функции, например, наиболее часто используемой степенной функции

$r_{st}(X) = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{n,m} C_i x_i x_j \dots$ , приводится к скалярному виду и, согласно решающего правила,

определяется текущая величина сопротивления стыка.

Из представленного принципа распознавания сопротивления ТПС следует, что устройство распознавания ТПС рассматривается как классификатор сопротивлений ТПС, когда решающее устройство однозначно в любой момент времени определяет текущее сопротивление стыка через принципы классификации.

Как и среди многих подходов к классификации и распознаванию при синтезе решающего устройства диагностики ТПС вводится множество классов состояний (представленных на рис. 3.3, где  $\Delta r_i$  – межклассовое расстояние, а  $r_i, r_j, r_k \dots r_n$  – текущее сопротивление ТПС, выраженное конкретным числовым значением. Если образы представить как  $X$ , а признаки  $x_1 \dots x_n$ , то текущий образ имеет вид  $X_i = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – измеренные электрические входные и выходные параметры рельсовой линии, однозначно зависящие от сопротивлений ТПС  $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ , где  $n$  – число классов.

Одной из особенностей данного подхода является то, что пространство сопротивлений ТПС представляется косвенным пространством образов  $R^n$ , сформированных первичными признаками  $x_{ijk}$ . Такое представление сопротивлений ТПС при диагностике их величин, определения границ предотказных и отказных состояний наиболее удобно, т. к. имеется возможность измерения значений первичных признаков  $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2$ .

Принципы формирования решающих функций приемами многомерной аппроксимации и рассмотрение вопросов обобщенных решающих функций представлены в разделе 3.5.

V. Решающее правило реализует отображение  $q: X \rightarrow R$ , где  $X$  – образ состояния,  $R$  – класс состояния, которое отождествляет соответствие элемента пространства сопротивлений ТПС из заданного априорного множества.



ТПС, неминуемо приводит к появлению разброса внешних характеристик – первичных информативных признаков, а следовательно, и диагностической функции  $R_{st}(X)$ . Поэтому встает задача учета влияния изменения параметров рельсовой цепи, а именно  $Z_o$  и  $Z_n$  и реакция  $R_{st}(X)$  на дестабилизирующие воздействия. Данная задача решается следующими способами:

– допусковый анализ: известна структура компоненты системы диагностики и нормативные значения параметров, требуется найти допуски на изменения  $R_{st}(X)$ ;

– допусковый синтез: задана структурная схема системы диагностики, нормативные параметры элементов, требуется найти допуски на точность реализации элементов;

– статистический параметрический синтез: заданы структура компоненты системы диагностики, допусковые границы изменения параметров, требуется определить номинальные значения параметров схемы;

– статистический структурный синтез: заданы граничные значения внешних характеристик и допуски на них, требуется найти структуру модуля, компоненты и номинальные параметры.

Представим диагностическую функцию в виде определенного полинома

$r_{st}(X) = \sum_{i=1}^n C_i x_i$ , зависящий от образов  $X$  и являющийся интегральной

характеристикой всех первичных информативных признаков, в данном случае измеряемых входных и выходных параметров РЛ:  $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2$ . Согласно структурной схеме рельсовой цепи блок – участка, известны номинальные параметры сопротивлений согласующих устройств в начале и в конце РЛ:  $Z_{oo}; Z_{no}$ , которому соответствует номинальная диагностическая функция  $R_{st_o}(X)$ . Из-за изменения вектора параметров согласующих устройств  $\Delta Z_{oo}, \Delta Z_{no}$ , диагностическая функция тоже изменяется на некоторую величину:

$$R_{st}(X_o + \Delta X) \quad (3.8)$$

Разложим (3.8) в многопараметрический ряд Тейлора вокруг номинальных значений в виде:

$$R_{st}(X_o + \Delta X) = R_{st}(X_o) + \frac{1}{1!} \sum_{i=1}^n \frac{\partial R_{st}(X_o)}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 R_{st}(X_o)}{\partial x_i \partial x_j} \Delta x_i \Delta x_j + \dots, \quad (3.9)$$

С учетом того, что изменения параметров компонент схемы ограничены в диапазоне  $(Z_{on} + 10\% Z_{on}) \geq Z_{on}$  и  $(Z_{mn} + 10\% Z_{mn}) \geq Z_o \geq Z_{on}$ , логично пренебречь высшими членами ряда Тейлора, тогда (3.9) принимает вид:

$$R_{st}(X_o + \Delta X) \approx R_{st}(R_{st_o}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial R_{st}(X_o)}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (3.10)$$

или

$$\Delta R_{st}(\Delta X) = R_{st}(X_o + \Delta X) - R_{st}(X_o) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial R_{st}(X_o)}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (3.11)$$

Выражение 3.11 описывает связь между разбросом параметров компонент схемы РЦ и информативными признаками.

Входящие в выражения (3.11) частные производные представляют собой коэффициент чувствительности диагностической функции к изменению параметров схем:

$$Y_i = \frac{\partial R_{st}(X_o)}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.12)$$

Несмотря на простоту выражения коэффициента чувствительности (3.12), оно обладает недостатком, его невозможно использовать для различных параметров, т. к. значение  $Y_i$  зависит от самого параметра. Поэтому введем нормативный коэффициент чувствительности в виде:

$$Y_i = \frac{\partial R_{st}(X_o) / R_{sr}(X_o)}{\partial x_i / x_{oi}} \quad (3.13)$$

Так как диагностическую функцию получить аналитически затруднительно, то в дальнейших исследованиях воспользуемся численными методами.

### 3.3 Селекция и ранжирование первичных признаков оценкой параметрической чувствительности

Решение задачи создания устройства диагностики сопротивления ТПС напрямую связана с решением задачи выделения наиболее полезных (информативных) признаков, их ранжированием и формированием рабочего словаря информативных признаков.

Состояния рельсовых линий, подлежащие ранжированию ее продольного сопротивления, обладает рядом различных качеств – признаков, и первым шагом процесса распознавания является анализ первичных признаков и определение способа их выделения.

В общем случае пространство признаков распознавания подразделяется на физические, структурные и математические.

Физические и структурные признаки, как правило, применяются в случаях, когда сведения о признаках возможно получить визуально или тактильно, и они используются при распознавании изображений.

При автоматическом распознавании образов удобнее использовать физические признаки, преобразуемые в математические. Они обладают перед структурными двумя преимуществами [71 – 72]: они более общие и легко машинно реализуемы. В такой постановке задачи выделение признаков и их селекция в пространстве множества признаков занимает центральное место.

Выбор и формирование априорного множества признаков может осуществляться как с учетом распознающих свойств решающей функции, так и вне системы распознавания. В данной работе рассмотрим оба подхода. На первом этапе сформируем рабочее множество вне связи с качеством распознавания, на втором – осуществим проверку качества распознавания с использованием «обученной» решающей функции.

Первый этап реализуем с использованием принципов анализа чувствительности.

### 3.4 Определение относительного коэффициента чувствительности схемных функций

В общем случае под чувствительностью принимается реакция схемной выходной функции по изменению параметра участка схемы. Применительно к распознаванию сопротивления ТПС выходной схемной функцией является множество (2.5), а именно, комплексные амплитуды напряжений на входе и выходе РЛ, а также тока на ее входе. Компонентами, изменяющимися параметрами и вызывающими реакцию схемной функции, являются модуль сопротивления ТПС [73].

Количественная оценка реакции (изменения) параметров ТПС является коэффициентом чувствительности схемной функции [74].

Рассмотрим относительные коэффициенты чувствительности схемных функций комплексных амплитуд напряжений и токов на входе и выходе рельсовой линии. Параметры компонента (сопротивления), если изменяется на некоторое значение  $\Delta r_i$ , в результате чего схемная функция, например, напряжение на входе РЛ  $\Delta \dot{U}_1$  получено при изменении сопротивления  $r_i$  приращения  $\Delta \dot{U}_1$ .

Тогда

$$\frac{\Delta \dot{U}_1}{\dot{U}_1} : \frac{\Delta r_i}{r_i},$$

или

$$S_{r_i}^{\dot{U}_1} = \frac{r_i \Delta \dot{U}_1}{\dot{U}_1 \Delta r_i}. \quad (3.14)$$

Выражение (3.14) является относительным коэффициентом чувствительности схемной функции цепи  $\dot{U}_1$ .

Относительно комплексной амплитуды входного тока  $\dot{I}_1$ :

$$\frac{\Delta \dot{I}_1}{\dot{I}_1} : \frac{\Delta r_i}{r_i},$$

или

$$S_{r_i}^{I_1} = \frac{r_i \dot{\Delta I_1}}{\dot{I_1} \Delta r_i}. \quad (3.15)$$

Применительно к комплексной амплитуде выходного напряжения  $\dot{U}_2$ :

$$\frac{\Delta \dot{U}_2}{\dot{U}_2} : \frac{\Delta r_i}{r_i},$$

или

$$S_{r_i}^{\dot{U}_2} = \frac{r_i \Delta \dot{U}_2}{\dot{U}_2 \Delta r_i}. \quad (3.16)$$

Если рассматривать коэффициент чувствительности для малых приращений  $\Delta \bar{r}_i$ , элементарными преобразованиями можно записать [75]:

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{\partial \dot{U}_1}{\partial r_i} \Delta r_i \quad (3.17)$$

Подставим (3.17) в (3.14) и получим:

$$S_{r_i}^{\dot{U}_1} = \frac{r_i \partial \dot{U}_1}{\dot{U}_1 \partial r_i}, \quad (3.18)$$

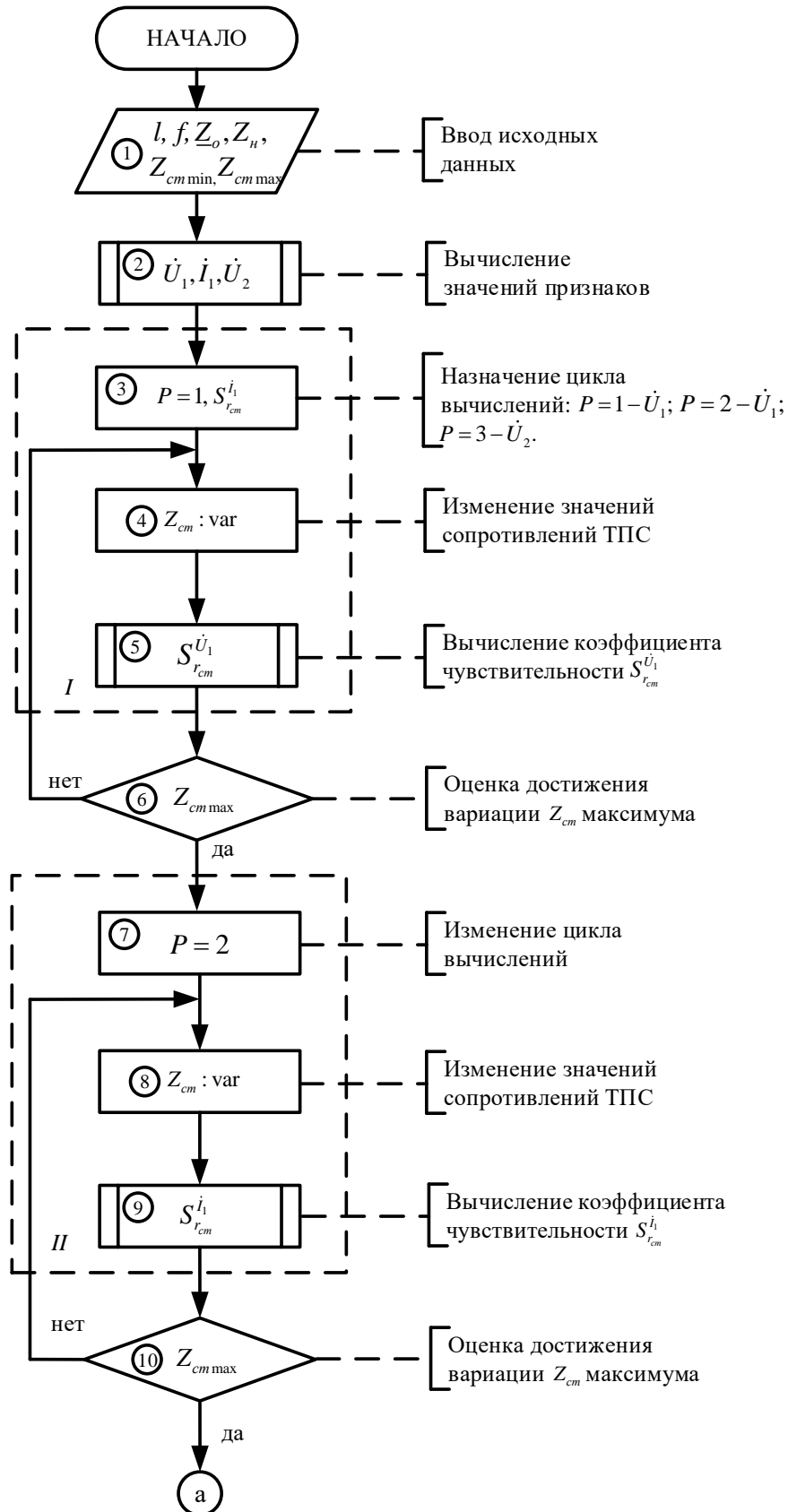
где  $S_{r_i}^{\dot{U}_1}$  – дифференциальная чувствительность  $\dot{U}_1$  относительно малого приращения сопротивления ТПС  $r_i$ .

### **3.5 Машинное исследование информативности первичных признаков коэффициентами чувствительности**

В соответствии с определением, представленным в разделе 3.4, коэффициент чувствительности отражает реакцию схемных функций – информативных признаков на изменение параметров компонент схемы.

Согласно цели исследования – оценки информативности первичных признаков – коэффициенты чувствительности позволяют оценивать и осуществлять селекцию признаков через коэффициенты чувствительности, а именно, чувствительности изменения признака на колебание сопротивления ТПС.

На рис. 3.4 представлена блок – схема анализа параметрической чувствительности с исследованием выражений 3.1 ÷ 3.3:  $S_{r_{st}}^{\dot{U}_1}$ ;  $S_{r_{st}}^{\dot{I}_1}$ ;  $S_{r_{st}}^{\dot{U}_2}$ .



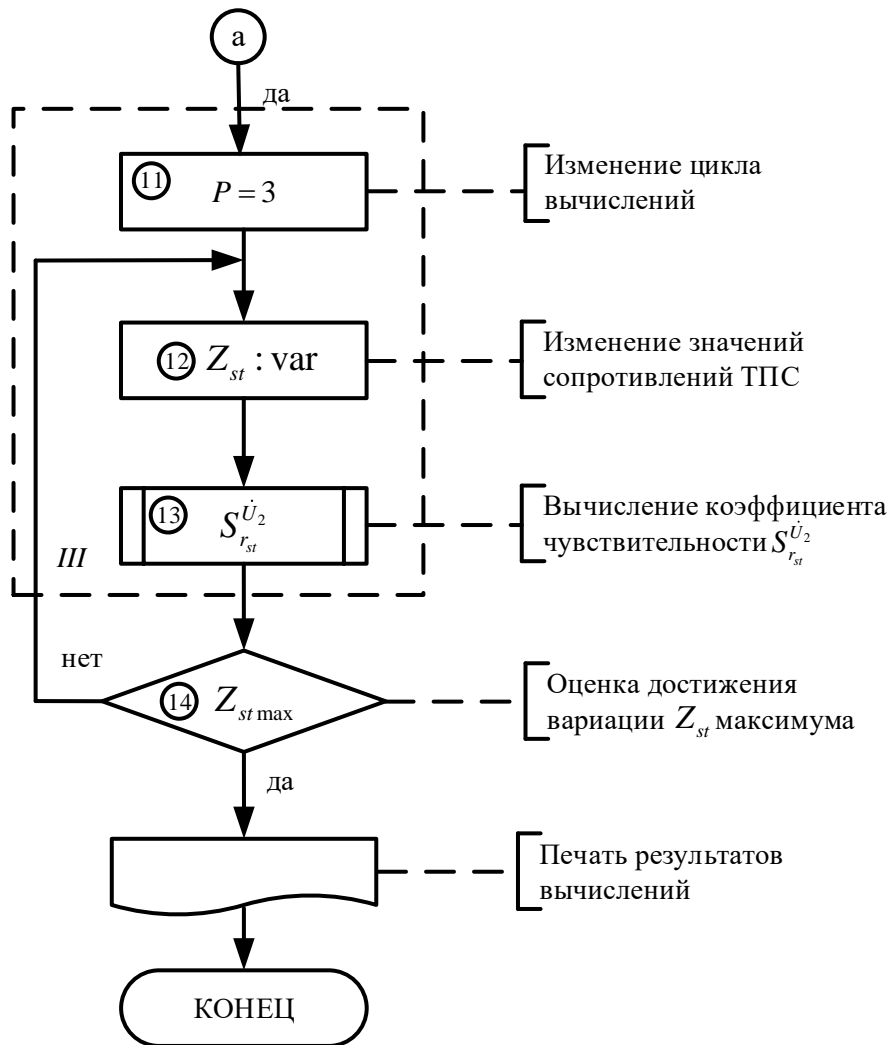


Рисунок 3.4 – Блок – схема алгоритма взаимодействия субблоков при машинном исследовании коэффициентов чувствительности

Блок – схема алгоритма машинного исследования информативности состоит из  $3^x$  основных блоков:

I – блок анализа коэффициентов чувствительности входного напряжения к изменению сопротивления ТПС;

II – блок анализа коэффициентов чувствительности входного тока к изменению сопротивления ТПС;

III – блок анализа коэффициентов чувствительности комплексного выходного напряжения к изменению сопротивления ТПС.

Каждый из укрепленных блоков содержит ряд субблоков, которые взаимосвязаны по следующему алгоритму.

- Шаг 1. Ввод исходных данных исследования.
- Шаг 2. С использованием математических моделей  $2 \div 2 \dots$  вычисления значений признаков  $\{U_1, \varphi_1, U_2, \varphi_2, I_1, \psi_1\}$ .
- Шаг 3. Назначение идентификатора первого блока анализа коэффициентов чувствительности  $P = 1 \equiv S_{r_{st}}^{\dot{U}_1}$ .
- Шаг 4. Организация цикла вариаций сопротивлений ТПС 2%; 5%; 10%; 50%; 100%.
- Шаг 5. Вычисление коэффициентов параметрической чувствительности  $S_{r_{st}}^{\dot{U}_1} = f(Z_{st})$ .
- Шаг 6. Завершение I блока вычислений по величине достижения максимальной величины отклонения сопротивления ТПС.
- Шаг 7. Начало исследования параметрической чувствительности по идентификатору второго блока:  $P = 2 \equiv S_{r_{st}}^{\dot{I}_1}$ .
- Шаг 8. Изменение параметров отклонения значений сопротивления ТПС в соответствии с шагом 4.
- Шаг 9. Вычисление коэффициента чувствительности  $S_{r_{st}}^{\dot{I}_1} = f(Z_{st})$ .
- Шаг 10. Оценка достижения максимума  $Z_{st} = Z_{st \max}$ , ( $Z_{st} = 100\% Z_{st}$ ).
- Шаг 11. Начало исследования коэффициента чувствительности по идентификатору третьего блока  $P = 3 \equiv S_{r_{st}}^{\dot{U}_2}$ .
- Шаг 12. Изменение значений отклонения сопротивления ТПС в соответствии с шагом 4.
- Шаг 13. Вычисление коэффициента чувствительности  $S_{r_{st}}^{\dot{U}_2} = f(Z_{st})$ .
- Шаг 14. Фиксация окончания исследования коэффициента чувствительности по достижению  $Z_{st} = Z_{st} \cdot 100\%$ .
- Шаг 15. Хранение и вывод на печать результатов исследований.

Машинная программа реализации алгоритма исследования информативности первичных признаков, составляющих образы состояний, отображенная на рис. 3.4 на основе коэффициентов чувствительности с использованием программно-математического пакета Python, представлена в приложении В.

Результаты исследований представлены в виде таблиц 3.1 и 3.2.

В соответствии с «Инструкцией по содержанию железнодорожного пути», утвержденного распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г. №2288р, основным элементом рельсовой линии для пропуска тягового тока через ТПС является соединение рельс – накладка [73].

В реальных условиях сопротивления ТПС при нормативной затяжке болтов и зачищенных поверхностях рельсов и накладок сопротивление ТПС имеет величину от 76,6 до 152,4 мкОм [73].

Таким образом, величина сопротивления ТПС может изменяться в процессе эксплуатации от 1,31 до 2,61 раз. Следовательно, при моделировании примем нижайший диапазон изменения, т. е. минимальные колебания сопротивления ТПС, и исследуем реакцию выходных функций  $U_1, \varphi_1, U_2, \varphi_2, I_1, \psi_1$  на колебания сопротивления ТПС.

В таблице 3.1 представлены коэффициенты чувствительности  $S_{r_{st}}^{\dot{U}_1}$ ,  $S_{r_{st}}^{\dot{I}_1}$ ,  $S_{r_{st}}^{\dot{U}_2}$  при различных проводимостях изоляции рельсовых линий, влияющих на пропуск тягового тока, следовательно, на величину сопротивлений ТПС. Диапазон изменения  $g_0$  при исследовании примем от 0,025 См/км до 4,0 См/км.

Таблица 3.1 – Результаты исследований коэффициентов чувствительности модулей выходных функций

| %    | g=0.025              |           |       |                      |           |       |                      |           |       |
|------|----------------------|-----------|-------|----------------------|-----------|-------|----------------------|-----------|-------|
|      | U <sub>1</sub>       |           |       | U <sub>2</sub>       |           |       | I <sub>1</sub>       |           |       |
|      | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     |
| 25%  | 4,424                | 4,52      | 0,087 | 0,394                | 0,327     | 0,678 | 2,058                | 1,722     | 0,655 |
| 50%  | 4,424                | 4,588     | 0,074 | 0,394                | 0,28      | 0,581 | 2,058                | 1,482     | 0,560 |
| 100% | 4,424                | 4,679     | 0,058 | 0,394                | 0,216     | 0,451 | 2,058                | 1,163     | 0,435 |
| 125% | 4,424                | 4,710     | 0,052 | 0,394                | 0,194     | 0,406 | 2,058                | 1,051     | 0,391 |
| %    | g=1                  |           |       |                      |           |       |                      |           |       |
|      | U <sub>1</sub>       |           |       | U <sub>2</sub>       |           |       | I <sub>1</sub>       |           |       |
|      | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     |
| 25%  | 4,033                | 4,123     | 0,089 | 0,224                | 0,167     | 1,009 | 4,386                | 4,040     | 0,316 |
| 50%  | 4,033                | 4,190     | 0,078 | 0,224                | 0,129     | 0,847 | 4,386                | 3,770     | 0,281 |
| 100% | 4,033                | 4,285     | 0,063 | 0,224                | 0,082     | 0,635 | 4,386                | 3,365     | 0,233 |
| 125% | 4,033                | 4,321     | 0,057 | 0,224                | 0,067     | 0,562 | 4,386                | 3,207     | 0,215 |
| %    | g=4                  |           |       |                      |           |       |                      |           |       |
|      | U <sub>1</sub>       |           |       | U <sub>2</sub>       |           |       | I <sub>1</sub>       |           |       |
|      | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     |
| 25%  | 3,291                | 3,426     | 0,164 | 0,048                | 0,030     | 1,538 | 7,360                | 6,853     | 0,276 |
| 50%  | 3,291                | 3,531     | 0,146 | 0,048                | 0,019     | 1,207 | 7,360                | 6,448     | 0,248 |
| 100% | 3,291                | 3,689     | 0,121 | 0,048                | 0,009     | 0,818 | 7,360                | 5,833     | 0,208 |
| 125% | 3,291                | 3,750     | 0,112 | 0,048                | 0,006     | 0,698 | 7,360                | 5,590     | 0,192 |

Из анализа результатов исследований, представленных в таблице 3.1 следует, что наибольшую чувствительность к изменению сопротивления ТПС имеет модуль напряжения на выходе рельсовой линии  $U_2$ .

Так при  $g_o = 0,025$  См/км:  $0,327 \geq S_{r_{st}}^{U_2} \geq 0,194$ , а при  $g_o = 4$  См/км:  $1,538 \geq S_{r_{st}}^{U_2} \geq 0,698$ . При этом необходимо обратить внимание на то, что с изменением проводимости изоляции меняются коэффициенты чувствительности и входных и выходных функций.

В таблице 3.2 представлены коэффициенты чувствительности  $S_{r_{st}}^{\phi_1}$ ,  $S_{r_{st}}^{\psi_1}$ ,  $S_{r_{st}}^{\phi_2}$ , также исследованных при исследованных при различных проводимостях изоляции:  $g_o = 0,02; 1,0; 4,0$  См/км.

Таблица 3.2 – Результаты исследований коэффициентов чувствительности аргументов выходных функций

| %    | g=0.025              |           |       |                      |           |       |                      |           |       |
|------|----------------------|-----------|-------|----------------------|-----------|-------|----------------------|-----------|-------|
|      | Угол U <sub>1</sub>  |           |       | Угол U <sub>2</sub>  |           |       | Угол I <sub>1</sub>  |           |       |
|      | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     |
| 25%  | -2,085               | -1,79     | 0,566 | -4,265               | -4,258    | 0,006 | -64,467              | -63,687   | 0,048 |
| 50%  | -2,085               | -1,58     | 0,484 | -4,265               | -4,33     | 0,030 | -64,467              | -62,993   | 0,046 |
| 100% | -2,085               | -1,302    | 0,376 | -4,265               | -4,602    | 0,079 | -64,467              | -61,756   | 0,042 |
| 125% | -2,085               | -1,204    | 0,338 | -4,265               | -4,777    | 0,096 | -64,467              | -61,188   | 0,041 |
| %    | g=1                  |           |       |                      |           |       |                      |           |       |
|      | Угол U <sub>1</sub>  |           |       | Угол U <sub>2</sub>  |           |       | Угол I <sub>1</sub>  |           |       |
|      | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     |
| 25%  | -10,731              | -9,97     | 0,284 | -54,054              | -60,634   | 0,487 | -44,099              | -42,76    | 0,121 |
| 50%  | -10,731              | -9,341    | 0,259 | -54,054              | -66,829   | 0,473 | -44,099              | -41,846   | 0,102 |
| 100% | -10,731              | -8,354    | 0,222 | -54,054              | -78,246   | 0,448 | -44,099              | -40,680   | 0,078 |
| 125% | -10,731              | -7,959    | 0,207 | -54,054              | -83,544   | 0,436 | -44,099              | -40,279   | 0,069 |
| %    | g=4                  |           |       |                      |           |       |                      |           |       |
|      | Угол U <sub>1</sub>  |           |       | Угол U <sub>2</sub>  |           |       | Угол I <sub>1</sub>  |           |       |
|      | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     | Нормативное значение | Изменение | S     |
| 25%  | -18,484              | -17,162   | 0,286 | -134,180             | -148,378  | 0,423 | -50,960              | -49,657   | 0,102 |
| 50%  | -18,484              | -16,119   | 0,256 | -134,180             | -161,451  | 0,406 | -50,960              | -48,619   | 0,092 |
| 100% | -18,484              | -14,545   | 0,213 | -134,180             | 174,896   | 0,303 | -50,960              | -47,047   | 0,077 |
| 125% | -18,484              | -13,928   | 0,197 | -134,180             | 164,035   | 0,178 | -50,960              | -46,429   | 0,071 |

Максимальные чувствительности наблюдаются у фазы напряжения на выходе рельсовой линии  $\phi_2$ , так при  $g_o = 1,0$  См/км:  $0,487 \geq S_{r_{st}}^{\phi_2} \geq 0,436$ , а при  $g_o = 4,0$  См/км:  $0,489 \geq S_{r_{st}}^{\phi_2} \geq 0,178$ . При проводимостях изоляции менее 1 См/км коэффициенты чувствительности менее выражены.

Таким образом, использование коэффициентов чувствительности для оценки информативности применимо и эффективно.

### 3.6 Разработка алгоритма формирования диагностирующей функции сопротивления ТПС

Центральной задачей при создании системы диагностики сопротивлений ТПС является синтез диагностирующей (решающей) функции (ДФ), позволяющей на основе измеренных значений первичных признаков определять в любой момент времени сопротивление ТПС. При этом система распознавания (диагностики) сопротивлений ТПС должна определять однозначно решения о принадлежности вычисленных некоторой функцией (образов)  $r_{st}(X)$  к определенному классу сопротивлений. Для формирования ДФ воспользуемся основными принципами восстановления зависимости диагностической функции, рассмотренными в п.3.1.

Разработка принципа классификации сопротивлений ТПС, рабочего множества информативных признаков, формирует условия для разработки (восстановления) диагностической функции  $r_{st}(X)$ . Если образы информативных признаков, являющиеся аргументами  $r_{st}(X)$ , не идентичные, т. е. не содержат одинаковые числовые значения первичных признаков, можно всегда найти функцию диагностики, сложность которых колеблется от линейных до нелинейных с размерностью, содержащей большое количество аргументов – членов  $r_{st}(X)$ .

При этом, диагностические функции могут быть обобщены линейной ДФ вида:

$$r_{st}(X) = C_1 f_1(X) + C_2 f_2(X) + \dots + C_k f_k(X) + C_{n+1} = \sum_{i=j}^{n+1} C_i f_i(X), \quad (3.6)$$

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

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



диагностической функции  $r_{sti}(X)$  конкретной рельсовой линии определенной длины. Т. к. предварительная размерность пространства сопротивлений известна, то определение коэффициентов ДФ рационально с использованием метода обучения. Для этого пространство признаков подразделяется на обучающую и тестовую (контрольную) выборки, обладающих толерантностью к "полевым" данным [77 – 79].

Формирование классов образов в нотации распознавания сопротивлений ТПС предполагает разделение пространства сопротивлений ТПС в соответствии с рис. 3.5, включающее исправное состояние ТПС (сопротивление ТПС нормативное), предотказное  $r_{no}$ , включающее 25 – 30 % от нормативного и отказавшее  $r_o$  состояние.

При формировании решающего правила распознавания сопротивлений ТПС удобно использование последовательного анализа Вальда для решения неопределенностей, возникающих на границах классов сопротивлений.

В общем случае, решающее правило при распознавании состояний сопротивлений ТПС имеет вид:

$$r_{sti} = \begin{cases} r_i, & \text{if } (r_i \pm \Delta r_i), \\ r_j, & \text{if } (r_j \pm \Delta r_j), \\ r_k, & \text{if } (r_k \pm \Delta r_k), \\ \dots & \dots \\ r_m, & \text{if } (r_m \pm \Delta r_m), \end{cases} \quad (3.9)$$

где  $\pm \Delta r_i$  – заранее определенный диапазон сопротивлений в окрестности обучающей выборки.

На рис. 3.5 представлена графически иллюстрация правила принятия решения решающим правилом.

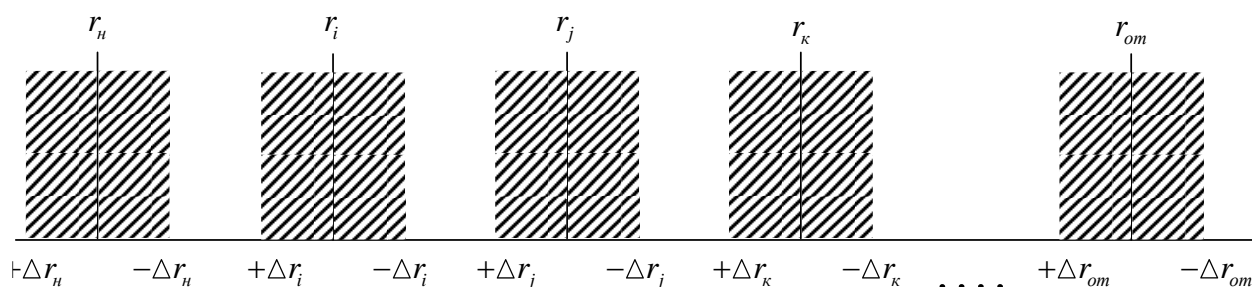


Рисунок 3.5 – Графическая иллюстрация формирования решающего правила последовательным анализом Вальда

В окрестности сопротивлений ТПС, выбранных дискретизацией, появляется неопределенность, такая, что между дискретными отсчетами  $r_n, r_i, \dots, r_{om}$  появляется неопределенность, заключающаяся в том, что диагностическая функция должна точно определять значения  $r_{om}, r_i, r_j, \dots$ , если это не достигается, то вычисленное значение может принадлежать как  $r_{om}$ , так и  $r_i$ , или  $r_j$  и т.д.

Разрешение неопределенности возможно применением последовательного анализа Вальда [80], при котором граничные значения каждого значения сопротивления определяется допустимыми, критическими и промежуточными значениями. Для упрощения вида решающего правила примем лишь допустимое значение  $\Delta r_i, \Delta r_j, \Delta r_{om}, \Delta r_k, \dots, \Delta r_i$ , где каждое значение  $\forall r$  – представляет собой некоторое значение классифицируемого сопротивления, например,  $r_i = r_i \pm \Delta r_{om}$ .

Решение о принадлежности вычисленного сопротивления к значению сопротивлений из априорного словаря принимается в диапазоне допустимых значений от  $+Vr_i$  до  $-Vr_i$ , или  $+Vr_j$  до  $-Vr_j$  и т.д. Такой подход к определению текущего значения сопротивления стыка позволяет существенно сократить время распознавания состояния ТПС.

При построении системы распознавания сопротивлений ТПС необходимо стандартизировать признаки, т.к. некоторые признаки изменяются в пределах от 0,08 до 2,5, а у некоторых диапазон от -10 до -150, следовательно, диапазоны изменения признаков необходимо привести к единому масштабу.

Существует множество способов стандартизации, среди них наиболее предпочтительно следующий [81 – 83]:

$$x_{ik} \rightarrow \frac{x_{ik} - \bar{m}_i}{\bar{\delta}_i} \quad (3.10)$$

где  $\bar{m}_i$  – выборочное среднее значение  $i$  – го измерения;

$$\bar{m}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{ik}, \quad \bar{\delta}_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{ik} - \bar{m}_i)^2} - \text{среднеквадратичное отклонение.}$$

Наиболее просто выражение (3.10) преобразуется к следующей формуле стандартизации:

$$x_{ik} \rightarrow \frac{x_{ik} - \min_k x_{ik}}{\max_k x_{ik} - \min_k x_{ik}} \quad (3.11)$$

Выражение (3.11) легко реализуется с использованием программно – математических пакетов, например с использованием пакета Python.

Основой построения системы вычисления координат неисправный ТПС является априорное множество первичных признаков, сформированное из комплексных амплитуд напряжений и токов на входе и выходе рельсовой линии. Априорный словарь признаков из теории распознавания образов формируется из признаков, которые наиболее информативны с точки зрения безошибочной классификации (вычисления) сопротивления ТПС, физически реализуемы и измеримы доступными средствами [82 – 83].

Как следует из вышеизложенного, состояния внутренних параметров (первичных признаков), зависящих от продольных и поперечных неоднородностей, отражаются на изменении сигналов на его входе  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{U}_1$  и выходе РЛ  $\dot{U}_2$ .

Следовательно, применительно к определению координаты ТПС удобно использовать множество информативных признаков: комплексные амплитуды напряжений  $\dot{U}_1$  и токов  $\dot{I}_1$ , которые в показательный форме имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_1 e^{j\varphi_{U1}}, \\ \dot{I}_1 &= I_1 e^{j\psi_1}, \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_2 e^{j\varphi_{U2}}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Применительно к определению координаты и величины сопротивления ТПС, в качестве информативных признаков состояний рельсовых линий, как отмечено ранее, предполагается использовать комплексные амплитуды напряжения  $\dot{U}_1$  и тока  $\dot{I}_1$  на входе рельсовой линии и ее выходе  $\dot{U}_2$ , с источником питания, расположенным в начале РЛ [84-87]. Рельсовая цепь при использовании такой схемы ограждается с обоих концов изолирующими стыками. Соответственно, схема устройства распознавания сопротивлений ТПС имеет вид, представленный на рис. 3.6.

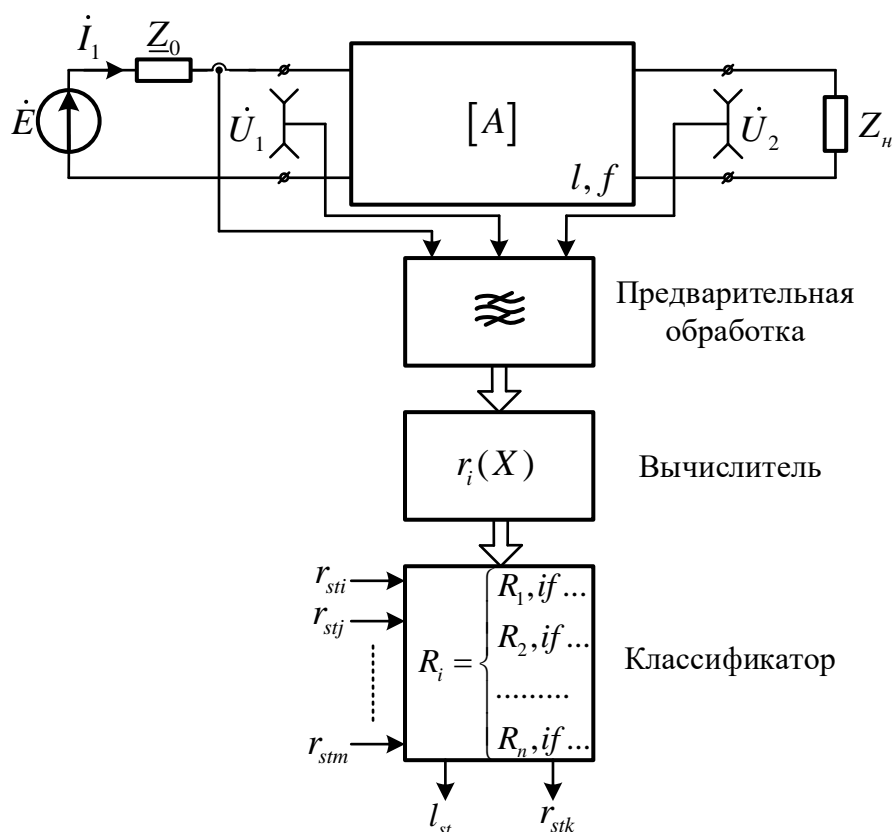


Рисунок 3.6 – Структурная схема устройства распознавания сопротивлений ТПС

Первым функциональным звеном при распознавании сопротивлений является предварительная обработка измеренной информации признаков

$\{\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2\}$ . Задача, решаемая блоком преобразования предварительной обработки информации, состоит в формировании образов состояний, характеризующих сопротивления ТПС в любой момент времени:  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1 = f(R_{st})$ . Данную функцию выполняет измерительный преобразователь, который осуществляет нормализацию и стандартизацию первичных признаков (приведение к стандартным диапазонам измерения, обеспечение линейности, компиляция погрешности, установление или ограничение сигнала и т.п.) [88 – 89].

Следующей операцией является формирование диагностической функции, отражающей  $r_{st}(X) = f(\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2)$

Диагностические функции могут быть получены множеством способов. В случае, если о распознаваемых классах (сопротивлениях) имеются полные априорные сведения о их связях с образами, ДФ могут быть получены на основе априорной информации о границах изменения  $i$ -го класса, следовательно, применим метод обучения классификатора с «учителем». В этом случае формируется математическим или имитационным моделированием формируется 2 класса образов, содержащих обозначающую обучающую и контрольную выборку образов:  $X_0$  и  $X_K$  :

$$X_0 = \{\dot{U}_{10}, \dot{I}_{10}, \dot{U}_{20}\},$$

$$X_K = \{U_{1K}, I_{1K}, U_{2K}\}.$$

Результатом обучения является определение коэффициентов полинома ДФ в виде линейной функции:

$$R_{st}(X) = C_0 + C_1\dot{U}_1 + C_2\dot{U}_2 + C_3\dot{I}_1 + C_4\dot{U}_1\dot{U}_2 + \dots + C_n\dot{U}_1\dot{U}_2\dot{I}_1 \quad (3.13)$$

Запишем ДФ в виде матриц:

$$X = \begin{pmatrix} \dot{U}_{01} & \dot{U}_{02} & \dot{I}_{01} & \dot{U}_{01}\dot{U}_{02} & \dots & \dot{U}_{01}\dot{U}_{02}\dot{I}_{01} \\ \dot{U}_{11} & \dot{U}_{12} & \dot{I}_{11} & \dot{U}_{11}\dot{U}_{12} & \dots & \dot{U}_{11}\dot{U}_{12}\dot{I}_{11} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{U}_{j1} & \dot{U}_{j2} & \dot{I}_{j1} & \dot{U}_{j1}\dot{U}_{j2} & \dots & \dot{U}_{j1}\dot{U}_{j2}\dot{I}_{j1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dot{U}_{n1} & \dot{U}_{n2} & \dot{I}_{n1} & \dot{U}_{n1}\dot{U}_{n2} & \dots & \dot{U}_{n1}\dot{U}_{n2}\dot{I}_{n1} \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \dots \\ C_j \\ \dots \\ C_n \end{pmatrix}; R_{st} = \begin{pmatrix} R_{st1} \\ R_{st2} \\ \dots \\ R_{stj} \\ \dots \\ R_{nst} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Система диагностических функций  $R_{st}(X)$ , полученная из (3.14) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} C_0 + C_1\dot{U}_{01} + C_2\dot{U}_{02} + C_3\dot{I}_{01} + C_4\dot{U}_{01}\dot{U}_{02} + \dots + C_n\dot{U}_{01}\dot{U}_{02}\dot{I}_{01} &= r_{st1} \\ C_0 + C_1\dot{U}_{11} + C_2\dot{U}_{12} + C_3\dot{I}_{11} + C_4\dot{U}_{11}\dot{U}_{12} + \dots + C_n\dot{U}_{11}\dot{U}_{12}\dot{I}_{11} &= r_{st2} \\ \dots & \dots \\ C_0 + C_1\dot{U}_{j1} + C_2\dot{U}_{j2} + C_3\dot{I}_{j1} + C_4\dot{U}_{j1}\dot{U}_{j2} + \dots + C_j\dot{U}_{j1}\dot{U}_{j2}\dot{I}_{j1} &= r_{stj} \\ \dots & \dots \\ C_0 + C_1\dot{U}_{n1} + C_2\dot{U}_{n2} + C_3\dot{I}_{n1} + C_4\dot{U}_{n1}\dot{U}_{n2} + \dots + C_n\dot{U}_{n1}\dot{U}_{n2}\dot{I}_{n1} &= r_{stn} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Решая систему уравнений (3.15), по правилу:

$$C = C^{-1}X^T R_{st}, \quad (3.16)$$

где  $X^T = \{\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1\}$ ,  $X^T$  – транспонированная матрица  $X$ ;

$C^{-1}$  – обратная матрица произведения  $C = X^T \cdot X$ , равная  $C^{-1} = (X^T X)^{-1}$ , находятся искомые коэффициенты ДФ.

### 3.7 Результаты формирования диагностирующей функции

Разработка математических моделей электрических параметров рельсовых линий  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1$ , методики обучения диагностической функции ТПС, позволяет создать систему распознавания сопротивлений ТПС с использованием множества признаков  $(U_1, \varphi_1, I_1, \psi_1, U_2, \varphi_2)$  в диапазоне изменения сопротивлений ТПС  $r_{st \min}$ ;  $r_{st \text{ предотказ}}$ ;  $r_{st \text{ max}}$  (отказ), а также локаций (координат) стыков от  $l_1$  до  $l_n$ , где  $n$  –

количество стыков рельсовой линии. При этом необходимо иметь в виду, что задача распознавания сопротивления ТПС двумерная: во-первых, необходимо определить координату стыка с повышенным сопротивлением, во-вторых, величину сопротивления для определения его предотказного состояния, как результат диагностики, и формируемая диагностическая функция с допустимой погрешностью должна выполнить оба условия  $R_{pl} = f(r_{sti}, l_n)$ .

Машинная программа формирования рядов диагностических функций, содержащих 2,3,4,5 и 6 аргументов, составленных методом обучения, изложенного в разделе 3.6 и представленная в виде (3.14 ÷ 3.16) размещена в приложении Г.

На рис. 3.7 представлен результаты MAPE оценки погрешности определения координаты и величины сопротивления ТПС в сочетаниях аргументов ДФ на 2 признака из 6.

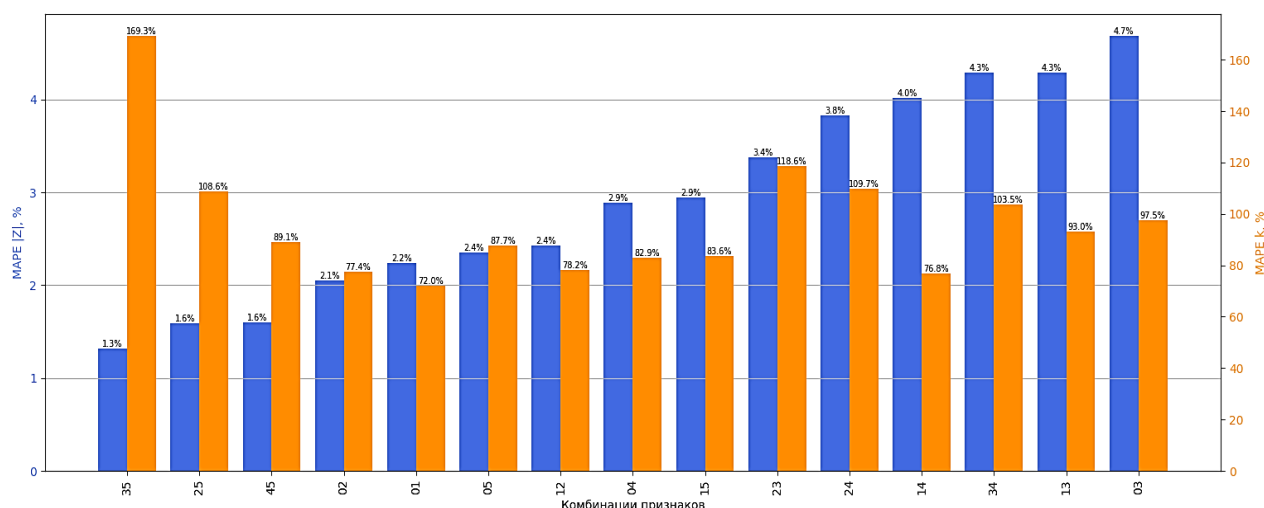


Рисунок 3.7 – MAPE оценка определения координаты и величины сопротивления ТПС ДФ  $d(r_{st}, l_{st}) = f(x_i, x_j)$

Анализ диаграмм показывает, что диагностической функцией с двумя аргументами определить величину сопротивления и координаты стыка с увеличенным сопротивлением затруднительно, т. к. ошибки определения величины сопротивления токопроводящего стыка находится в пределах  $1,3\% \leq \delta_r \leq 4,7\%$ , но

координата определяется с погрешностью  $72\% \leq l_{st} \leq 169,3\%$ , что показывает на недопустимую погрешность.

На рис. 3.8 представлены результаты MAPE оценки погрешности при сочетаниях аргументов ДФ по 3 признака из 6.

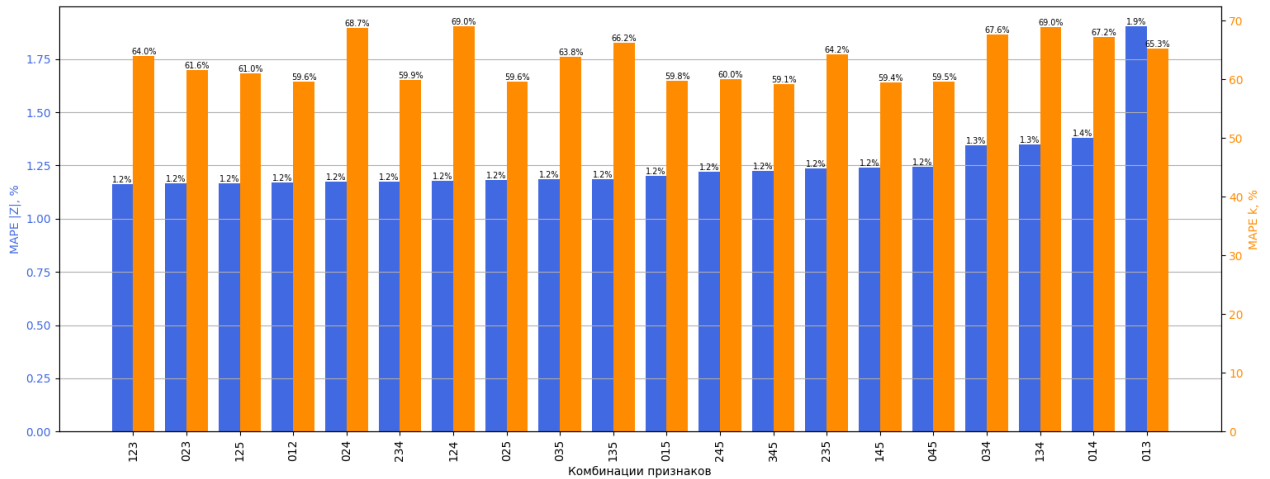


Рисунок 3.8 – MAPE оценка определения координаты и величины сопротивления ТПС ДФ  $d(r_{st}, l_{st}) = f(x_i, x_j, x_k)$

Результаты исследований показывают, что ДФ с тремя признаками – аргументами не обеспечивает допустимую погрешность определения координаты и величины сопротивления, т. к.  $1,2\% \leq r_{st} \leq 1,9\%$ , а границы погрешности определения координат составляют  $59,1\% \leq l_{st} \leq 69\%$ .

На рис. 3.9 представлены результаты исследований MAPE оценки определения координаты и величины сопротивления стыка с увеличенным сопротивлением при использовании  $4^x$  признаков в ДФ.

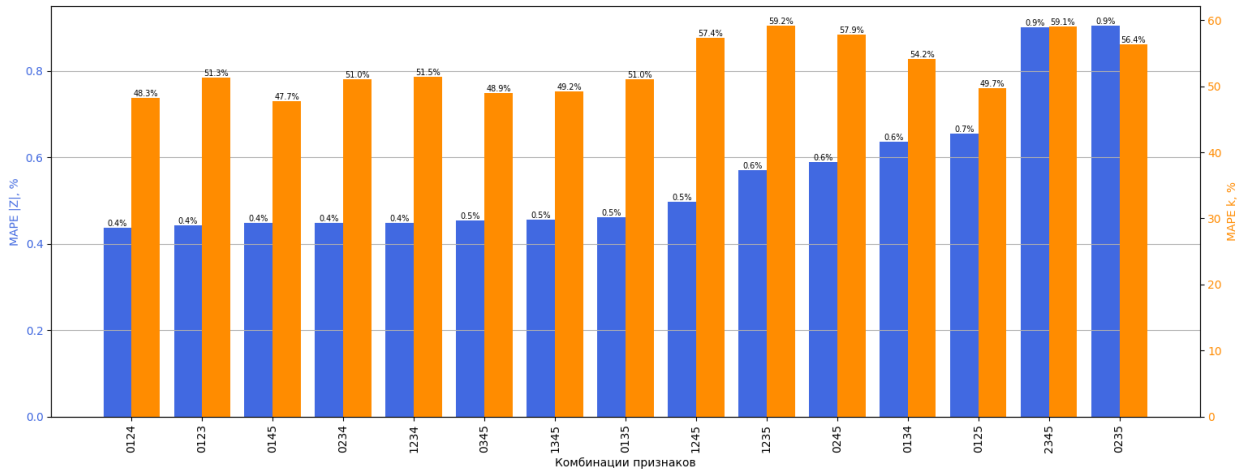


Рисунок 3.9 – MAPE оценка определения координаты и величины сопротивления ТПС ДФ  $d(r_{st}, l_{st}) = f(x_i, x_j, x_k, x_n)$

При исследовании  $4^x$  аргументов в ДФ, результаты определения величин сопротивлений удовлетворительные  $0,4 \% \leq r_{st} \leq 0,9 \%$ , но координаты определяются с большой ошибкой  $47,7 \% \leq l_{st} \leq 59,2 \%$ , что не позволяет использовать ДФ и 4-мя аргументами – признаками.

На рис. 3.10 представлены результирующие графики исследований всех сочетаний: по 2,3,4,5 и 6 признаков в ДФ.

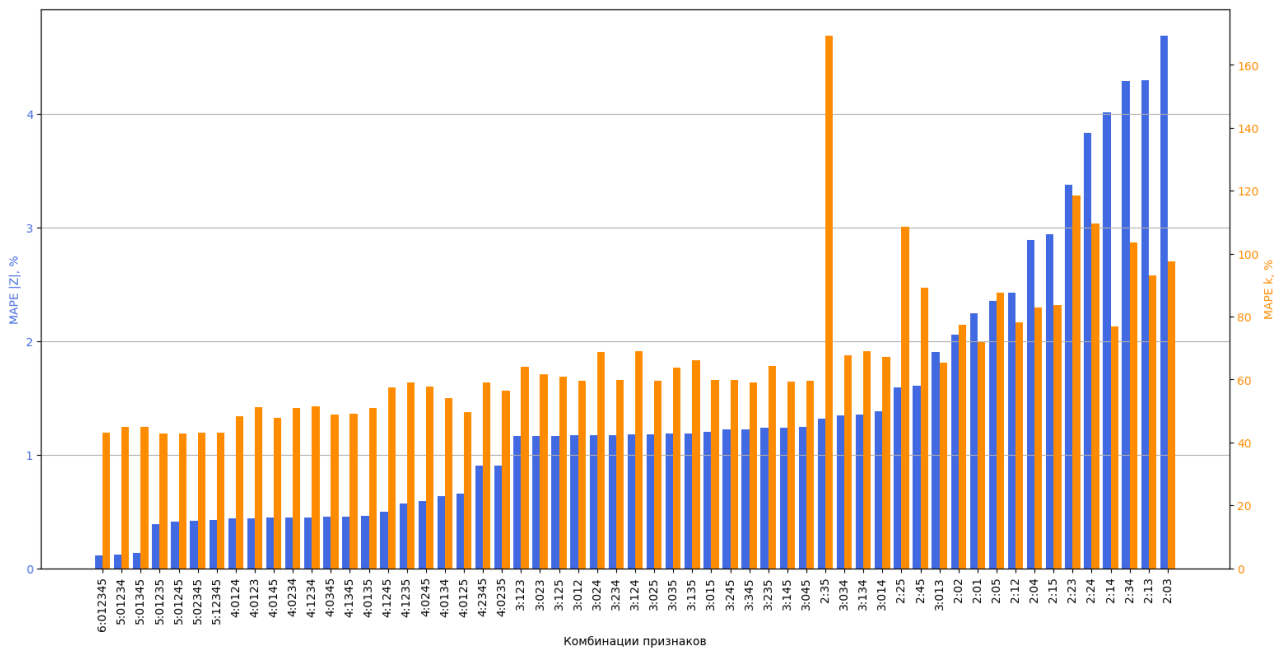


Рисунок 3.10 – MAPE оценка определения координаты и величины сопротивления ТПС ДФ  $d(r_{st}, l_{st}) = f(x_i, x_j, x_k, x_n, x_m, x_p)$

При использовании 5 или 6 признаков результаты определения величины сопротивления вполне удовлетворительные:  $r_{st\ max} \leq 0,11\ \%$ , но координаты  $l_{st}$  определяются с ошибкой (минимальной)  $l_{st\ min} \leq 43\ \%$ , что также не позволяет использовать сформированные ДФ при распознавании сопротивления и координаты ТПС с повышенной проводимостью.

Таким образом, при диагностической функции третьей степени сложности и использовании в качестве информативных признаков сочетания  $U_1, \varphi_1, I_1, \psi_1, U_2, \varphi_2$  по 2,3,4,5 и 6 минимальная погрешность определения величины сопротивления ТПС составляет  $\delta_{r_{st}} \leq 0,3\ \%$ , а определение координаты возможно с минимальной погрешностью 43 %, что превышает допущения по погрешности определения координаты  $r_{st} \leq 5\ \%$ .

Значительная погрешность определения координаты стыков, в первую очередь, связана с большим диапазоном изменения величины сопротивления ТПС  $r_{st\ max} / r_{st\ min} = 10\ 000$  раз, и несовместная переопределенная система уравнений ДФ 3.15 решается слишком приближенно, и, следовательно, сформированная ДФ имеет ограничения по минимизации погрешности.

Для уменьшения неопределенности при решении системы уравнений в работе предложен метод множества диагностических функций, определяемых классификацией диапазона изменения сопротивления ТПС. Для этого предложен двухуровневое формирование классов сопротивлений. Следует заметить, что выявление классов является эмпирическим «искусством», т. к. качество распознавания зависит не только от выбора «удачного» набора первичных признаков, вида ДФ, но и от множества обучающей выборки, которую можно создать лишь репрезентативными классами в заданном множестве данных.

На рис. 3.11 представлен фрагмент алгоритма формирования ДФ на основе классификации сопротивлений ТПС на обучающей выборке.

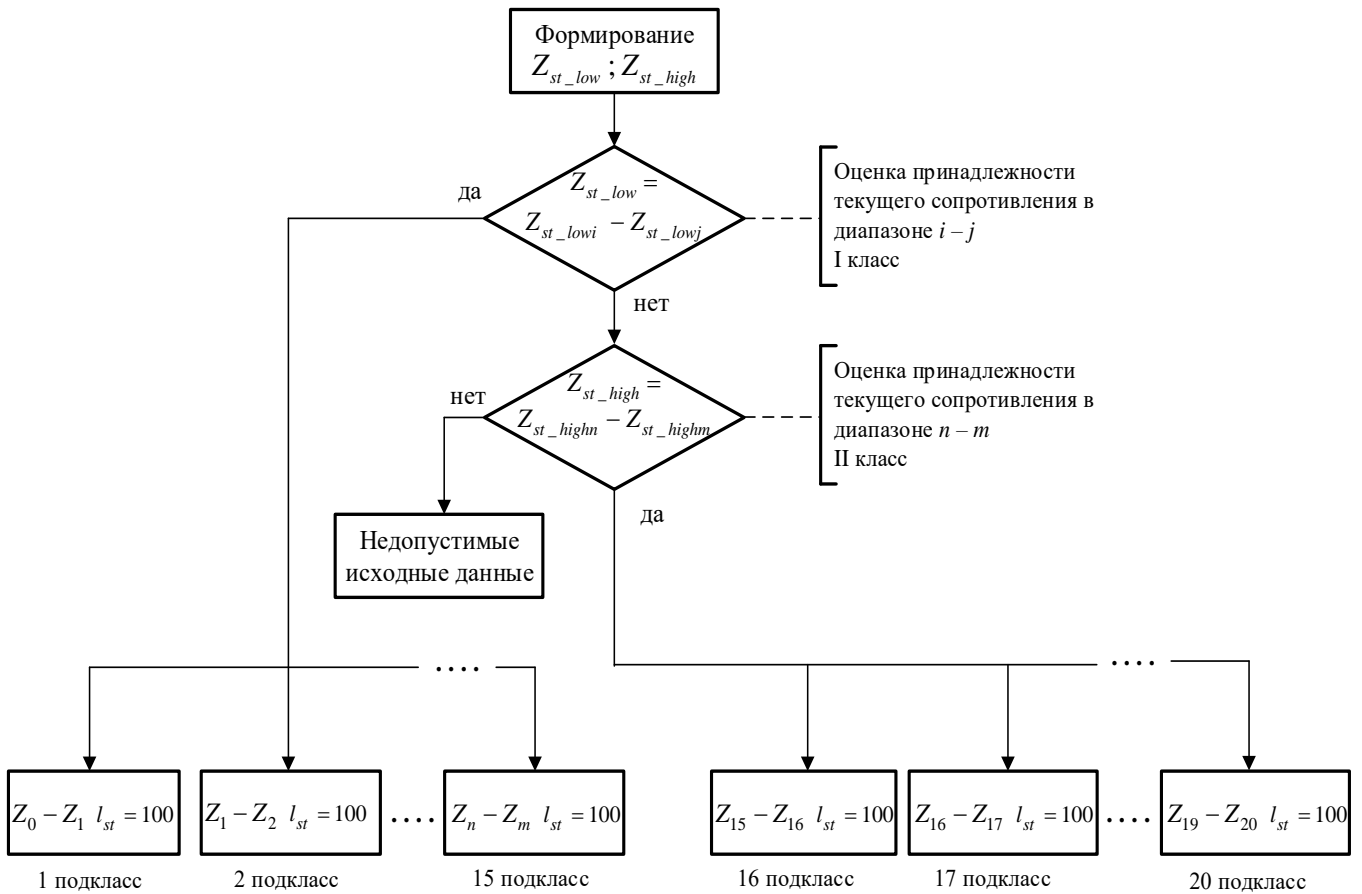


Рисунок 3.11 – Фрагмент алгоритма классификации сопротивлений ТПС

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  $Z_{st\_highn} - Z_{st\_highm}$ .

Внутри классов для решения задачи определения локации неисправности было сформировано множество ДФ для поддиапазонов.

В свою очередь, I класс формирует 15 ДФ с границами:

$$Z_{st0} - Z_{st1}, \text{ для } l_n, n \forall 1, 2, \dots 100;$$

$$Z_{st1} - Z_{st2}, \text{ для } l_n, n \forall 1, 2, \dots 100;$$

.....

$$Z_{st14} - Z_{st15}, \text{ для } l_n, n \forall 1, 2, \dots 100;$$

Второй класс формирует 5 ДФ с границами:

$$Z_{st15} - Z_{st16}, \text{ для } l_n, n \forall 1, 2, \dots 100;$$

$$Z_{st16} - Z_{st17}, \text{ для } l_n, n \forall 1, 2, \dots 100;$$

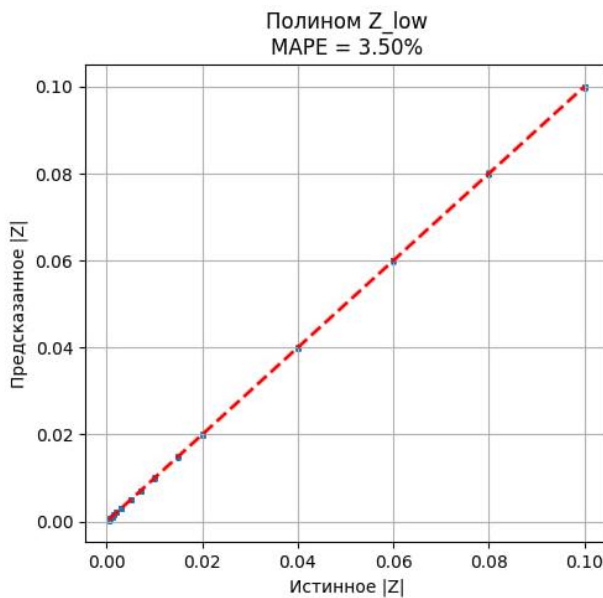
.....

$$Z_{st19} - Z_{st20}, \text{ для } l_n, n \forall 1, 2, \dots 100.$$

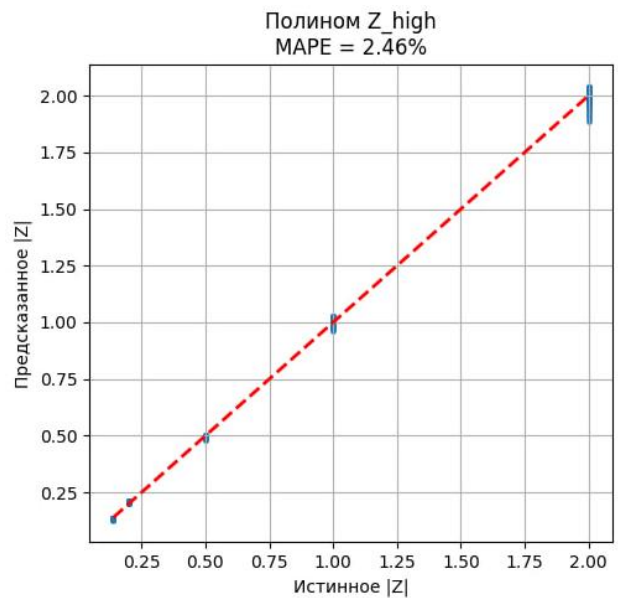
Анализ точности полученных моделей позволяет сделать следующие **ВЫВОДЫ**:

– для нижнего класса  $Z_{st\_lowi} - Z_{st\_lowj}$  значения MAPE, согласно данным рис. 3.12 а, составили 0,47 % и 3,50 % (рис. 3.12 в). Соответственно, разброс значений, основанный на различных условиях тестирования при обучающей и контрольной выборках, позволил достигнуть необходимую инженерную точность в показатель менее 3,5 % ;

– для верхнего класса  $Z_{st\_highn} - Z_{st\_highm}$  значения MAPE, согласно данным рис. 3.12 б, составили 2,46 % и 3,01 % (рис. 3.12 г), что действительно подтверждает высокую точность аппроксимации в решении вопроса определения координаты стыка и его значения сопротивления.



а)



б)

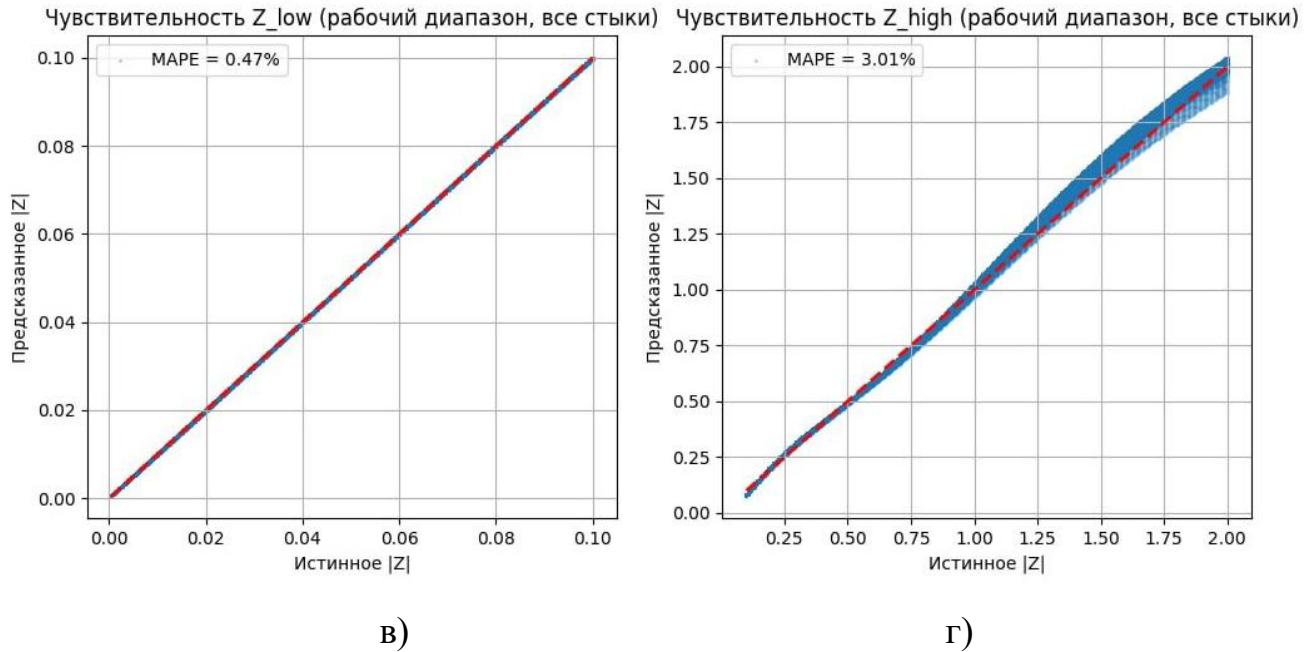


Рисунок 3.12 – Результаты аппроксимации модуля сопротивления токопроводящего стыка по измеряемым входным параметрам рельсовой линии – напряжению и току

Таким образом, характер распределения точек на графике доказывает, что полученный результат объединения двух диагностических моделей для определения сопротивления токопроводящего стыка и координаты неисправности, соответственно, демонстрирует адекватность и точность формируемого подхода.

Полиномы сопротивления:

Низкий диапазон:

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

Высокий диапазон:

$$d(Z_{high}) = -109487,684 + 62959,069U_1 + 22606,959I_1 - 12079,786U_1^2 - 8613,079U_1I_1 - 1623,197I_1^2 + 773,413U_1^3 + 820,700U_1^2I_1 + 308,444U_1I_1^2 + 39,610I_1^3$$

Обобщенный вид уравнения координаты стыка:

$$d(x) = C_0 + C_1U_1 + C_2I_1 + C_3U_1^2 + C_4U_1I_1 + C_5I_1^2 + C_6U_1^3 + C_7U_1^2I_1 + C_8U_1I_1^2 + C_9I_1^3$$

Таблица 3.3 – Полиномы диагностической функции координаты стыка

| №<br>п/п | C <sub>0</sub> | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | MAPE  |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| ДФ 1     | 40,976         | 10,159         | 40,548         | -2,426         | -22,381        | -6,745         | 2,399          | 9,721          | 6,388          | 1,833          | 8,14  |
| ДФ 2     | 41,004         | 10,027         | 40,061         | -2,029         | -21,298        | -6,439         | 1,211          | 6,478          | 3,808          | 1,313          | 7,18  |
| ДФ 3     | 40,547         | 11,338         | 42,540         | -1,412         | -21,386        | -5,467         | 3,099          | 9,675          | 2,723          | -0,853         | 10,88 |
| ДФ 4     | 40,954         | 10,188         | 40,111         | -1,507         | -20,208        | -5,904         | 0,593          | 4,608          | 1,804          | 0,595          | 7,20  |
| ДФ 5     | 40,895         | 10,404         | 40,447         | -1,331         | -19,961        | -5,652         | 0,801          | 4,951          | 1,609          | 0,284          | 7,69  |
| ДФ 6     | 40,758         | 10,870         | 41,232         | -1,082         | -19,766        | -5,247         | 1,291          | 5,704          | 1,114          | -0,426         | 8,78  |
| ДФ 7     | 40,358         | 11,999         | 43,164         | -0,555         | -19,636        | -4,389         | 2,029          | 6,137          | -1,384         | -2,413         | 11,26 |
| ДФ 8     | 40,933         | 10,495         | 40,210         | -1,232         | -19,167        | -5,253         | -0,209         | 2,536          | 0,241          | 0,326          | 6,97  |
| ДФ 9     | 40,882         | 10,807         | 40,610         | -1,178         | -18,948        | -4,934         | -0,002         | 2,900          | 0,221          | 0,158          | 7,34  |
| ДФ<br>10 | 40,739         | 11,501         | 41,576         | -1,037         | -18,646        | -4,326         | 0,478          | 3,606          | -0,224         | -0,471         | 8,39  |
| ДФ<br>11 | 40,982         | 10,892         | 40,168         | -1,376         | -18,189        | -4,495         | -1,825         | -1,478         | -2,100         | 0,408          | 5,95  |
| ДФ<br>12 | 39,130         | 16,587         | 48,632         | 0,445          | -17,543        | -0,532         | 0,788          | -0,631         | -12,162        | -6,968         | 15,04 |
| ДФ<br>13 | 40,581         | 14,005         | 43,597         | -1,252         | -15,949        | -1,368         | -0,660         | 0,347          | -2,341         | -0,420         | 8,26  |
| ДФ<br>14 | 40,815         | 13,907         | 42,794         | -1,537         | -14,510        | -0,546         | -2,726         | -4,050         | -3,315         | 0,910          | 5,94  |
| ДФ<br>15 | 40,860         | 14,467         | 43,042         | -1,540         | -13,124        | 0,541          | -4,953         | -9,892         | -7,447         | 0,444          | 5,22  |
| ДФ<br>16 | 40,549         | 17,008         | 45,633         | -1,425         | -11,266        | 2,980          | -2,441         | -3,583         | -2,744         | 1,331          | 6,79  |
| ДФ<br>17 | 40,336         | 19,693         | 47,895         | -1,160         | -8,064         | 6,080          | -2,701         | -4,222         | -2,633         | 1,852          | 7,16  |
| ДФ<br>18 | 34,079         | 50,661         | 74,858         | 10,375         | 21,250         | 31,382         | -21,106        | -58,274        | -57,268        | -14,732        | 18,25 |
| ДФ<br>19 | 36,021         | 52,322         | 73,450         | 16,362         | 43,490         | 42,117         | -9,957         | -17,200        | -5,191         | 5,886          | 13,00 |
| ДФ<br>20 | 35,781         | 61,627         | 80,682         | 27,165         | 69,461         | 56,052         | -19,316        | -28,720        | -1,470         | 11,690         | 12,12 |

## Выводы по третьей главе

1. Проведенный анализ способов контроля сопротивлений ТПС показал, что наиболее эффективным средством диагностики текущего сопротивления ТПС является принцип и метод распознавания образов с предварительно обученным классификатором диагностической функции, описывающий состояния сопротивлений ТПС.

2. Разработанная процедура машинного обучения системы распознавания сопротивлений ТПС предполагает формирование априорного множества признаков, описывающих непрерывное изменение сопротивлений ТПС в виде модулей и аргументов на входе и выходе рельсовой линии  $(U_{1i}, \varphi_{1i}, I_{1i}, \psi_{1i}, U_{2i}, \varphi_{2i})$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество отсчетов выбранных признаков, установление образов, соответствующих множеству признаков из рабочего множества, при этом  $X_p < X_a$ , где  $X_p, X_a$  – рабочее и априорное множество образов  $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , порожденные множества диагностических функций сопротивлений ТПС  $R_1(X), X_2(X) \dots R_m(X)$ , где  $R_m(X)$  – предельное значение сопротивления токопроводящего стыка, создание решающих правил с использованием последовательного анализа Вальда.

3. Предложенная количественная оценка информативности первичных признаков с использованием параметрической чувствительности выходной функции к изменению величины сопротивления ТПС с использованием коэффициентов чувствительности, представленных как произведение номинальных параметров сигналов на входе и выходе рельсовой линии на значение изменения сопротивления ТПС к произведению номинальных значений сопротивлений ТПС (например, на частоте 50 Гц  $0,8e^{-j65^\circ}$ ) на значение измененного выходного параметра позволила формировать минимизированное множество признаков и ранжирование по критерию чувствительности, показала, что наиболее информативными и ранжированными признаками являются  $1,538 \geq S_{r_{st}}^{\dot{U}_2} \geq 0,194$ ,

затем модуль напряжения на входе рельсовой линии  $0,164 \geq S_{r_{st}}^{\dot{U}_1} \geq 0,053, 6,853$   
 $\geq S_{r_{st}}^{\dot{I}_1} \geq 1,051$ .

4. Исследования, проведенные на математической модели системы распознавания с диагностическими функциями, показали, что определять величину сопротивления токопроводящего стыка и координату стыка с измененным сопротивлением с использованием единственной решающей функцией невозможно, т. к. при использовании в качестве аргументов двумерных образов результаты МАРЕ оценки относительно  $1,3\% \geq r_{st} \geq 4,7\%$ , а координат стыка  $72\% \leq l_{st} \leq 169\%$ , а при использовании всех 6 признаков определяется с погрешностью  $r_{st\ max} \leq 0,11\%$ , координата  $l_{st\ min} \leq 43\%$ , поэтому в работе предложен принцип множества ДФ, с разделением диапазона изменения на 2 класса и 20 подклассов.

## 4 АРХИТЕКТУРА УСТРОЙСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТЫКОВ

### 4.1 Технические требования к архитектуре

Архитектура устройства распознавания сопротивления ТПС может быть различной в зависимости от выполняемой задачи:

1. Мониторинг – измерение, контроль с сохранением результатов.
2. Диагностика – распознавание текущего состояния объекта – сопротивления ТПС.
3. Прогнозирование – оценка состояния объекта в момент времени  $t = t + t_1$ , т.е. в предстоящее время (ГОСТ Р27.002 – 2015).
4. Мониторинг, диагностика и прогнозирование одной системой распознавания с выделением предотказных состояний.

Вновь создаваемое распознающее устройство сопротивления ТПС с учетом их особых условий функционирования в промышленных условиях должно обеспечивать [90 – 91]:

- требуемую надежность функционирования;
- ускоренную, быстродействующую реакцию на изменение сопротивления ТПС;
- возможность функционирования по топологии территориальной рассредоточенности;
- единство технической базы реализации;
- упрощенный автоконтроль и самодиагностику;
- иметь «дружественный» интерфейс и простоту увязки с полевыми датчиками и измерительными каналами.

Соответственно, из обеспечительных задач формируются технические требования к архитектуре устройства распознавания сопротивления токопроводящих стыков (УРС ТПС):

- автотестирование - возможность контроля правильности функционирования;
- надежность, например: резервированием;
- защищенность от отказов - безопасное функционирование на каждом уровне: аппаратном, информационном, программном, интерфейсном;
- безотказность (reliability) - свойство системы непрерывно быть в работоспособном состоянии в течении  $t_j \rightarrow t \rightarrow t_i$ , где  $t_i, t_j$  – граничные значения временного интервала;
- безопасность - в отличие от безотказности сохраняет исправное, работоспособное или защитное состояние  $i_j \rightarrow t \rightarrow t_i$ ;
- модифицируемость - возможность перенастройки при изменении технологического процесса или расширение функциональных возможностей;
- наращиваемость - возможность расширения размера системы распознавания: многомерное распознавание и классификация;
- простота обслуживания ремонта и эксплуатации;
- возможность реконфигурирования (усложнения решающей функции) для работы новыми ТПС;
- максимальная простота реализации для минимизации на монтаж и пуско-наладку.

#### **4.2 Допусковый анализ диагностической функции**

Одной из важнейших задач при технической реализации УРС ТПС является учет влияния разброса параметров элементов классификатора сопротивления ТПС на погрешность распознавания координаты и величины сопротивления ТПС. На погрешность вычисления сопротивления ТПС очевидно будут влиять

технологические погрешности изготовления компонент (элементы) схемы классификатора, условия функционирования классификатора сопротивления (деградация, температурные изменения, условия влажности и т.д.).

При решении задачи влияния разброса параметров необходимо машинным моделированием исследовать реакцию ДФ, для этого введем следующую классификацию решаемых задач.

1. Допусковый анализ – в данном случае известна структура и полиномиальные параметры и допуски на них, необходимо определить допуски на внешние характеристики компонент.

2. Допусковый синтез, при котором заданы структура компоненты классификатора и номинальные параметры, и внешние допуски, а требуется определить допуски на параметры элементов. Данная задача обратная предыдущему – допусковому анализу.

3. Статистический параметрический синтез – классическая задача синтеза: известна структура внешних компонент классификатора, допустимые границы параметров и допуски постоянном запоминающем устройстве на внешние характеристики, а требуется определить номинальные параметры.

4. Статистический структурный синтез, при котором заданы требуемые уровни параметров компоненты классификатора и допуски на них. При этом необходимо найти структуру компоненты и техническая реализация.

Для анализа разброса параметров внешних компонент схемы классификатора необходимо использовать функцию качества, связанного чувствительностью ДФ и изменением параметров компонент схем применением схемной функции.

Множество (2.5) содержит комплексные амплитуды сигналов, запишем схемные функции (2.5) в показательной форме согласно (3.43) и определим дифференциальную чувствительность схемной функции в показательной форме:

$$S_{r_i}^{\dot{U}_2} = \frac{r_i}{\dot{U}_2} \frac{\partial}{\partial r_i} \left\{ |\dot{U}_2| e^{j\varphi_2} \right\} = \frac{r_i}{|\dot{U}_2| e^{j\varphi_2}} \left\{ \frac{\partial |\dot{U}_2|}{\partial r_i} e^{j\varphi_2} + j |\dot{U}_2| \frac{\partial \varphi_2}{\partial r_i} e^{j\varphi_2} \right\} =$$

$$= \frac{r_i}{|\dot{U}_2|} \frac{\partial |\dot{U}_2|}{\partial r_i} + j r_i \frac{\partial \varphi_2}{\partial r_i} = S_{r_i}^{|\dot{U}_2|} + j \varphi_2 S_{r_i}^{\varphi_2} \quad (4.1)$$

$$S_{r_i}^{\dot{U}_1} = \frac{r_i}{\dot{U}_2} \frac{\partial}{\partial r_i} \left\{ |\dot{U}_1| e^{j\varphi_1} \right\} = \frac{r_i}{|\dot{U}_1| e^{j\varphi_1}} \left\{ \frac{\partial |\dot{U}_1|}{\partial r_i} e^{j\varphi_1} + j |\dot{U}_1| \frac{\partial \varphi_1}{\partial r_i} e^{j\varphi_1} \right\} =$$

$$= \frac{r_i}{|\dot{U}_1|} \frac{\partial |\dot{U}_1|}{\partial r_i} + j r_i \frac{\partial \varphi_1}{\partial r_i} = S_{r_i}^{|\dot{U}_1|} + j \varphi_1 S_{r_i}^{\varphi_1} \quad (4.2)$$

$$S_{r_i}^{\dot{I}_1} = \frac{r_i}{\dot{I}_1} \frac{\partial}{\partial r_i} \left\{ |\dot{I}_1| e^{j\psi} \right\} = \frac{r_i}{|\dot{I}_1| e^{j\psi}} \left\{ \frac{\partial |\dot{I}_1|}{\partial r_i} e^{j\psi} + j |\dot{I}_1| \frac{\partial \psi}{\partial r_i} e^{j\psi} \right\} =$$

$$= \frac{r_i}{|\dot{I}_1|} \frac{\partial |\dot{I}_1|}{\partial r_i} + j r_i \frac{\partial \psi}{\partial r_i} = S_{r_i}^{|\dot{I}_1|} + j \psi S_{r_i}^{\psi} \quad (4.3)$$

Выражения (4.1–4.3) позволяют исследовать параметрическую чувствительность модуля и фазы схемной функции, если она известна в целом.

В таблице 4.1 и на рис. 4.1 и рис 4.2 представлены результаты допускового анализа диагностической функции.

Исследования (табл.4.1, рис.4.1, рис.4.2), проведены при изменении сопротивления эквивалентной схемы замещения в начале РЛ (на входе четырехполюсника РЛ)  $Z_o$  и двухполюсника, подключенного на выходе РЛ  $Z_n$ .

Диапазон изменения указанных параметров примем  $\div 2\%$ ,  $\div 5\%$  и  $\div 10\%$ .

Таблица 4.1 – Результаты допускового анализа ДФ

| S <sub>dZ</sub> |        |         |        |        |         |
|-----------------|--------|---------|--------|--------|---------|
| Zn +2%          | Zn +5% | Zn +10% | Zn -2% | Zn -5% | Zn -10% |
| 0,04            | 0,03   | 0,05    | 0,05   | 0,07   | 0,09    |
| Zo +2%          | Zo +5% | Zo +10% | Zo -2% | Zo -5% | Zo -10% |
| 1,10            | 3,12   | 7,97    | 0,94   | 2,24   | 4,51    |

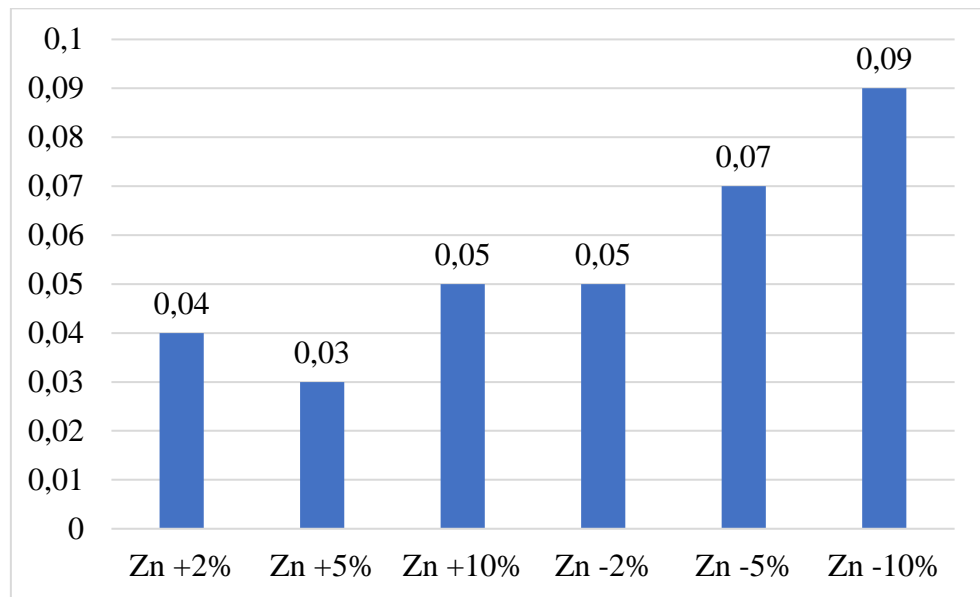


Рисунок 4.1 – Графические результаты допускового анализа  $Z_n$

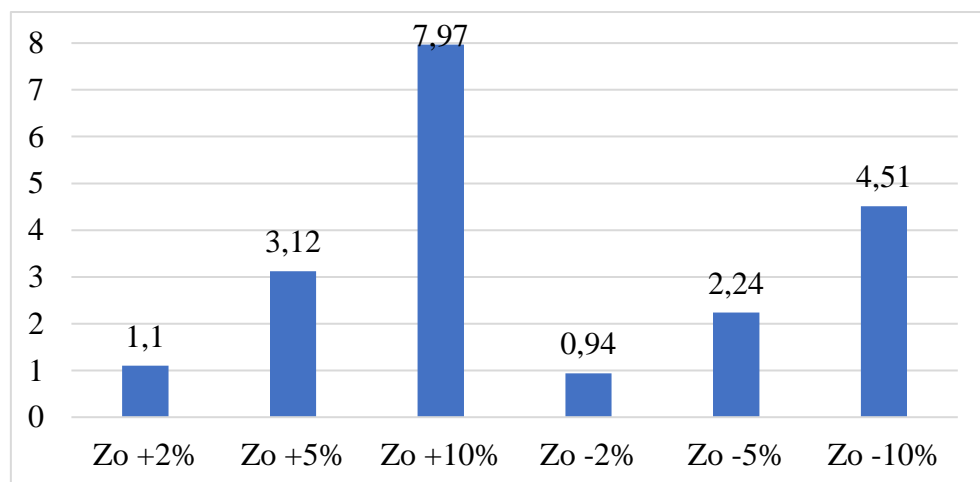


Рисунок 4.2 – Графические результаты допускового анализа  $Z_o$

Согласно графикам, представленных на рис.4.1 и рис. 4.2, наиболее чувствительным элементом, влияющим на диагностическую функцию, является величина ограничительного сопротивления  $Z_o$ , и максимальная величина изменения которой ограничивается 5 %, т. е. при технической реализации заданное ограничение необходимо учитывать, иначе погрешность определения величины сопротивления превышает 5 %.

### **4.3 Структурная схема технической диагностики сопротивлений токопроводящих стыков**

Как отмечено в главе 3, техническая диагностика сопротивлений ТПС состоит из 2-х этапов:

1 этап. Анализ информации о свойствах надежности ТПС, анализа факторов, влияющих на объект диагностики, формирования информативных признаков – параметров, характеризующих состояния ТПС, разработку математических моделей, позволяющих исследовать процесс изменения сопротивления ТПС.

2 этап. Обоснование и выбор методов – средств диагностики, формирования диагностической функции, синтеза архитектуры средств распознавания состояний ТПС, проведения диагностики ТПС, анализа результатов, применение корректирующих воздействий по минимизации погрешности оценки сопротивления ТПС.

3 этап устанавливает остаточный ресурс по сопротивлению ТПС.

Основными элементами архитектуры проектируемой системы мониторинга и диагностики ТПС являются модули датчиков, интерфейсов ввода – вывода, измерительных преобразователей, процессов с компонентами памяти, каналов передачи информации. Все элементы архитектуры находятся во взаимосвязи, образуя единую систему распознавания состояний ТПС, ориентированную на решение задачи диагностики на архитектурном уровне. При этом архитектура СТДМ должна быть достаточно свободной для организации различных вариантов множества технических реализаций с помощью различного набора компонент схемы и методов взаимодействия между ними.

Построение архитектуры ТДТПС начинается с декомпозиции априорно принятой структурной схемы на подсистемы. Декомпозиция может быть функциональной (алгоритмической) или объектной. Выбор вида декомпозиции процесс творческий, т.к. от выбранной структуры зависит эффективность, глубина и быстродействие распознавания состояния сопротивлений ТПС. Так при объектной декомпозиции СТДМ каждый объект распознавания имеет

индивидуальный технологический контроллер для решения задачи конкретного объекта распознавания.

При алгоритмической (функциональной) декомпозиции система диагностики делится на группы компонент, решающих аналогичные задачи и для каждой группы объектов, используется отдельный процессор (контроллер).

Вместе с тем, независимо от вида декомпозиции, результатом является представление СТДМ со слабо связанными связями, что означает отсутствие обратных связей, которые могут вызвать нежелательные усиления сигналов.

На рис. 4.3 представлена архитектура устройства распознавания сопротивления ТПС функциональной декомпозицией каналов.

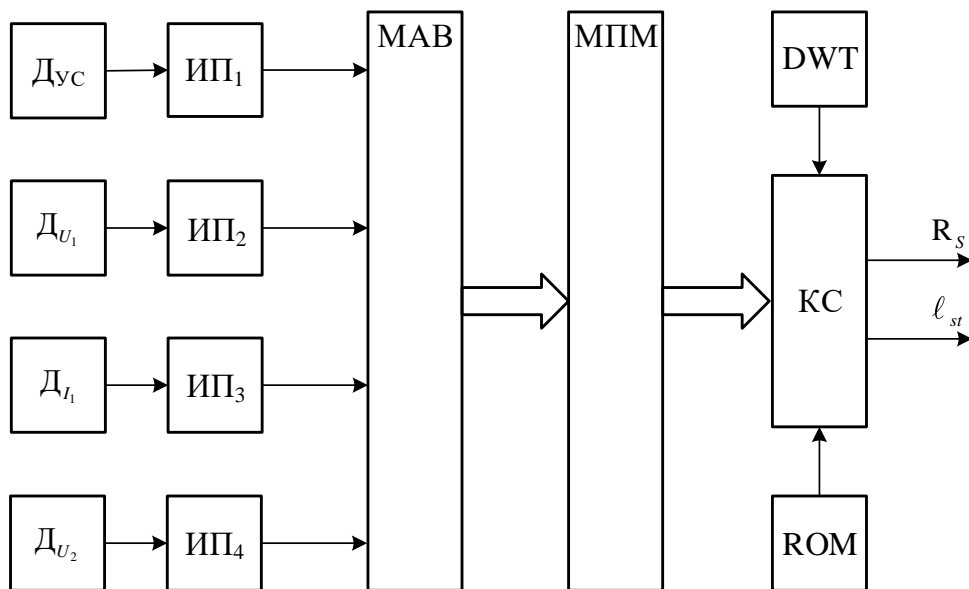


Рисунок 4.3 – Архитектура устройства распознавания сопротивления ТПС

В качестве датчиков тока и напряжения используются широко распространенные электронные преобразователи постоянного, переменного сигнала на входе в выходной сигнал с гальванической развязкой между первичной и вторичной (измерительной) цепями производства ОАО «ТВЕЛЕМ».

Измерительные преобразователи служат для нормирования выходных сигналов датчиков с допустимыми выходными сигналами модуля аналогового входа (МAB).

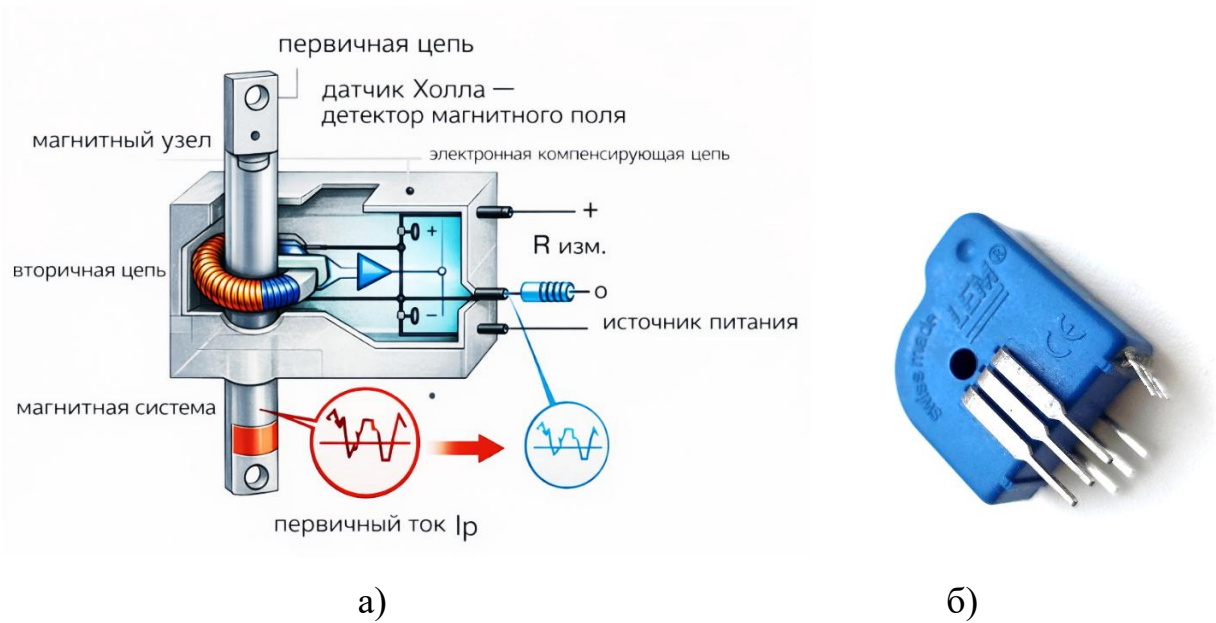
В качестве модулей аналогового входа могут применяться универсальные МAB или специализированные, которые функционируют в паре с определенными датчиками с фиксированным диапазоном измерения выходного сигнала.

Микропроцессорный модуль (МПМ) является «мозгом» системы, который в паре с классификатором сопротивлений (КС) осуществляют распознавание координаты стыка и его сопротивления, а также с помощью решающих правил вычисляют зону предотказного состояния ТПС.

## **4.2 Компоненты архитектуры устройства распознавания ТПС**

1. Первичным звеном или компонентой системы распознавания сопротивлений ТПС являются датчики съема информации с входа РЛ. Рассмотрим современные отечественные датчики преобразования тока и напряжения.

Датчик тока, реализованный в виде Модулей ЛЕМ, предназначен для электронного измерения токов: постоянного, переменного и импульсного с гальванической развязкой между первичной и вторичной (выходной) цепями (рис. 4.4).



а)

б)

Рисунок 4.4 – Схема модуля тока ЛЕМ:

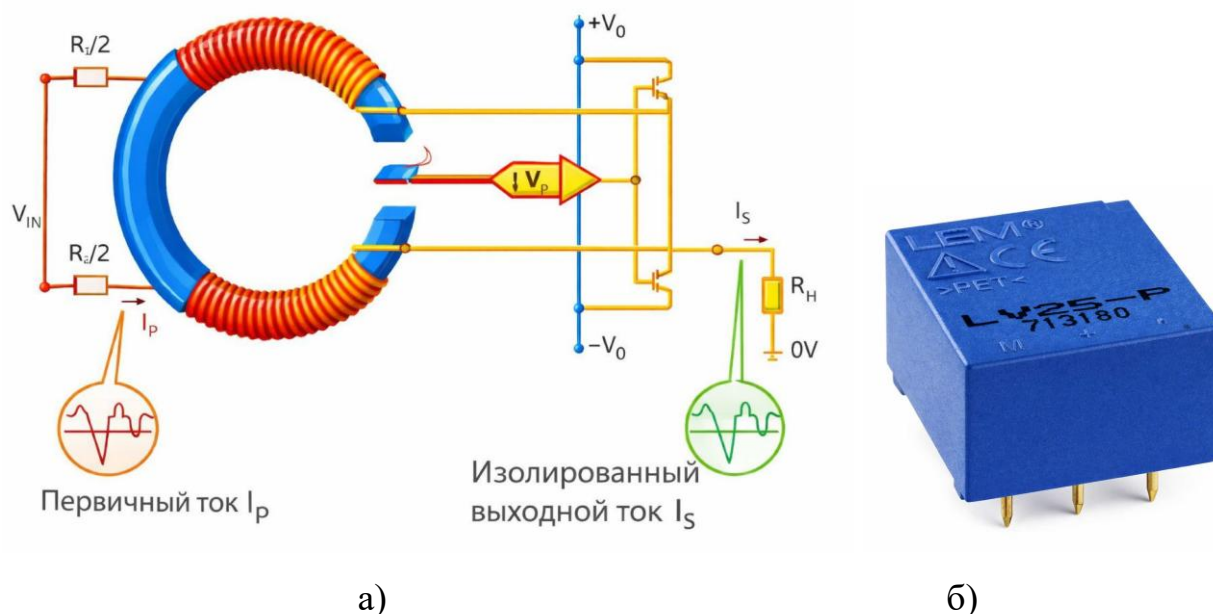
а) структурная схема модуля тока ЛЕМ;

б) конструктивное исполнение модуля тока.

Магнитное поле, создаваемое током, который необходимо измерить (первичная цепь), компенсируется полем, создаваемым вторичной обмоткой, ампер – витки которой равны ампер – виткам первичной цепи, причем, направление поля противоположно полю, вызываемому первичным током. В состав компенсирующей цепи входит датчик Холла.

Модуль ЛЕМ основан на принципе компенсации магнитного поля или нулевого магнитного потока (система с обратной связью).

Датчик напряжения ЛЕМ, предназначенный для проведения электронного изменения показателей напряжения, в свою очередь, позволяет обеспечивать высокую точность значений в широком имеющемся диапазоне частот (4.5).



а) б)  
 Рисунок 4.5 – Схема датчика напряжения ЛЕМ:  
 а) структурная схема датчика напряжения ЛЕМ;  
 б) конструктивное исполнение датчика напряжения.

Первичный ток, возникающий в измеряемой цепи путем преобразования напряжения за счет встроенного прецизионного резистора, создает магнитное поле. Это поле, соответственно, компенсируется действием поля вторичной обмотки. Ампер – витки вторичной обмотки становятся равными ампер – виткам первичной электрической цепи при условии разнонаправленности полей. В состав компенсирующей цепи входит датчик Холла, который, в свою очередь, расположен в зазоре магнитопровода.

В итоге на выходе получается точная копия гальванически развязанного первичного информационного сигнала, что характеризует стабильность электрических параметров при воздействии дестабилизирующих факторов.

2. Следующей компонентой является измерительный канал передачи информации от ДИ к МАВ. В соответствии с государственным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 8.596–2002, «Метрологическое обеспечение измерительных систем», «Измерительный канал измерительной системы - это «конструктивно или функционально выделяемая часть измерительной системы, выполняющая законченную функцию от восприятия измеряемой величины до

получения результата ее измерений, выражаемого числом или соответствующим ему кодом, или до получения аналогового сигнала, один из параметров которого – функция измеряемой величины» [91].

Исходя из приведенного определения измерительного канала и функций, выполняемых ими, и с учётом множества датчиков тока и напряжения, упрощенная структурная схема многоканальной измерительной системы представляется в виде структуры на рис. 4.6.

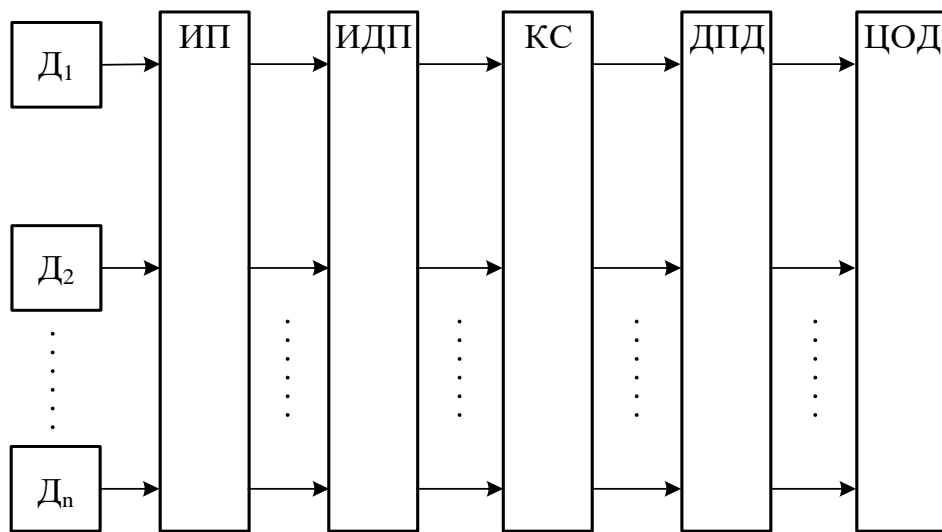


Рисунок 4.6 – Структурная схема многоканальной измерительной системы

где  $D_1 - D_n$  – датчики информации;

ИП – измерительные преобразователи;

ИДП – инкапсуляция данных в пакеты;

ДПД – деинкапсуляция пакетов данных;

ЦОД – центр обработки данных.

Основной функцией ИП является преобразование значения измеряемой величины в сигнал измерительной информации в удобную форму для преобразования, передачи, хранения.

Для одновременной передачи информации измеренных сигналов по одному каналу к центрам обработки данных в настоящее время в СТДМ используются симметричные медножильные кабели, с частотным избирательным принципом. Из-за того, что медножильные кабели подвержены электромагнитным помехам от

тяговой сети переменного и постоянного тока, а также обладают существенным затуханием информационного сигнала на протяженных участках и имеют низкую пропускную способность, в контексте актуальности непрерывного мониторинга и диагностики медножильные кабели уступают волоконно оптическим линиям. В такой физической среде сигнал, поступающий от датчика, например частотой 4224 Гц, передается в качестве непрерывного аналогового тока, занимая при этом выделенную пару проводов «точка – точка», что является неэффективным с позиции использования инфраструктуры, поскольку при физическом повреждении кабеля происходит потеря информационного сигнала и, соответственно, остановка функционирования всей системы. Также медножильные кабели имеют малый жизненный цикл.

На рис. 4.7 отображена динамика снижения жизненного цикла медного кабеля в эксплуатации.

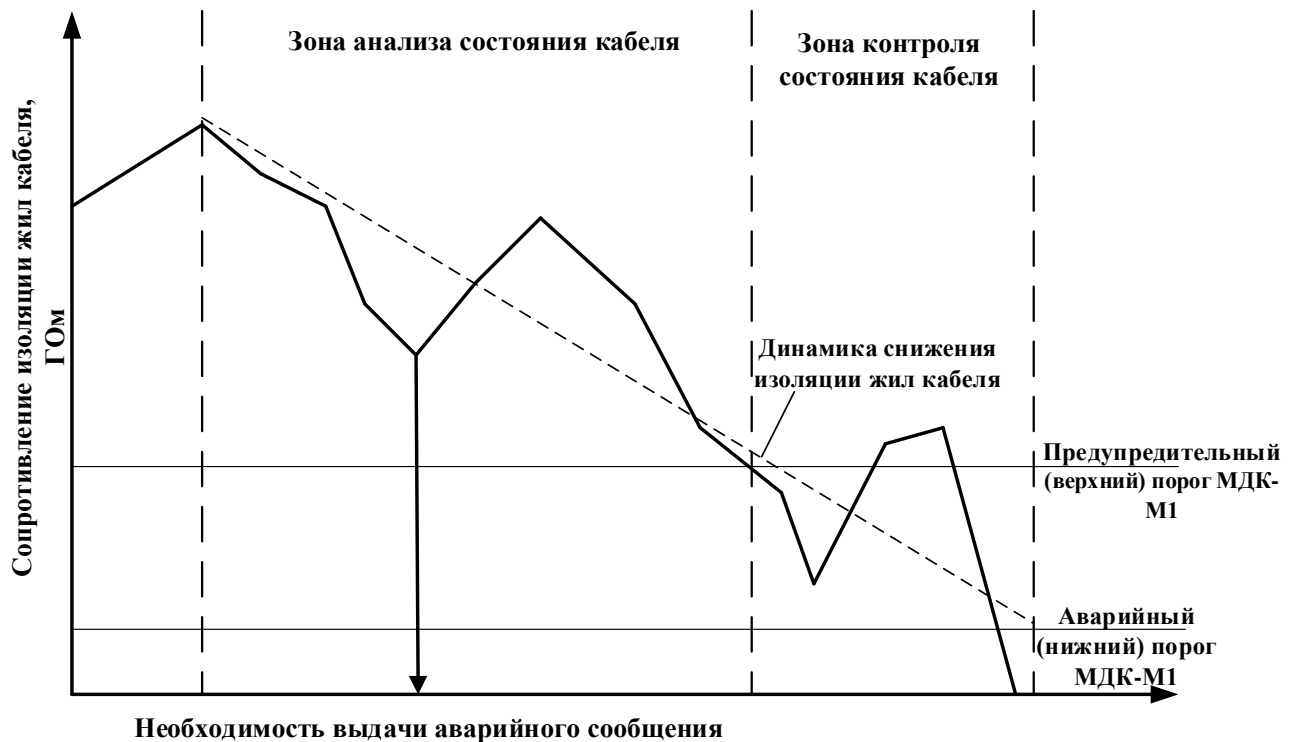


Рисунок 4.7 – Динамика снижения изоляции медного кабеля при эксплуатации и контроля модулем контроля МДК-М1

Удачная сетевая топология формирования систем передачи данных с распределенных объектов позволяет обеспечить бесперебойную передачу информации и диагностики информационных каналов. Сетевая топология предоставляет инфраструктуру для передачи диагностических данных и управления между различными узлами и устройствами в системе технической диагностики и мониторинга.

Сравнительный анализ существующих топологий сети позволяет выделить их преимущества и недостатки и оценить пропускную способность информационных каналов, их отказоустойчивость [92].

В настоящее время широко используются такие технологии как линейная "шина", «кольцо», «звезда», «дерево» и «полносвязная топология сети». Рассмотрим их.

Соединение устройств в сети с использованием топологии "шина" представляет собой простой и доступный способ соединения контрольных точек (рис.4.8). В такой сети все устройства подключены к одному кабелю, и сообщения, отправленные с одного устройства, получают все устройства в сети. Однако только адресат обрабатывает данную информацию [93].

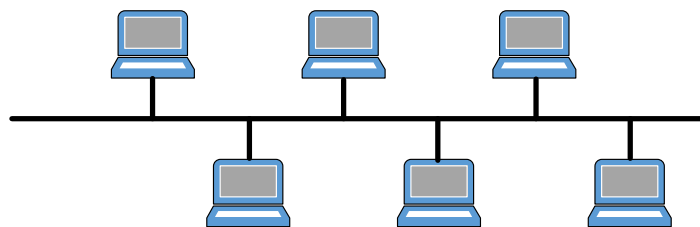


Рисунок 4.8 – Топология «шина»

Однако у такой топологии существуют недостатки. В случае поломки кабеля вся система перестает функционировать, и система передачи информации (СПД) отказывает.

Кольцевая топология обеспечивает высокую отказоустойчивость проектируемой системы диагностики, так как «активным» устройством является каждая точка сети (рис.4.9). В случае выхода из строя одного узла, информация

способна обходить поврежденную область, выбирая альтернативные пути для СПД о состоянии объекта [94].

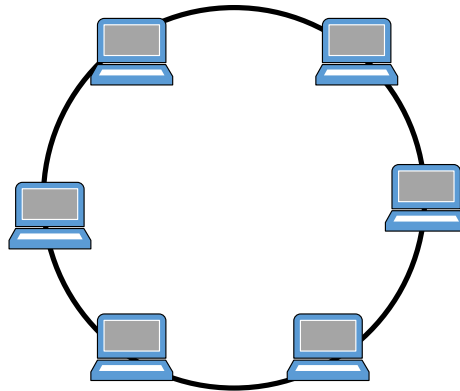


Рисунок 4.9 – Топология «кольцо»

Эту топологию используют в сетях, где требуется высокая надежность СПД, например, в системах диспетчеризации и управления. В случае возникновения проблемы в кольцевой топологии при отказе одного из действующих элементов информационный трафик маршрута направится в противоположную резервную сторону, тем самым, не утрачивая диагностическую информацию.

Использование топологии «звезда» (рис.4.10) значительно упрощает процесс поиска неисправностей в работе сети СПД. При таком соединении, где все контрольные узлы подключены к центру обработки информации (ЦОД), отказ одного узла не приведет к полной неработоспособности СПД. Однако, если ЦОД выйдет из строя, вся сеть перестанет функционировать и данные не станут поступать в центр диагностики [95-97].

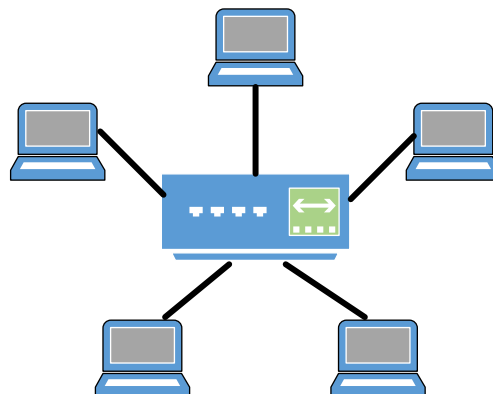


Рисунок 4.10 – Топология «звезда»

Сеть с полной связностью — это тип сети, где каждый узел (или узел данных) напрямую связан со всеми остальными узлами в сети. Это означает, что каждая пара узлов имеет прямое соединение друг с другом (рис.4.11).

В целом, сети с полной связностью предоставляют максимальную пропускную способность, надежность и минимальную задержку при передаче диагностических данных о текущем состоянии объекта.

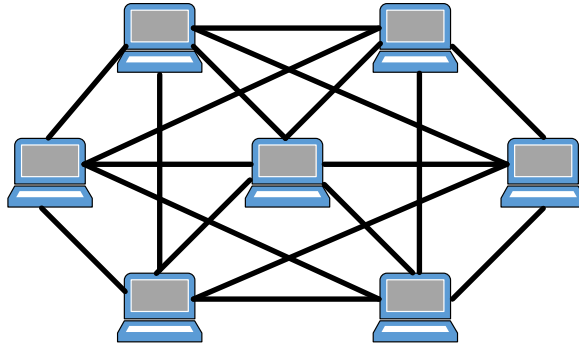


Рисунок 4.11 – Полносвязная топология сети

Сеть с частичной связностью, также известная как древовидная или иерархическая топология, представляет собой тип компьютерной сети, в которой устройства соединены в иерархическую структуру или древообразную топологию (рис.4.12).

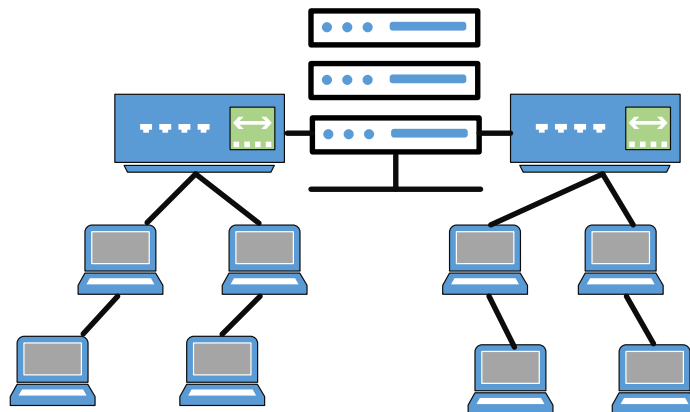


Рисунок 4.12 – Топология «дерево»

Особенности существующих топологий сети представлены в таблице 4.1. Выбор конкретной топологии зависит от потребностей и требований конкретной сети.

Таблица 4.1 – Особенности топологий сетей СПД

| Топология сети  | Преимущества  | Недостатки   |
|---|---|--|
| Топология «Кольцо»  | высокая пропускная способность, каждый узел имеет равное право передачи данных, если отказывает один узел, связь в одном направлении может быть нарушена, однако при этом задействуется резервное направление передачи данных без утраты диагностической информации и особых потерь | отсутствие возможности присоединения новых узлов без нарушения функционирования цепи   |
| Топология «Шина»  | простота и низкая стоимость установки, пропускная способность ограничивается с добавлением новых узлов  | единственная точка отказа (если отказывает один элемент, сеть останавливает транспортировку данных), ограниченная пропускная способность   |
| Топология «Звезда»  | простота установки и управления, высокая отказоустойчивость, масштабируемость и возможность централизованного контроля  | единственная определенная точка отказа (если отказывает центральный узел, сеть перестает функционировать полностью), ограниченная пропускная способность (все данные транслируются через центральный узел) |
| Сеть с полной связностью  | высокая пропускная способность, высокая отказоустойчивость (если отказывает один узел, другие узлы могут передавать данные напрямую)  | сложная установка и управление, высокие эксплуатационные и экономические затраты, большое количество соединений и кабелей  |
| Сеть с частичной связностью (также известная как древовидная или иерархическая топология) | уменьшение количества соединений и кабелей, упрощенная установка и управление   | ограниченная пропускная способность между некоторыми узлами, возможность снижения отказоустойчивости в случае отказа конкретных узлов  |

Тем не менее, несмотря на преимущества многих видов топологий сети СПД, на сегодняшний день используется классическая магистральная линейно – последовательная схема соединения «шина», структура которой отражена на рис. 4.13. В этой схеме последовательно соединены между собой:

- объекты контроля, в роли которых выступает напольное оборудование ЖАТ, в частности, рельсовые цепи с ТПС, с устройствами преобразования напряжения на выходе рельсовой линии в электрический сигнал заданной частоты;
- устройства сопряжения, необходимые для гальванической развязки, усиления информационного сигнала и, соответственно, преобразования его в формат для передачи по кабельной линии;
- селектор частот демодулирующий, позволяющий проводить демодуляцию сигналов и, как правило, осуществлять передачу кодированной содержательной информации от перегонных объектов в систему диагностики и мониторинга;
- концентратор информации, представляющий собой центральный узел сбора диагностических данных и формирующий общий пакет данных для всего контролируемого протяженного расстояния между станциями и передающий его в диспетчерский центр соответственно.

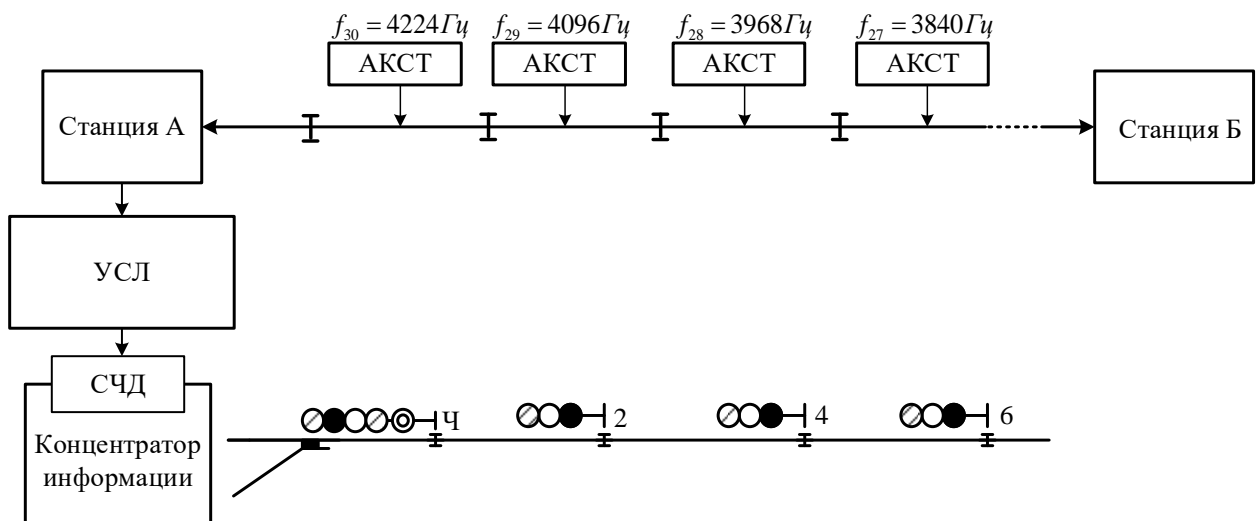


Рисунок 4.13 – Линейная схема передачи диагностической информации между станциями

При таком виде схемы участка, когда каждый элемент систематично и поочередно зависим от следующего и передача информации реализуется путем аналоговых систем с выделенными линиями связи, рациональность применения линейной топологии сводится к минимуму.

В настоящее время диагностическая информация с напольных устройств (релейных шкафов) передается по каналу связи (КС) на близ расположенную станцию по линии ДСН – ОДСН или по выделенной линии в медножильных кабелях - ДК – ОДК.

Функциональный контроль состояний объектов контроля осуществляется автоматом контроля сигнальной точки (АКСТ), настроенным на определенную частоту передачи информации из 30 выбранных частот ( $f_1 \div f_{30}$ ), представленных в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Частоты АКСТ

| Частоты |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| 384     | 512  | 704  | 832  | 960  | 1088 | 1216 | 1344 | 1472 | 1600 |
| 11      | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |
| 1792    | 1920 | 2048 | 2176 | 2304 | 2432 | 2560 | 2688 | 2816 | 2944 |
| 21      | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   |
| 3072    | 3200 | 3328 | 3456 | 3584 | 3712 | 3840 | 3968 | 4096 | 4224 |

Требованием при частотном разделении каналов является то, что каждому каналу отводится своя полоса частот на оси частот. Такая полоса, при котором спектры разных начальных сигналов не пересекались. При этом, возможен перенос

спектров  $S_i(t)$  сигналов данных в более высокочастотную область модуляцией сигналом более высокочастотного сигнала, являющегося поднесущим колебанием.

В качестве поднесущей, как правило, используется гармонический сигнал

$$U_i(t) = U_{oi} \cos(2\pi f_{oi} t + \varphi_{oi}),$$

где  $i = 1, 2, \dots, N$  – число каналов, подлежащих уплотнению;

$U_{oi}$  – амплитудное значение сигнала без модуляции;

$f_{oi}$  – частота поднесущего канала;

$\varphi_{oi}$  – начальная фаза.

При СТДМ сигнальных установок, согласно табл.4.2, перенос сигнала в область ВЧ сигналов не осуществляется, а каналом разделяются только частотно, при этом соседние частоты не пересекаются.

Для уменьшения затухания сигнала диагностики, передаваемого с сигнальных точек, частоты, присваиваемые АКСТ, выбираются обратно пропорционально расстоянию от селектора частот демодулирующего (СЧД), до станции, т.е. чем больше расстояние, тем меньше частота, и ближайšie к станции АКСТ имеют максимальные частоты, начиная с  $f_{30}$ .

Функциональные возможности АКСТ ограничены, поэтому в настоящее время используется автоматы диагностирования сигнальной установки (АДСУ) и автоматы контроля сигнальной установки (АКСУ). Указанные приборы также функционируют по организации канала связи с частотным разделением каналов (аналоговый канал).

Анализ топологий построения сетей СПД показывает, что кроме линейной «шины» они имеют высокую стоимость и требуют дополнительных ресурсов для реализации и обслуживания [98], но линейная «шина» имеет низкую надежность и малый жизненный цикл. Наиболее привлекательной топологией с позиции стоимости и надежности функционирования СПД, является топология «кольцо» с реализацией на базе ВОЛС. В настоящее время широко используется при передаче данных в телекоммуникационных системах пакетная передача данных с дискретным сигналом [99-101]. Преимуществом такой передачи данных является:

- эффективное использование пропускной способности;
- сокращенное время передачи данных;
- возможность динамического перераспределения каналов;
- возможность альтернативной маршрутизации организацией телекоммуникационных колец;
- увеличение количества подключаемых контрольно-диагностических устройств.

### **4.3 Формирование пакетов данных от сигнальной точки до центра диагностики путем инкапсуляции и деинкапсуляции информации**

Как отмечено выше, топология сети – линейная, «шина» обладает серьезным недостатком в рамках отказоустойчивости системы передачи информации, поскольку при неисправности кабельной линии, схема становится уязвимой, так как связь разрывается и перестает быть функциональной и достоверной в плане передачи данных на линейный пункт диагностики (близрасположенную станцию). Надежность линейной системы представляется произведением надежностей всех последовательных участков линии передачи информации от распределенных сигнальных установок на перегоне на диагностируемом участке перегона.

Для резервирования пути передачи диагностических данных и сохранения работоспособности схемы при отказе канала передачи информации целесообразно использовать кольцевую топологию, которая, в отличие от линейных схем передачи информации осуществляет кольцевую синхронную передачу между маршрутизаторами. С этой целью необходима схемная избыточность в виде дополнительного оптического волокна  $W_1$ , осуществляющего передачу потока (пакета) информации между маршрутизаторами в соответствии с рис. 4.14.

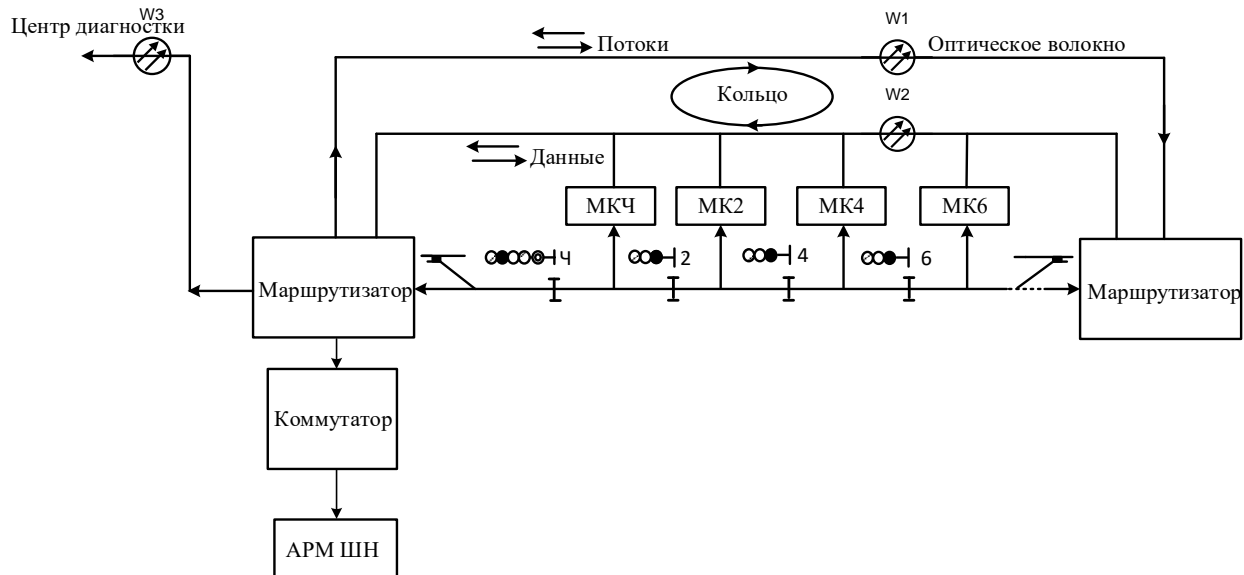


Рисунок 4.14 – Кольцевая схема передачи диагностической информации между станциями

где МКЧ, МК2, МК4... – медиаконвертеры входного светофора, сигнальных установок 2, 4,...;

АРМ ШН – автоматизированное рабочее место электромеханика диспетчерской централизации.

При построении канала передачи информации согласно рис.4.12, на всех сигнальных установках (МКЧ, МК2, МК4...) необходимо инкапсулировать диагностический сигнал для создания пакета информации, на линейных станциях, на маршрутизаторах, осуществить деинкапсуляцию пакета и формировать диагностический сигнал.

Теоретической базой формирования и протекания этих процессов служит эталонная модель взаимодействия открытых систем, называемой OSI. Она, в свою очередь, регламентирует процедуру преобразования непрерывных диагностических данных, генерируемых на сигнальных установках, последовательно преобразовывать в пакеты битов и передавать по физической среде (ВОК) с дальнейшим восстановлением на принимающей стороне в непрерывную диагностическую информацию.

В рамках диагностики и мониторинга ТПС на блок-участках, процесс транспортировки данных зарождается с сигнальной точки, где измеренные и вычисленные микропроцессором сопротивления и координаты в случае повышения сопротивления  $i$ -го токопроводящего стыка медиаконвертером преобразуются в цифровой вид и инкапсулируются в пакеты, которые по ВОК  $W_2$  подключаются к маршрутизатору, выполняющего роль обработки данных, деинкапсуляции, буферизации и выступающего в роли узлов кольцевой сети передачи данных.

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. Т.е. инкапсуляция представляет собой механизм упаковки данных, обеспечивающий адресацию, контроль целостности информации и установление упорядочивания содержательных данных, готовых для транспортировки по оптоволоконному кольцу. Подробный процесс разбиения диагностических данных, снимаемых с сигнальных точек и отправляемых до конечного пункта, представлен на рис. 4.15.

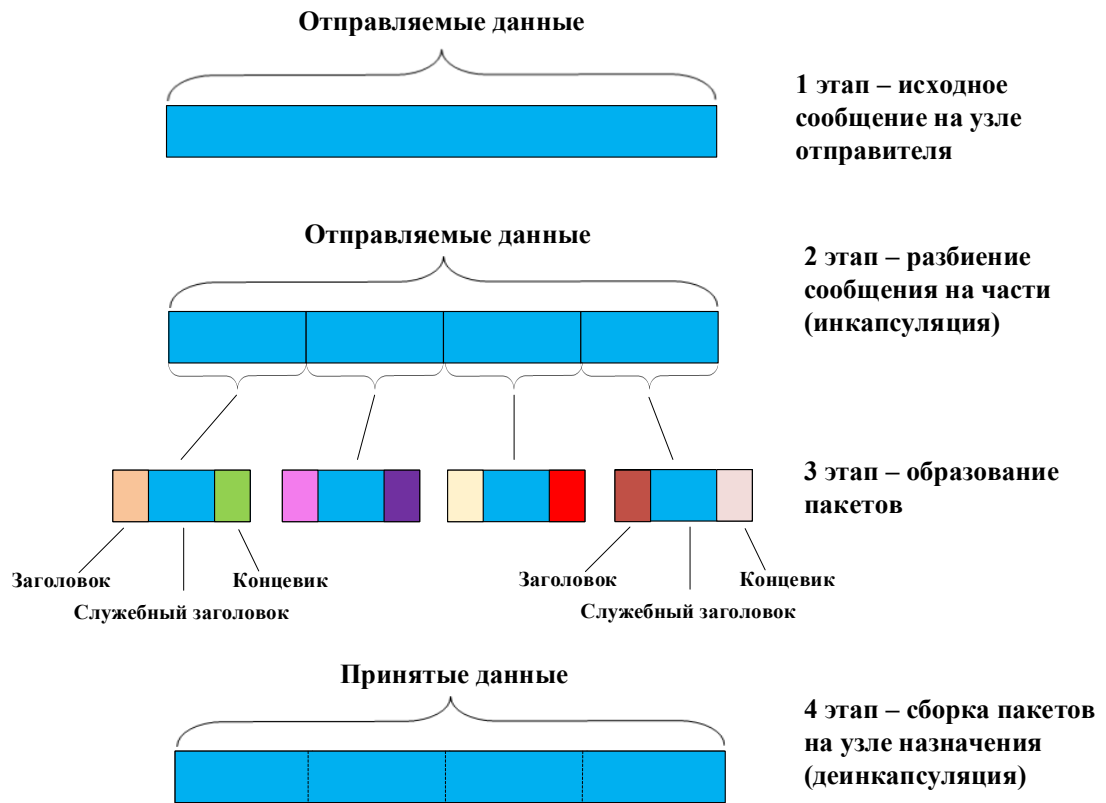


Рисунок 4.15 – Процесс разбиения диагностической информации на пакеты данных

Здесь важнейшим принципом функционирования архитектуры сети с коммутацией пакетов является принцип формирования отделенных друг от друга порций диагностических данных, которые именуются пакетами, каждый из которых хранит в себе адрес назначения, длину поля информационных данных, контрольную сумму и другие вспомогательные параметры, необходимые для отправки на следующий пункт.

Таким образом, при конкретной длине  $L$  информационного исходного сообщения  $a$ , поступающего с определенной сигнальной точки на каждый из последующих уровней  $n$  передачи данных, к нему добавляется служебный заголовок  $h_i$ , при этом, общая длина сформированная кадра после процесса инкапсуляции представится в виде:

$$L_{frame} = L_a + \sum_{i=1}^n h_i .$$

К каждому заголовку пакетов данных выделяется дополнительное отдельное поле, называемое концевиком, роль которого заключается в том, чтобы в процессе передачи информации по каналу передачи данных проверить, были ли в процессе транспортировки и разбиения данных утрачена какая-либо важная часть диагностической информации. Пакеты данных отправляются по определенному маршруту, задаваемым маршрутизатором. За счет формирования магистрального оптического кольца все элементы соединены таким образом, что обеспечивается два направления передачи информации, а именно по часовой и против часовой стрелки. При нормальных условиях функционирования сети информационный трафик идет по одному направлению пути, при возникновении отказа – автоматическим образом перенаправляется по резервному обратному пути. Связующим элементом кольцевой топологии сети с центром мониторинга является центральный коммутатор (ЦК). В роли конечного получателя данных выступает центр мониторинга, где происходит процесс деинкапсуляции и визуализации полученной информации [102 – 103].

Деинкапсуляция, в свою очередь, является обратным процессом инкапсуляции и представляет собой последовательную расшифровку служебных заголовков, т. е. удаление MAC – заголовков, анализ и удаление IP – заголовков, обработка номеров портов и соответствие действительности и корректности принятой информации по текущему состоянию объекта.

Использование в качестве канала передачи данных волоконно-оптического кабеля вместо медножильного кабеля имеет ряд преимуществ, связанных с оптическим способом передачи информации, которая позволяет и обеспечивает:

- большую дальность передачи информации до 20 км в одномодовом кабеле;
- инвариантность к электромеханическим помехам непрерывного или импульсного действия;
- устойчивость к атмосферным воздействиям: коррозии оболочек, окислению жил, изменению проводимости изоляции и т.д.;
- высокую пропускную способность и скорость оптического кабеля, и малое затухание в окнах прозрачности: 0,8 нм; 1,3 нм; 1,55 нм;

- гальваническую развязку благодаря использованию стекловолокна;
- защищенность от несанкционированного вмешательства в канал передачи информации.

Тем самым, интеграция технологии оптоволоконна, отказоустойчивой кольцевой архитектуры сети и логически структурированной процедуры инкапсуляции и деинкапсуляции позволяет создать предпосылки к формированию новой интеллектуальной инфраструктуры технической диагностики.

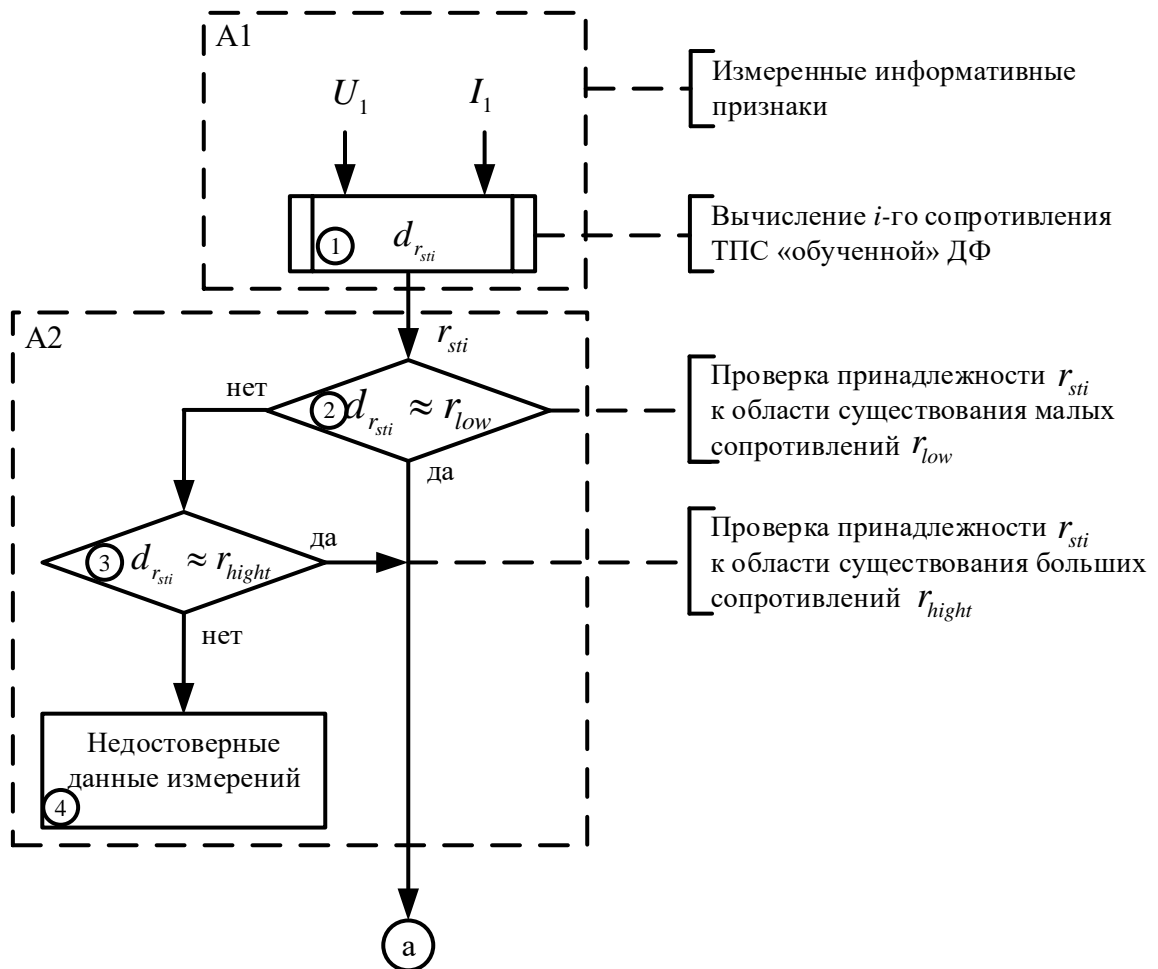
#### **4.4 Формирование обобщенной диагностической функции сопротивления и координаты токопроводящих стыков**

Как отмечено выше, элементной базой реализации системы распознавания сопротивлений и координат ТПС с измененным сопротивлением являются микропроцессорный контроллер с измерительными каналами и микроэлектронными управляемыми модулями.

Основным качеством управления процессорами распознавания ТПС является возможность синтеза схемы специализированной системы, решающей гибкого управление, контроль, непрерывное распознавание сопротивлений логическими взаимоувязанными процессами распознавание сопротивления на первом этапе, утолщение величины сопротивления на втором этапе и вычисление координаты стыка с повышенным сопротивлением на третьем этапе на основе множества диагностирующих функций и функций координат стыков. Такой комплексированный подход к решению задачи определения сопротивления и координаты ТПС, позволяет добиться распознавания координаты и величины сопротивления стыка с допустимой погрешностью, при безусловном выполнении задач решающих правил определения величины сопротивления и координаты в ограниченном диапазоне изменения величин первичных параметров РЛ, аппаратуры РЦ, особенно сопротивлений по концам РЛ с ТПС. Вопросы синтеза диагностических функций в части машинного обучения подробно рассмотрены в

гл.3 настоящей работы, а вопрос формирования обобщённой ДФ сопротивления и координаты ТПС рассматривается в настоящем разделе.

Рассмотрим алгоритм непрерывного распознавания величины и координаты ТПС с повышенным сопротивлением. На рис. 4.16 представлен фрагмент алгоритма распознавания сопротивлений и координат ТПС с использованием модулей входных электрических параметров РЛ в качестве информативных признаков и множества ДФ.



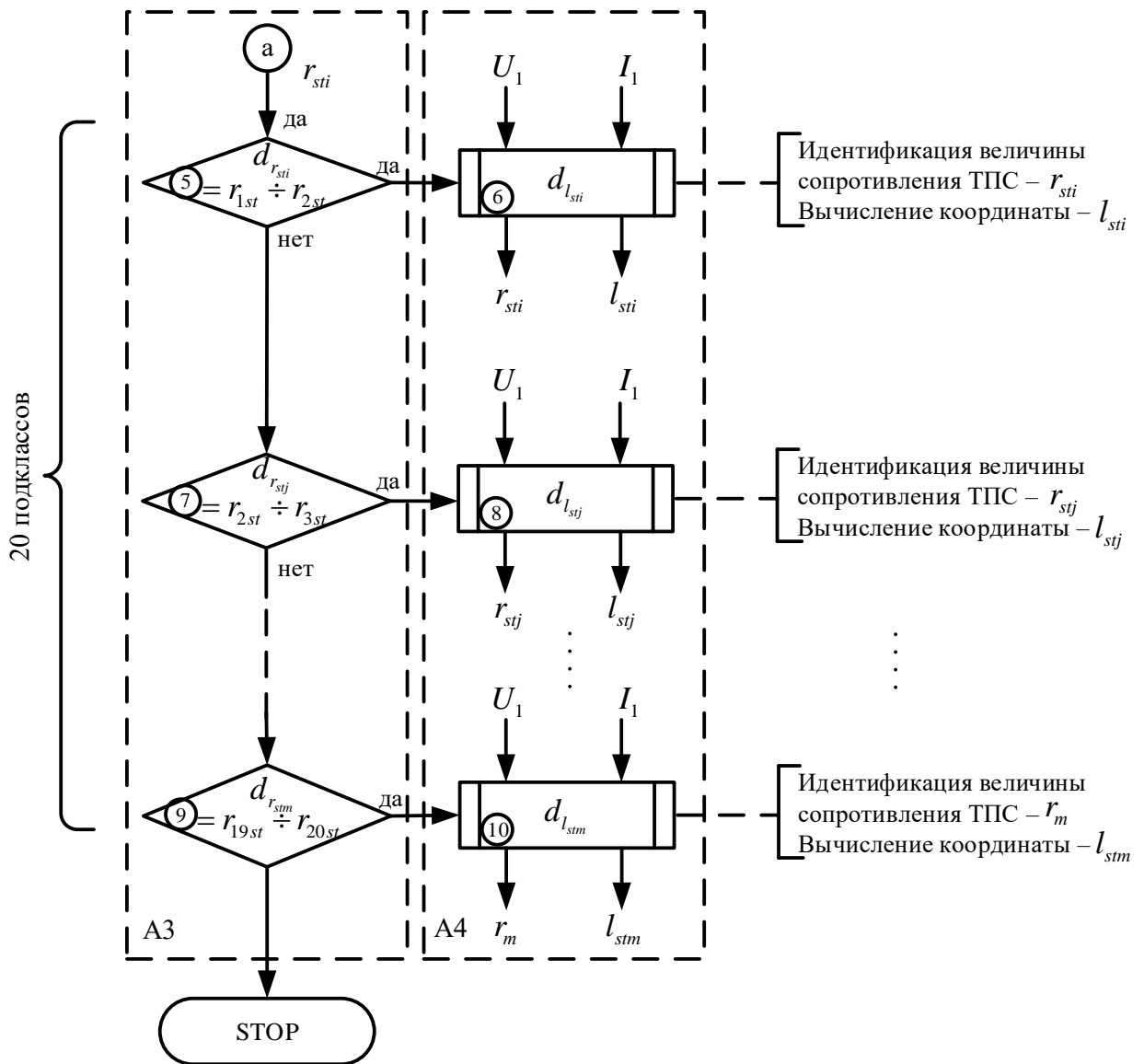


Рисунок 4.16 – Фрагмент алгоритма распознавания ТПС

Блок схема содержит 3 субблока:

A1 - субблок вычисления текущего сопротивления ТПС;

A2 – субблок решающих правил определения принадлежности текущего сопротивления ТПС к одному из каналов: клан текущих сопротивлений  $R_{ев}$  или классу высоких сопротивлений  $R_{higt}$ ;

A3 – субблоки подклассов идентификации с целью уточнения, сопротивления ТПС;

A4 – субблоки вычисления координаты ТПС с повышенным сопротивлением.

На рис. 4.17 представлено графическое отображение распознавания сопротивлений ТПС, представляющих ДФ вычисления сопротивления в диапазоне  $\{R_{\text{гов}}\}$  и  $\{R_{\text{higt}}\}$ , в соответствии с алгоритмом на рис. 4.9 (субблоки А1 и А2).

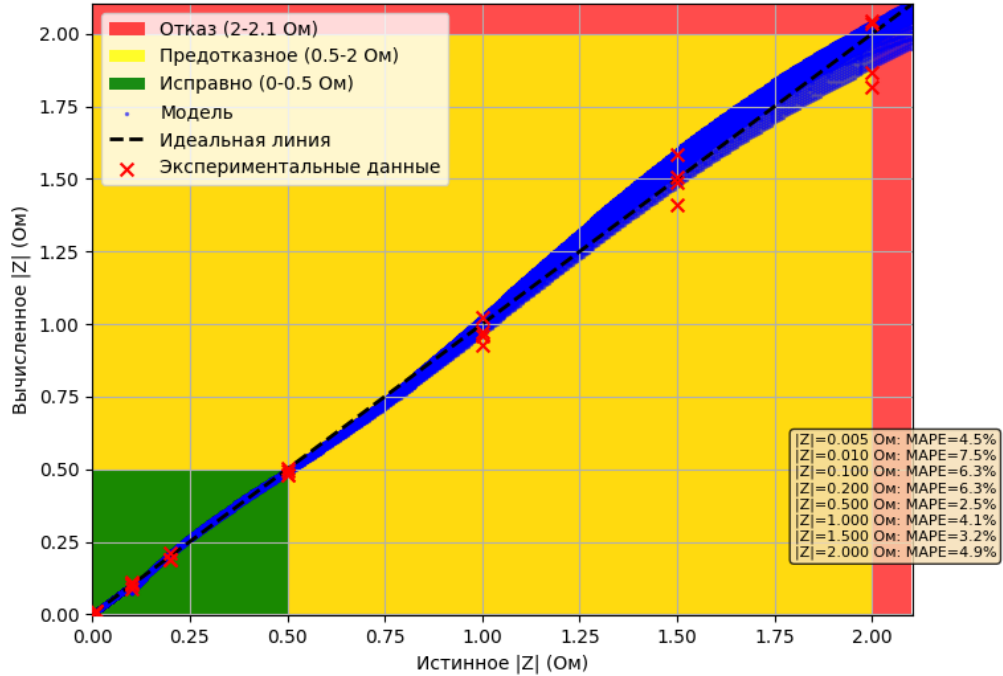


Рисунок 4.17 – Графическое отображение распознавания сопротивлений ТПС

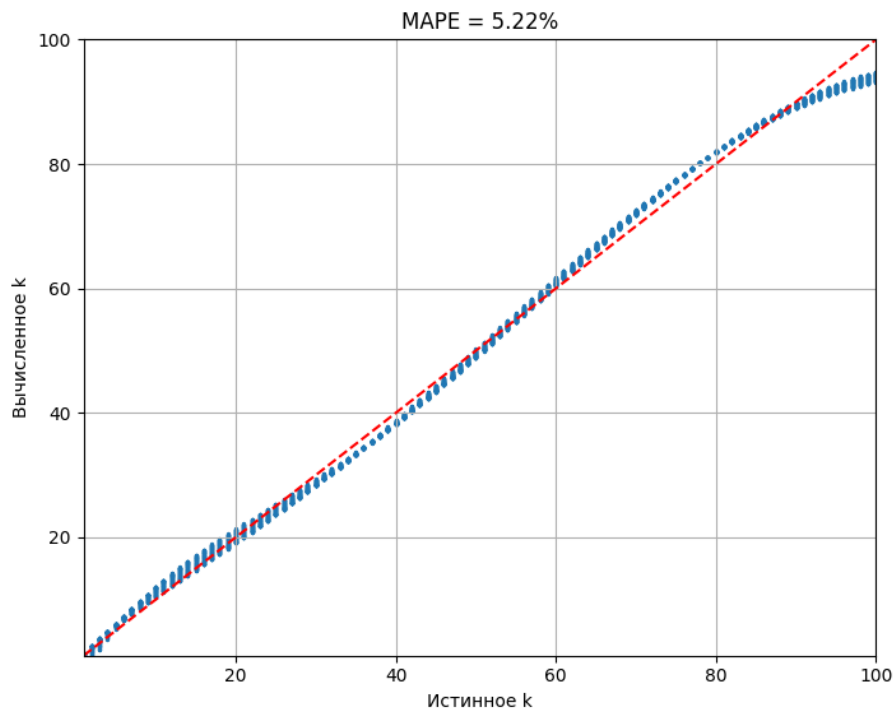


Рисунок 4.18 – Графическая иллюстрация результата распознавания координаты ТПС с повышенным сопротивлением

Согласно графикам, решающее правило определяет граничные значения  $R_{ев}$  и  $R_{higt}$  и пространство сопротивлений подразделяет на 3 класса:

$$\left. \begin{array}{l} - \text{исправное (зеленый цвет);} \\ - \text{предотказное (оранжевый);} \\ - \text{отказ ТПС (красный).} \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

Решения (4.4) при диагностике ТПС представляют собой алгоритм принятия решений, если алгоритм на рис. 4.16 представить как дерево решений в системе поддержки принятия решений (СППР) в центре диагностики.

Внедрение разработанной методики в систему СТДМ и технологический процесс обслуживания рельсовых цепей позволяет повысить достоверность ТПС при переходе к системе обслуживания по фактическому состоянию на основе информации о текущем сопротивлении стыка, что позволяет снизить эксплуатационные расходы на 10 – 15 % за счет:

- снижения эксплуатационных расходов за счет перехода технологии обслуживания ТПС от планового обслуживания к обслуживанию по техническому состоянию;
- предотвращения отказов выявлением предотказных состояний;
- сокращения времени восстановления при внезапных отказах до 40 % благодаря локализации отказов [104];
- сокращения времени восстановления при внезапных отказах до 80 % за счет выявления характера отказа;
- исключения «человеческого фактора» в процессе контроля сопротивления ТПС;
- возможности организации полноценного контроля сопротивлений ТПС.

## Выводы по четвертой главе

1. Завершающим этапом реализации методики распознавания сопротивления ТПС является разработка архитектуры устройства распознавания сопротивления ТПС, состоящей из технологического цикла проектирования и способов технической реализации, состоящей из этапов, включающих технические требования к архитектуре, допускового анализа диагностирующей функции в виде исследования критериев чувствительности схемной (диагностической) функции к изменению параметров элементов схем, разработки структурно – функциональной схемы распознающей системы сопротивления ТПС.

2. Предложенная кольцевая структура передачи информации, в отличие от линейной структуры, позволяет обеспечить повышенную надежность передачи информации о состоянии напольных устройств, в частности сопротивлений изолирующих и ТПС за счет плезиосинхронной передачи по «кольцу» диагностической информации на линейную станцию, а затем по ВОЛС транспортировки в центр диагностики железной дороги, при этом, «кольцо» реализуется на основе волоконно – оптических кабелей с трансиверами.

3. Разработана архитектура системы диагностики ТПС на основе теоретических положений методики, изложенных в главах 2 и 3, которая позволяет обеспечить безошибочную классификацию величины сопротивления за счет использования методов распознавания множеством диагностических функций, а именно,  $2^x$  диагностирующих функций сопротивления токопроводящего стыка с повышенным сопротивлением и 20 диагностирующих функций определения координат поврежденного стыка. При этом МАРЕ оценка по величине сопротивления не превышает 1,4 %, а по определению координат стыка – 5,22 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

МАРЕ 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года. Утв. решением совета директоров ОАО «РЖД» от 23.12.2013 № 19. URL: <http://doc.rzd.ru> (дата обращения: 21.03.2026).
2. Стратегия обеспечения гарантированной безопасности и надежности перевозочного процесса в холдинге «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 08.12.2015 № 2855р. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс» (дата обращения: 21.03.2026).
3. Надежкин, В. А. Необходимость автоматизированного мониторинга компонент рельсовой линии / В. А. Надежкин, С. А. Надежкина // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 6(114). – С. 146-150.
4. 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.
5. Горелик, А. В. Об оценке чувствительности процесса технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики к воздействию дестабилизирующих факторов / А. В. Горелик, А. Н. Малых, П. А. Неваров, Т. С. Щедрина // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 2. – С. 34–38.
6. 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.
7. Брылеев, А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. А. Шишляков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1978. – 344 с.

8. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : Транспорт, 1990. – 295 с.
9. Надежкин, В. А. Модели статистической оценки показателей надежности рельсовых линий / В. А. Надежкин, С. А. Надежкина // Транспорт и информационные технологии. – 2025. – Т. 15, № 4. – С. 48–64.
10. 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.
11. Григорьев, В. Л. Повышение надежности рельсовых стыков / В. Л. Григорьев // Проблемы безопасности движения на железнодорожном транспорте : межвуз. сб. науч. тр. – Москва : ВЗИИТ, 1988. – Вып. 142. – С. 71–75.
12. Устройства и элементы рельсовых линий и тяговой рельсовой сети, технические требования и нормы содержания, утверждённые распоряжением ОАО "РЖД" №651р от 03.04.2012.
13. Шаманов, В. И. Измерения, контроль и диагностика параметров рельсовых цепей / В. И. Шаманов, В. П. Суров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 2(22). – С. 143-147.
14. Дмитренко, И. Е. Измерения в устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте / И. Е. Дмитренко, В. Л. Григорьев, В. А. Казаков. – Москва : Транспорт, 1969. – 384 с.
15. Устройства СЦБ. Технология обслуживания. – Москва : Управление автоматики и телемеханики, 2013. – Ч. 3. – 108 с.
16. Патент 2296686 С1 Российская Федерация, МПК В61L 23/00. Способ диагностирования состояния элементов токопроводящих рельсовых стыков / В. И. Шаманов, А. В. Пультяков, Ю. А. Трофимов ; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. – № 2005130264/11 ; заявл. 28.09.2005 ; опубл. 10.04.2007. – EDN VNPXPA.
17. Патент 2304060 С2 Российская Федерация, МПК В61L 23/16. Устройство для диагностирования состояния элементов токопроводящих рельсовых стыков / В.

- И. Шаманов, И. Н. Шевердин, А. Н. Быстров [и др.] ; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. – № 2005130871/11 ; заявл. 05.10.2005 ; опубл. 10.08.2007. – EDN LGETOG.
18. Индикатор тока рельсовых цепей ИТРЦ-М. Технические условия : 468261.001 ТУ.
19. Ефанов, Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2016. – 171 с.
20. Вотолевский, А. Л. Проектирование дорожных центров мониторинга устройств ЖАТ / А. Л. Вотолевский // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 6. – С. 10–11.
21. Куренков, С. А. Особенности работы комплекса задач «Мониторинг» на участках движения скоростных поездов / С. А. Куренков, О. А. Котова // Теоретические и практические аспекты развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. / под ред. Вл. В. Сапожникова. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2012. – С. 77–82.
22. Москвина, Е. А. Развитие центра диагностики и мониторинга / Е. А. Москвина // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 11. – С. 2–6.
23. Новиков, О. В. Сетевой центр мониторинга средств ЖАТ / О. В. Новиков // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 6. – С. 5–6.
24. Лыков, А. А. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ / А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, С. В. Власенко // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 5(42). – С. 67-72.
25. 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. – Москва : Дашков и К°, 2025. – С. 193–195.

26. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – Москва : Российский институт стандартизации, 2024. – IV, 35 с.
27. ОСТ 32.17–92. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Основные понятия. Термины и определения. – Москва, 1992. – 15 с.
28. Пархоменко, П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – Москва : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
29. Бигус, Г. А. Диагностика технических устройств : монография / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 615 с.
30. 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 : Мелитопольский государственный университет, 2025. – Ч. 1. – С. 271–274.
31. 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.
32. Тарасова, А. Е. Исследование потенциальных возможностей классификаторов состояний рельсовых линий / А. Е. Тарасова // Наука и образование транспорту. – 2018. – № 1. – С. 223–226.
33. Надежкина, С. 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 : Вологодский государственный университет, 2025. – С. 815–817.
34. 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.

35. 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 : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2025. – С. 21–25.
36. Тарасов, Е. М. Принципы распознавания в классификаторах состояний рельсовых линий : монография / Е. М. Тарасов. – Москва : Маршрут, 2003. – 156 с.
37. Куров, М. Б. Устройство контроля проводимости изоляции рельсовых линий для систем интервального управления движением поездов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05 / Куров Михаил Борисович. – Самара, 2004.
38. Присухина, И. В. Совершенствование алгоритмов машинной классификации состояний рельсовых электротехнических систем в составе автоматической локомотивной сигнализации / И. В. Присухина, Д. В. Борисенко // Омский научный вестник. – 2019. – № 6. – С. 63–69.
39. Лунёв, С. А. Мониторинг динамических параметров рельсовых цепей — основное условие повышения пропускной способности участков железных дорог / С. А. Лунёв, С. С. Сероштанов, И. В. Присухина // Инновационный транспорт : материалы Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – С. 174–181.
40. Шаманов, В. И. Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4. – С. 196–203.
41. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : Транспорт, 1990. – 295 с.
42. Железнов, Д. В. Матрица параметров несимметричной рельсовой линии с n – полюсной схемой замещения / Д. В. Железнов, Е. М. Тарасов, А. Г. Исайчева [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2016) :

- материалы Международной конференции и молодежной школы. – Самара : СГАУ, 2016. – С. 463–467.
43. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения постоянного тока со смежными устройствами / М. П. Бадер // Энергоснабжение и водоподготовка. – 2000. – № 3. – С. 58–63.
44. Карякин, Р. Н. Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Карякин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1987. – 278 с.
45. Тарасов, Е. М. Принцип инвариантности в системах контроля состояний рельсовых линий : монография / Е. М. Тарасов, Д. В. Железнов, А. С. Белоногов. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2016. – 213 с.
46. Полевой Ю. И. Исследование адаптивных рельсовых цепей : монография / Ю. И. Полевой ; Самар. науч. центр Рос. АН, М-во трансп. РФ, Федер. агентство ж.-д. трансп., Самар. гос. акад. путей сообщ. – Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2010. – 141 с.
47. Каганов, З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З. Г. Каганов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
48. 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.
49. Надежкина, С. А. Формирование методики распознавания состояний рельсовых линий / С. А. Надежкина // Наука и образование: достижения и перспективы : материалы IX Международной научно-практической конференции. – Самара–Саратов : Амирит, 2024. – С. 114–116.
50. Свидетельство на Государственную регистрацию программы для ЭВМ № 2009610248 от 11.01.2009г. Исследование рельсовой цепи в нормальном режиме / А.Е. Горбунов, Е.М. Тарасов, М.В. Трошина, А.И. Якобчук.
51. Абдуллаев, Р.Б. Реализация подсистемы сбора диагностической информации в системах непрерывного мониторинга устройств железнодорожной автоматики на программируемых логических контроллерах // Автоматика на транспорте. – 2020. – Том 6. – №3. – С. 309-331.

52. Бушуев, А. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация : монография / А. В. Бушуев, В. И. Бушуев, С. В. Бушуев ; Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург : УрГУПС, 2014. – 311 с
53. Тарасов, Е. М. Инвариантные классификаторы состояний рельсовых линий для систем интервального управления движением поездов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05 / Тарасов Евгений Михайлович. – Самара, 2004. – 328 с
54. Тарасов, Е. М. Математические модели рельсовых цепей как объектов диагностирования / Е. М. Тарасов // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 27–32.
55. Вальд, А. Последовательный анализ / А. Вальд ; пер. с англ. – Москва : Физматгиз, 1960. – 328 с.
56. Тарасова, А. Е. Исследование информативности признаков при распознавании состояний рельсовых линий / А. Е. Тарасова, В. Л. Герус, Е. М. Тарасов // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 2. – С. 191–206.
57. Ивахненко, А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления / А. Г. Ивахненко. – Киев : Техника, 1969. – 392 с.
58. Михайлов, А. М. Мгновенное обучение при распознавании образов / А. М. Михайлов, М. Ф. Каравай, В. А. Сивцов // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 3. – С. 144-155.
59. Harrington, P. Machine learning in action / P. Harrington. – New York : Manning Publications, 2012. – 354 p.
60. Потапов, А. С. Распознавание образов и машинное восприятие / А. С. Потапов. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 548 с.
61. Тарасова, А. Е. Классификация состояний рельсовых линий при размытых образах / А. Е. Тарасова // Вестник транспорта Поволжья. – 2021. – № 3. – С. 62–67.
62. Котляренко, Н. Ф. Математическое моделирование рельсовых цепей : монография / Н. Ф. Котляренко. – Москва : Интекст, 2006. – 192 с.

63. Ту, Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес ; пер. с англ. И. Б. Гуревича ; под ред. Ю. И. Журавлева. – Москва : Мир, 1978. – 411 с.
64. Тарасова, А. Е. Определение многопараметральной чувствительности обучаемых классификаторов состояний рельсовых линий / А. Е. Тарасова, Н. Н. Васин // Наука и образование транспорту : материалы Международной научно-практической конференции. – Самара : СамГУПС, 2021. – С. 283–284.
65. Жуков, Д. А. Влияние объема контрольной выборки на качество диагностики состояния технического объекта / Д. А. Жуков, В. Н. Клячкин // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 2. – С. 90–95.
66. Фомин, Я. А. Статистическая теория распознавания образов / Я. А. Фомин, Г. Р. Тарловский. – Москва : Радио и связь, 1986. – 264 с.
67. Kulkarni, K. Pattern Recognition / K. Kulkarni, P. Turaga, A. Srivastava, R. Chellappa. – New York : Wiley, 2019. – 320 p.
68. Shalev-Shwartz, S. Understanding machine learning: from theory to algorithms / S. Shalev-Shwartz, S. Ben-David. – Cambridge : Cambridge University Press, 2014. – 449 p.
69. Mitchell, T. M. Machine learning / T. M. Mitchell. – New York : McGraw-Hill, 1997. – 432 p.
70. Чернавин, П. Ф. Комитетные конструкции в задачах классификации: проблема XOR / П. Ф. Чернавин, Н. П. Чернавин, Ф. П. Чернавин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 4 (36). – С. 35–48.
71. Platt, J. C. Fast training of support vector machines using sequential minimal optimization / J. C. Platt // Advances in Kernel Methods: Support Vector Learning. – Cambridge : MIT Press, 1998. – P. 185–208.
72. Инструкция по содержанию железнодорожного пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288р.
73. Григорьев, В. Л. Стабилизация электрического сопротивления рельсового стыка и потери энергии в этой зоне / В. Л. Григорьев // Улучшение

- электрических и механических характеристик рельсового стыка : межвузовский сборник научных трудов. – Куйбышев, 1990. – С. 29–45.
74. Щербина, Е. Г. Методика получения А-параметров эквивалентного четырехполосника рельсовой линии при изломе рельса без аналитического решения дифференциальных уравнений / Е. Г. Щербина // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 123–134.
75. Stone, M. H. The generalized Weierstrass approximation theorem / M. H. Stone // Mathematics Magazine. – 1948. – Vol. 21. – P. 167–184, 237–254.
76. Goodfellow, I. Deep learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge : MIT Press, 2016. – 775 p.
77. Brink, H. Real-world machine learning / H. Brink, J. Richards, M. Fetherolf. – New York : Manning Publications, 2016. – 264 p.
78. Тарасова, А. Е. Разработка инвариантного алгоритма классификации состояний рельсовых линий участков приближения к переездам / А. Е. Тарасова // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022) : труды Международной научно-технической конференции. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2022. – С. 366–370.
79. Tartakovsky, A. Sequential Analysis: Hypothesis Testing and Changepoint Detection / A. Tartakovsky, I. Nikiforov, M. Basseville. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 592 p.
80. Аркадьев, А. Г. Обучение машины классификации объектов / А. Г. Аркадьев, Э. М. Браверман. – Москва : Наука, 1971. – 192 с.
81. Фор, А. Восприятие и распознавание образов / А. Фор ; пер. с франц. – Москва : Машиностроение, 1989. – 272 с.
82. Ивченко, А.Ю. Практические аспекты задачи распознавания образов / А.Ю. Ивченко, Ю.Н. Орлов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2016. – № 017. – 20 с.

83. 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.
84. 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 : Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 444–448.
85. 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.
86. 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.
87. Tarasov, E. Concept of a Cyber-Physical System for Technical Diagnostics and Monitoring of Railway Automation and Telemechanics Devices / Tarasov E., Tarasova A., Bredun I., Nadezhkina S // Proceedings of SPIE. – 2025. – Vol. 13803 (Optical and Computational Technologies for Measurements and Industrial Applications, OptiComp 2025). – Article 138030F. – DOI 10.1117/12.3076867.
88. Тарасов, Е. М. Формирование функций классификатора состояний токопроводящих стыков / Е. М. Тарасов, А. Н. Рахмангулов, В. А. Надежкин, С. А. Надежкина // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 3. – С. 156–161.
89. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1978. – 240 с.

90. ГОСТ Р 8.596–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2008. – 15 с.
91. Васин, Н. Н. Современные подходы к формированию информационного взаимодействия на железнодорожном транспорте: внедрение и оптимизация технологии IP-телефонии / Н. Н. Васин, А. Е. Тарасова, С. А. Надежкина // Транспорт: наука, техника, управление. – 2024. – № 2. – С. 35–44.
92. Васин, Н. Н. Перспективы развития технологий передачи данных на сети железных дорог России / Н. Н. Васин, А. Е. Тарасова // V Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2021 : материалы XXIII Международной научно-технической конференции. – Самара : ПГУТИ, 2021. – С. 199–200.
93. 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.
94. Васин, Н. Н. Целесообразность перехода от использования медных кабелей к внедрению волоконно-оптических линий связи для обеспечения повышения надежности каналов передачи информации с АСДК / Н. Н. Васин, А. Е. Тарасова, С. А. Надежкина // Наука и образование транспорту. – 2023. – № 1. – С. 209–211.
95. Убайдуллаев, Р. Р. Волоконно-оптические сети / Р. Р. Убайдуллаев. – Москва : Эко-Трендз, 2001. – 267 с.
96. Плеханов, П. А. Вопросы обеспечения безопасности железнодорожных телекоммуникационных систем международных транспортных коридоров / П. А. Плеханов // Бюллетень результатов научных исследований. – 2012. – № 3 (2). – С. 85–97.
97. Кульгин, М. В. Технологии построения корпоративных сетей : монография / М. В. Кульгин. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 320 с.

98. Егоров, В. Б. Вопросы реализации объединяющей среды в архитектуре децентрализованной пакетной коммутации / В. Б. Егоров // Информатика и ее применения. – 2009. – Т. 3, № 2. – С. 43-52.
99. Орлова, Е. Ю. Оптоволоконные технологии и сферы их применения / Е. Ю. Орлова, А. А. Орлов // Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10, № 3. – С. 63–66.
100. Бадеева, Е. А. Реализация принципа двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах / Е. А. Бадеева, Т. И. Мурашкина, Е. А. Полякова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2021. – № 2 (58). – С. 87–98.
101. Артюшенко, В. М. Информационные технологии и управляющие системы : монография / под ред. В. М. Артюшенко. – Москва : Научный консультант, 2015. – 184 с.
102. Агаев, Р. П. Об оценке отказоустойчивости сетей с кольцевой структурой / Р. П. Агаев, С. В. Никифоров // Проблемы регионального и муниципального управления : материалы конференции. – 2008.
103. Ефанов, Д. В. Основы теории функционального контроля логических устройств автоматики / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – Beau Bassin : LAP LAMBERT, 2018. – 198 с.
104. Дмитренко, И.Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики. — 2-е изд., перераб. и доп.. — М. : Транспорт, 1986. — 142 с. ил.; 21.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ВХОДНЫХ И  
ВЫХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

# Исходные параметры
E = 5
Zn = 0.198 * np.exp(64 * 1j * np.pi / 180)
Zo = 0.292 * np.exp(80 * 1j * np.pi / 180)
leng = 2.5
Zrl = 0.8 * np.exp(65 * 1j * np.pi / 180)
gMax = 4
gMin = 0.025
g = gMin
Omega = 314
r0 = 700 * 0.000001
L0 = 1.27 * 0.000001
leng_zvena = 0.025
Ra = 0.2877
Zs = r0 + (1j * Omega * L0)
Zrz = 0.239 + 0.781j
st = 0

steps = int((gMax - gMin) / 0.025) + 1

Mat = np.zeros((steps, 25))

while g <= gMax:
    Zv = np.sqrt(Zrl / g)
    gamma = np.sqrt(Zrl * g)
    ChP_RL = np.array([
        [np.cosh(gamma * leng), Zv * np.sinh(gamma *
leng)],
        [(np.sinh(gamma * leng)) / Zv, np.cosh(gamma *
leng)]]

    Zvzv = np.sqrt(Zrz / g)
    gammazv = np.sqrt(Zrz * g)
    ChP_rz = np.array([
        [np.cosh(gammazv * leng_zvena), Zvzv *

```

```

np.sinh(gammazv * leng_zvena)],
    [(np.sinh(gammazv * leng_zvena)) / Zvzv,
np.cosh(gammazv * leng_zvena)]]

ChP_st = np.array([[1, Zs], [0, 1]])
result_matrix = np.eye(2, dtype=complex)
for _ in range(100):
    result_matrix = np.dot(result_matrix, ChP_rz)
    result_matrix = np.dot(result_matrix, ChP_st)
    result_matrix = np.dot(result_matrix, ChP_st)

U_2 = (E * Zn) / ((ChP_RL[1, 0] * Zn + ChP_RL[1, 1]) *
Zo + ChP_RL[0, 0] * Zn + ChP_RL[0, 1])
U_1 = (E * (ChP_RL[0, 0] * Zn + ChP_RL[0, 1])) /
((ChP_RL[1, 0] * Zn + ChP_RL[1, 1]) * Zo +
ChP_RL[0, 0] * Zn + ChP_RL[0, 1])
I_1 = (E * (ChP_RL[1, 0] * Zn + ChP_RL[1, 1])) /
((ChP_RL[1, 0] * Zn + ChP_RL[1, 1]) * Zo +
ChP_RL[0, 0] * Zn + ChP_RL[0, 1])
U_2z = (E * Zn) / (
    (result_matrix[1, 0] * Zn +
result_matrix[1, 1]) * Zo + result_matrix[0, 0] * Zn +
result_matrix[0, 1])
U_1z = (E * (result_matrix[0, 0] * Zn +
result_matrix[0, 1])) / (
    (result_matrix[1, 0] * Zn +
result_matrix[1, 1]) * Zo +
    result_matrix[0, 0] * Zn + result_matrix[0,
1])
I_1z = (E * (result_matrix[1, 0] * Zn +
result_matrix[1, 1])) / (
    (result_matrix[1, 0] * Zn +
result_matrix[1, 1]) * Zo +
    result_matrix[0, 0] * Zn + result_matrix[0,
1])

Mat[st, 0] = g
Mat[st, 1] = np.abs(U_2)
Mat[st, 2] = np.angle(U_2, deg=True)
Mat[st, 3] = np.abs(U_2z)
Mat[st, 4] = np.angle(U_2z, deg=True)
Mat[st, 5] = np.abs(U_1)
Mat[st, 6] = np.angle(U_1, deg=True)

```

```

Mat[st, 7] = np.abs(U_1z)
Mat[st, 8] = np.angle(U_1z, deg=True)
Mat[st, 9] = np.abs(I_1)
Mat[st, 10] = np.angle(I_1, deg=True)
Mat[st, 11] = np.abs(I_1z)
Mat[st, 12] = np.angle(I_1z, deg=True)

Mat[st, 13] = np.abs(np.abs(U_2) - np.abs(U_2z)) #
Абс. ошибка |U_2|
Mat[st, 14] = np.abs(np.angle(U_2, deg=True) -
np.angle(U_2z, deg=True)) # Абс. ошибка фазы U_2
Mat[st, 15] = np.abs(np.abs(U_1) - np.abs(U_1z)) #
Абс. ошибка |U_1|
Mat[st, 16] = np.abs(np.angle(U_1, deg=True) -
np.angle(U_1z, deg=True)) # Абс. ошибка фазы U_1
Mat[st, 17] = np.abs(np.abs(I_1) - np.abs(I_1z)) #
Абс. ошибка |I_1|
Mat[st, 18] = np.abs(np.angle(I_1, deg=True) -
np.angle(I_1z, deg=True)) # Абс. ошибка фазы I_1

Mat[st, 19] = 100 * np.abs((np.abs(U_2) - np.abs(U_2z))
/ np.abs(U_2)) if np.abs(
U_2) != 0 else 0 # Отн. ошибка |U_2|
Mat[st, 20] = 100 * np.abs(
(np.angle(U_2, deg=True) - np.angle(U_2z,
deg=True)) / np.angle(U_2, deg=True)) if np.angle(U_2,
deg=True) != 0 else 0 # Отн. ошибка фазы U_2
Mat[st, 21] = 100 * np.abs((np.abs(U_1) - np.abs(U_1z))
/ np.abs(U_1)) if np.abs(
U_1) != 0 else 0 # Отн. ошибка |U_1|
Mat[st, 22] = 100 * np.abs(
(np.angle(U_1, deg=True) - np.angle(U_1z,
deg=True)) / np.angle(U_1, deg=True)) if np.angle(U_1,
deg=True) != 0 else 0 # Отн. ошибка фазы U_1
Mat[st, 23] = 100 * np.abs((np.abs(I_1) - np.abs(I_1z))
/ np.abs(I_1)) if np.abs(
I_1) != 0 else 0 # Отн. ошибка |I_1|
Mat[st, 24] = 100 * np.abs(
(np.angle(I_1, deg=True) - np.angle(I_1z,
deg=True)) / np.angle(I_1, deg=True)) if np.angle(I_1,
deg=True) != 0 else 0 # Отн. ошибка фазы I_1

```

```

st += 1
g += 0.025

# Эксель
df = pd.DataFrame(Mat, columns=[
    'g',
    '|U_2|', 'Фаза U_2 (°)',
    '|U_2z|', 'Фаза U_2z (°)',
    '|U_1|', 'Фаза U_1 (°)',
    '|U_1z|', 'Фаза U_1z (°)',
    '|I_1|', 'Фаза I_1 (°)',
    '|I_1z|', 'Фаза I_1z (°)',
    'Абс. ошибка |U_2|', 'Абс. ошибка фазы U_2 (°)',
    'Абс. ошибка |U_1|', 'Абс. ошибка фазы U_1 (°)',
    'Абс. ошибка |I_1|', 'Абс. ошибка фазы I_1 (°)',
    'Отн. ошибка |U_2| (%)', 'Отн. ошибка фазы U_2 (%)',
    'Отн. ошибка |U_1| (%)', 'Отн. ошибка фазы U_1 (%)',
    'Отн. ошибка |I_1| (%)', 'Отн. ошибка фазы I_1 (%)'
])

df = df.round(3)
df.to_excel('results_with_errors.xlsx', index=False)

# Построение графиков
plt.figure(figsize=(12, 8))

# Модули напряжений и токов
plt.subplot(2, 2, 1)
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 1], label='|U_2|')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 3], label='|U_2z|')
plt.xlabel('g')
plt.ylabel('Модуль напряжения')
plt.title('Модули U_2 и U_2z')
plt.grid(True)
plt.legend()

plt.subplot(2, 2, 2)
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 5], label='|U_1|')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 7], label='|U_1z|')
plt.xlabel('g')
plt.ylabel('Модуль напряжения')
plt.title('Модули U_1 и U_1z')
plt.grid(True)
plt.legend()

```

```

plt.subplot(2, 2, 3)
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 9], label='|I_1|')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 11], label='|I_1z|')
plt.xlabel('g')
plt.ylabel('Модуль тока')
plt.title('Модули I_1 и I_1z')
plt.grid(True)
plt.legend()

# Фазы напряжений и токов
plt.subplot(2, 2, 4)
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 2], label='Фаза U_2 (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 4], label='Фаза U_2z (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 6], label='Фаза U_1 (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 8], label='Фаза U_1z (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 10], label='Фаза I_1 (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 12], label='Фаза I_1z (°)')
plt.xlabel('g')
plt.ylabel('Фаза (градусы)')
plt.title('Фазы напряжений и токов')
plt.grid(True)
plt.legend(fontsize='small')
plt.tight_layout()
plt.show()

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ**  
**ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЛ ПРИ ЗАМЕЩЕНИИ ВСЕЙ**  
**РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ ОДНИМ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОМ**

Таблица Б.1 - Результаты исследований

| $g$   | $ U_2 $ | $\varphi U_2$ | $ U_{2z} $ | $\varphi U_{2z}$ | $ U_1 $ | $\varphi U_1$ | $ U_{1z} $ | $\varphi U_{1z}$ | $ I_1 $ | $\varphi I_1$ | $ I_{1z} $ | $\varphi I_{1z}$ |
|-------|---------|---------------|------------|------------------|---------|---------------|------------|------------------|---------|---------------|------------|------------------|
| 0,025 | 0,394   | -4,265        | 0,37       | -8,427           | 4,424   | -2,085        | 4,451      | -1,477           | 2,058   | -64,467       | 1,926      | -68,234          |
| 0,05  | 0,39    | -5,848        | 0,366      | -10,143          | 4,418   | -2,409        | 4,445      | -1,801           | 2,106   | -62,422       | 1,968      | -65,933          |
| 0,075 | 0,385   | -7,414        | 0,362      | -11,843          | 4,411   | -2,728        | 4,438      | -2,121           | 2,158   | -60,533       | 2,016      | -63,798          |
| 0,1   | 0,38    | -8,964        | 0,358      | -13,526          | 4,404   | -3,042        | 4,431      | -2,435           | 2,213   | -58,796       | 2,067      | -61,83           |
| 0,125 | 0,375   | -10,496       | 0,353      | -15,191          | 4,396   | -3,35         | 4,423      | -2,743           | 2,271   | -57,205       | 2,122      | -60,024          |
| 0,15  | 0,37    | -12,012       | 0,349      | -16,84           | 4,388   | -3,652        | 4,415      | -3,045           | 2,331   | -55,755       | 2,179      | -58,377          |
| 0,175 | 0,365   | -13,51        | 0,345      | -18,47           | 4,38    | -3,948        | 4,406      | -3,342           | 2,393   | -54,436       | 2,24       | -56,88           |
| 0,2   | 0,361   | -14,992       | 0,34       | -20,082          | 4,371   | -4,239        | 4,397      | -3,632           | 2,457   | -53,24        | 2,302      | -55,525          |
| 0,225 | 0,356   | -16,456       | 0,336      | -21,676          | 4,362   | -4,523        | 4,388      | -3,916           | 2,523   | -52,159       | 2,366      | -54,301          |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |         |       |         |       |        |       |        |       |         |       |         |
|-------|-------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|---------|
| 0,25  | 0,351 | -17,902 | 0,332 | -23,252 | 4,353 | -4,802 | 4,378 | -4,194 | 2,589 | -51,184 | 2,432 | -53,2   |
| 0,275 | 0,346 | -19,332 | 0,327 | -24,81  | 4,343 | -5,074 | 4,368 | -4,466 | 2,656 | -50,305 | 2,498 | -52,211 |
| 0,3   | 0,341 | -20,744 | 0,323 | -26,349 | 4,334 | -5,341 | 4,358 | -4,731 | 2,723 | -49,516 | 2,565 | -51,325 |
| 0,325 | 0,336 | -22,139 | 0,318 | -27,87  | 4,324 | -5,602 | 4,347 | -4,99  | 2,791 | -48,808 | 2,633 | -50,533 |
| 0,35  | 0,331 | -23,517 | 0,314 | -29,373 | 4,313 | -5,856 | 4,336 | -5,243 | 2,858 | -48,175 | 2,7   | -49,827 |
| 0,375 | 0,327 | -24,879 | 0,31  | -30,857 | 4,303 | -6,106 | 4,326 | -5,49  | 2,926 | -47,609 | 2,768 | -49,199 |
| 0,4   | 0,322 | -26,223 | 0,305 | -32,324 | 4,292 | -6,349 | 4,315 | -5,731 | 2,993 | -47,105 | 2,835 | -48,642 |
| 0,425 | 0,317 | -27,552 | 0,301 | -33,772 | 4,282 | -6,586 | 4,303 | -5,966 | 3,06  | -46,656 | 2,902 | -48,148 |
| 0,45  | 0,313 | -28,863 | 0,297 | -35,203 | 4,271 | -6,818 | 4,292 | -6,194 | 3,126 | -46,258 | 2,969 | -47,712 |
| 0,475 | 0,308 | -30,159 | 0,292 | -36,616 | 4,26  | -7,045 | 4,281 | -6,417 | 3,192 | -45,906 | 3,035 | -47,328 |
| 0,5   | 0,303 | -31,439 | 0,288 | -38,011 | 4,249 | -7,266 | 4,269 | -6,634 | 3,257 | -45,596 | 3,101 | -46,992 |
| 0,525 | 0,299 | -32,703 | 0,284 | -39,389 | 4,238 | -7,482 | 4,258 | -6,846 | 3,322 | -45,324 | 3,166 | -46,698 |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |         |       |         |       |        |       |        |       |         |       |         |
|-------|-------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|---------|
| 0,55  | 0,294 | -33,951 | 0,28  | -40,75  | 4,227 | -7,693 | 4,246 | -7,052 | 3,386 | -45,086 | 3,23  | -46,442 |
| 0,575 | 0,29  | -35,184 | 0,275 | -42,095 | 4,216 | -7,898 | 4,235 | -7,252 | 3,449 | -44,879 | 3,293 | -46,221 |
| 0,6   | 0,286 | -36,402 | 0,271 | -43,422 | 4,205 | -8,099 | 4,223 | -7,447 | 3,511 | -44,7   | 3,355 | -46,031 |
| 0,625 | 0,281 | -37,606 | 0,267 | -44,734 | 4,194 | -8,294 | 4,212 | -7,638 | 3,572 | -44,547 | 3,417 | -45,87  |
| 0,65  | 0,277 | -38,795 | 0,263 | -46,029 | 4,183 | -8,485 | 4,2   | -7,823 | 3,633 | -44,416 | 3,477 | -45,734 |
| 0,675 | 0,273 | -39,969 | 0,259 | -47,309 | 4,172 | -8,672 | 4,188 | -8,003 | 3,692 | -44,307 | 3,537 | -45,621 |
| 0,7   | 0,269 | -41,13  | 0,255 | -48,573 | 4,161 | -8,854 | 4,177 | -8,178 | 3,751 | -44,217 | 3,595 | -45,528 |
| 0,725 | 0,265 | -42,276 | 0,251 | -49,822 | 4,15  | -9,031 | 4,166 | -8,349 | 3,809 | -44,143 | 3,653 | -45,455 |
| 0,75  | 0,261 | -43,41  | 0,248 | -51,056 | 4,139 | -9,205 | 4,154 | -8,516 | 3,866 | -44,086 | 3,71  | -45,397 |
| 0,775 | 0,257 | -44,529 | 0,244 | -52,275 | 4,128 | -9,374 | 4,143 | -8,678 | 3,922 | -44,042 | 3,766 | -45,355 |
| 0,8   | 0,253 | -45,636 | 0,24  | -53,48  | 4,117 | -9,539 | 4,132 | -8,836 | 3,977 | -44,012 | 3,82  | -45,327 |
| 0,825 | 0,249 | -46,731 | 0,237 | -54,671 | 4,107 | -9,701 | 4,12  | -8,99  | 4,031 | -43,992 | 3,874 | -45,311 |

Продолжение таблицы Б.1

|       |       |         |       |         |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 0,85  | 0,245 | -47,812 | 0,233 | -55,848 | 4,096 | -9,858  | 4,109 | -9,14   | 4,084 | -43,983 | 3,927 | -45,305 |
| 0,875 | 0,241 | -48,882 | 0,229 | -57,011 | 4,085 | -10,012 | 4,098 | -9,286  | 4,137 | -43,984 | 3,979 | -45,31  |
| 0,9   | 0,238 | -49,939 | 0,226 | -58,161 | 4,075 | -10,163 | 4,087 | -9,429  | 4,188 | -43,993 | 4,031 | -45,323 |
| 0,925 | 0,234 | -50,985 | 0,222 | -59,299 | 4,064 | -10,31  | 4,077 | -9,568  | 4,239 | -44,01  | 4,081 | -45,344 |
| 0,95  | 0,231 | -52,019 | 0,219 | -60,423 | 4,054 | -10,453 | 4,066 | -9,704  | 4,289 | -44,033 | 4,13  | -45,373 |
| 0,975 | 0,227 | -53,042 | 0,216 | -61,535 | 4,043 | -10,594 | 4,055 | -9,836  | 4,338 | -44,063 | 4,179 | -45,407 |
| 1     | 0,224 | -54,054 | 0,212 | -62,635 | 4,033 | -10,731 | 4,045 | -9,965  | 4,386 | -44,099 | 4,226 | -45,448 |
| 1,025 | 0,22  | -55,055 | 0,209 | -63,722 | 4,023 | -10,866 | 4,034 | -10,092 | 4,433 | -44,14  | 4,273 | -45,493 |
| 1,05  | 0,217 | -56,045 | 0,206 | -64,798 | 4,013 | -10,997 | 4,024 | -10,215 | 4,48  | -44,185 | 4,319 | -45,543 |
| 1,075 | 0,214 | -57,026 | 0,203 | -65,863 | 4,003 | -11,126 | 4,014 | -10,335 | 4,526 | -44,234 | 4,364 | -45,597 |
| 1,1   | 0,211 | -57,996 | 0,2   | -66,917 | 3,993 | -11,252 | 4,004 | -10,453 | 4,571 | -44,287 | 4,409 | -45,654 |
| 1,125 | 0,207 | -58,956 | 0,197 | -67,959 | 3,983 | -11,375 | 3,993 | -10,568 | 4,615 | -44,343 | 4,453 | -45,715 |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |         |       |         |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 1,15  | 0,204 | -59,906 | 0,194 | -68,991 | 3,974 | -11,496 | 3,984 | -10,68  | 4,659 | -44,402 | 4,495 | -45,778 |
| 1,175 | 0,201 | -60,847 | 0,191 | -70,012 | 3,964 | -11,614 | 3,974 | -10,79  | 4,702 | -44,463 | 4,538 | -45,843 |
| 1,2   | 0,198 | -61,779 | 0,188 | -71,024 | 3,954 | -11,73  | 3,964 | -10,898 | 4,744 | -44,527 | 4,579 | -45,911 |
| 1,225 | 0,195 | -62,701 | 0,185 | -72,025 | 3,945 | -11,844 | 3,955 | -11,003 | 4,786 | -44,593 | 4,62  | -45,98  |
| 1,25  | 0,192 | -63,614 | 0,183 | -73,016 | 3,936 | -11,955 | 3,945 | -11,106 | 4,827 | -44,66  | 4,66  | -46,051 |
| 1,275 | 0,19  | -64,519 | 0,18  | -73,998 | 3,926 | -12,064 | 3,936 | -11,207 | 4,867 | -44,73  | 4,7   | -46,123 |
| 1,3   | 0,187 | -65,416 | 0,177 | -74,97  | 3,917 | -12,172 | 3,926 | -11,306 | 4,907 | -44,8   | 4,738 | -46,197 |
| 1,325 | 0,184 | -66,303 | 0,175 | -75,933 | 3,908 | -12,277 | 3,917 | -11,403 | 4,946 | -44,872 | 4,777 | -46,271 |
| 1,35  | 0,181 | -67,183 | 0,172 | -76,887 | 3,899 | -12,38  | 3,908 | -11,498 | 4,984 | -44,944 | 4,814 | -46,346 |
| 1,375 | 0,179 | -68,055 | 0,169 | -77,833 | 3,89  | -12,481 | 3,899 | -11,591 | 5,022 | -45,017 | 4,851 | -46,422 |
| 1,4   | 0,176 | -68,919 | 0,167 | -78,77  | 3,882 | -12,581 | 3,89  | -11,683 | 5,06  | -45,091 | 4,888 | -46,498 |
| 1,425 | 0,174 | -69,775 | 0,164 | -79,698 | 3,873 | -12,678 | 3,882 | -11,772 | 5,096 | -45,166 | 4,924 | -46,574 |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |         |       |         |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 1,45  | 0,171 | -70,624 | 0,162 | -80,618 | 3,864 | -12,774 | 3,873 | -11,861 | 5,133 | -45,241 | 4,959 | -46,651 |
| 1,475 | 0,169 | -71,465 | 0,16  | -81,53  | 3,856 | -12,869 | 3,865 | -11,947 | 5,168 | -45,316 | 4,994 | -46,727 |
| 1,5   | 0,166 | -72,299 | 0,157 | -82,434 | 3,847 | -12,962 | 3,856 | -12,032 | 5,204 | -45,392 | 5,028 | -46,804 |
| 1,525 | 0,164 | -73,126 | 0,155 | -83,331 | 3,839 | -13,053 | 3,848 | -12,116 | 5,238 | -45,468 | 5,062 | -46,881 |
| 1,55  | 0,161 | -73,946 | 0,153 | -84,22  | 3,831 | -13,143 | 3,84  | -12,198 | 5,272 | -45,543 | 5,095 | -46,957 |
| 1,575 | 0,159 | -74,759 | 0,151 | -85,101 | 3,823 | -13,231 | 3,831 | -12,279 | 5,306 | -45,619 | 5,128 | -47,034 |
| 1,6   | 0,157 | -75,566 | 0,149 | -85,975 | 3,815 | -13,318 | 3,823 | -12,358 | 5,339 | -45,695 | 5,16  | -47,11  |
| 1,625 | 0,155 | -76,366 | 0,146 | -86,842 | 3,807 | -13,403 | 3,815 | -12,436 | 5,372 | -45,77  | 5,192 | -47,186 |
| 1,65  | 0,152 | -77,159 | 0,144 | -87,703 | 3,799 | -13,488 | 3,807 | -12,513 | 5,405 | -45,846 | 5,224 | -47,261 |
| 1,675 | 0,15  | -77,947 | 0,142 | -88,556 | 3,791 | -13,57  | 3,8   | -12,589 | 5,437 | -45,921 | 5,255 | -47,336 |
| 1,7   | 0,148 | -78,728 | 0,14  | -89,402 | 3,783 | -13,652 | 3,792 | -12,663 | 5,468 | -45,996 | 5,285 | -47,411 |
| 1,725 | 0,146 | -79,503 | 0,138 | -90,243 | 3,776 | -13,733 | 3,784 | -12,737 | 5,499 | -46,071 | 5,316 | -47,485 |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |         |       |         |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 1,75  | 0,144 | -80,273 | 0,136 | -91,076 | 3,768 | -13,812 | 3,777 | -12,809 | 5,53  | -46,145 | 5,346 | -47,559 |
| 1,775 | 0,142 | -81,036 | 0,134 | -91,904 | 3,76  | -13,89  | 3,769 | -12,881 | 5,56  | -46,219 | 5,375 | -47,632 |
| 1,8   | 0,14  | -81,794 | 0,133 | -92,725 | 3,753 | -13,967 | 3,762 | -12,951 | 5,59  | -46,292 | 5,404 | -47,704 |
| 1,825 | 0,138 | -82,546 | 0,131 | -93,54  | 3,746 | -14,043 | 3,755 | -13,02  | 5,62  | -46,365 | 5,433 | -47,776 |
| 1,85  | 0,136 | -83,293 | 0,129 | -94,349 | 3,738 | -14,118 | 3,747 | -13,089 | 5,649 | -46,438 | 5,461 | -47,848 |
| 1,875 | 0,134 | -84,034 | 0,127 | -95,152 | 3,731 | -14,192 | 3,74  | -13,156 | 5,678 | -46,51  | 5,489 | -47,919 |
| 1,9   | 0,133 | -84,77  | 0,125 | -95,95  | 3,724 | -14,266 | 3,733 | -13,223 | 5,706 | -46,582 | 5,517 | -47,989 |
| 1,925 | 0,131 | -85,501 | 0,124 | -96,742 | 3,717 | -14,338 | 3,726 | -13,289 | 5,734 | -46,653 | 5,544 | -48,059 |
| 1,95  | 0,129 | -86,227 | 0,122 | -97,529 | 3,71  | -14,409 | 3,719 | -13,353 | 5,762 | -46,724 | 5,571 | -48,128 |
| 1,975 | 0,127 | -86,948 | 0,12  | -98,31  | 3,703 | -14,479 | 3,712 | -13,418 | 5,79  | -46,794 | 5,598 | -48,196 |
| 2     | 0,126 | -87,664 | 0,119 | -99,085 | 3,696 | -14,549 | 3,705 | -13,481 | 5,817 | -46,864 | 5,624 | -48,264 |
| 2,025 | 0,124 | -88,375 | 0,117 | -99,856 | 3,689 | -14,617 | 3,699 | -13,543 | 5,844 | -46,933 | 5,65  | -48,331 |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |         |       |          |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|---------|-------|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 2,05  | 0,122 | -89,082 | 0,115 | -100,622 | 3,683 | -14,685 | 3,692 | -13,605 | 5,87  | -47,002 | 5,676 | -48,398 |
| 2,075 | 0,121 | -89,783 | 0,114 | -101,382 | 3,676 | -14,752 | 3,685 | -13,666 | 5,897 | -47,07  | 5,701 | -48,464 |
| 2,1   | 0,119 | -90,481 | 0,112 | -102,138 | 3,669 | -14,818 | 3,679 | -13,727 | 5,923 | -47,137 | 5,727 | -48,529 |
| 2,125 | 0,117 | -91,173 | 0,111 | -102,888 | 3,663 | -14,884 | 3,672 | -13,786 | 5,948 | -47,204 | 5,751 | -48,594 |
| 2,15  | 0,116 | -91,862 | 0,109 | -103,634 | 3,656 | -14,948 | 3,666 | -13,845 | 5,974 | -47,271 | 5,776 | -48,658 |
| 2,175 | 0,114 | -92,546 | 0,108 | -104,376 | 3,65  | -15,012 | 3,66  | -13,904 | 5,999 | -47,337 | 5,801 | -48,722 |
| 2,2   | 0,113 | -93,225 | 0,107 | -105,112 | 3,643 | -15,075 | 3,653 | -13,962 | 6,024 | -47,402 | 5,825 | -48,785 |
| 2,225 | 0,111 | -93,901 | 0,105 | -105,845 | 3,637 | -15,138 | 3,647 | -14,019 | 6,049 | -47,467 | 5,849 | -48,847 |
| 2,25  | 0,11  | -94,572 | 0,104 | -106,572 | 3,631 | -15,2   | 3,641 | -14,075 | 6,073 | -47,531 | 5,872 | -48,909 |
| 2,275 | 0,108 | -95,24  | 0,102 | -107,296 | 3,625 | -15,261 | 3,635 | -14,131 | 6,097 | -47,595 | 5,896 | -48,97  |
| 2,3   | 0,107 | -95,903 | 0,101 | -108,015 | 3,619 | -15,322 | 3,629 | -14,187 | 6,121 | -47,658 | 5,919 | -49,03  |
| 2,325 | 0,106 | -96,563 | 0,1   | -108,73  | 3,612 | -15,382 | 3,623 | -14,242 | 6,145 | -47,721 | 5,942 | -49,09  |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |          |       |          |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 2,35  | 0,104 | -97,218  | 0,098 | -109,44  | 3,606 | -15,441 | 3,617 | -14,296 | 6,168 | -47,783 | 5,965 | -49,15  |
| 2,375 | 0,103 | -97,87   | 0,097 | -110,147 | 3,6   | -15,5   | 3,611 | -14,35  | 6,191 | -47,844 | 5,987 | -49,209 |
| 2,4   | 0,102 | -98,518  | 0,096 | -110,85  | 3,594 | -15,559 | 3,605 | -14,403 | 6,214 | -47,906 | 6,009 | -49,267 |
| 2,425 | 0,1   | -99,162  | 0,095 | -111,548 | 3,589 | -15,616 | 3,599 | -14,456 | 6,237 | -47,966 | 6,031 | -49,324 |
| 2,45  | 0,099 | -99,803  | 0,093 | -112,243 | 3,583 | -15,673 | 3,593 | -14,509 | 6,26  | -48,026 | 6,053 | -49,382 |
| 2,475 | 0,098 | -100,44  | 0,092 | -112,934 | 3,577 | -15,73  | 3,588 | -14,561 | 6,282 | -48,086 | 6,075 | -49,438 |
| 2,5   | 0,097 | -101,074 | 0,091 | -113,621 | 3,571 | -15,786 | 3,582 | -14,612 | 6,304 | -48,145 | 6,096 | -49,494 |
| 2,525 | 0,095 | -101,704 | 0,09  | -114,305 | 3,565 | -15,842 | 3,576 | -14,663 | 6,326 | -48,203 | 6,118 | -49,55  |
| 2,55  | 0,094 | -102,331 | 0,089 | -114,984 | 3,56  | -15,897 | 3,571 | -14,713 | 6,348 | -48,261 | 6,139 | -49,605 |
| 2,575 | 0,093 | -102,955 | 0,088 | -115,661 | 3,554 | -15,951 | 3,565 | -14,764 | 6,369 | -48,319 | 6,16  | -49,659 |
| 2,6   | 0,092 | -103,575 | 0,087 | -116,333 | 3,549 | -16,006 | 3,56  | -14,813 | 6,391 | -48,376 | 6,181 | -49,713 |
| 2,625 | 0,091 | -104,192 | 0,086 | -117,002 | 3,543 | -16,059 | 3,554 | -14,863 | 6,412 | -48,432 | 6,201 | -49,767 |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |          |       |          |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 2,65  | 0,09  | -104,806 | 0,084 | -117,668 | 3,538 | -16,112 | 3,549 | -14,911 | 6,433 | -48,488 | 6,221 | -49,82  |
| 2,675 | 0,088 | -105,416 | 0,083 | -118,33  | 3,532 | -16,165 | 3,544 | -14,96  | 6,454 | -48,544 | 6,242 | -49,872 |
| 2,7   | 0,087 | -106,024 | 0,082 | -118,989 | 3,527 | -16,218 | 3,538 | -15,008 | 6,474 | -48,599 | 6,262 | -49,924 |
| 2,725 | 0,086 | -106,628 | 0,081 | -119,645 | 3,521 | -16,269 | 3,533 | -15,056 | 6,495 | -48,654 | 6,282 | -49,976 |
| 2,75  | 0,085 | -107,23  | 0,08  | -120,298 | 3,516 | -16,321 | 3,528 | -15,103 | 6,515 | -48,708 | 6,301 | -50,027 |
| 2,775 | 0,084 | -107,828 | 0,079 | -120,947 | 3,511 | -16,372 | 3,523 | -15,15  | 6,535 | -48,762 | 6,321 | -50,078 |
| 2,8   | 0,083 | -108,423 | 0,078 | -121,593 | 3,506 | -16,422 | 3,518 | -15,197 | 6,555 | -48,815 | 6,34  | -50,128 |
| 2,825 | 0,082 | -109,016 | 0,077 | -122,236 | 3,5   | -16,473 | 3,513 | -15,243 | 6,575 | -48,868 | 6,359 | -50,178 |
| 2,85  | 0,081 | -109,606 | 0,076 | -122,876 | 3,495 | -16,523 | 3,507 | -15,289 | 6,594 | -48,921 | 6,379 | -50,227 |
| 2,875 | 0,08  | -110,193 | 0,076 | -123,513 | 3,49  | -16,572 | 3,502 | -15,334 | 6,614 | -48,973 | 6,397 | -50,276 |
| 2,9   | 0,079 | -110,777 | 0,075 | -124,146 | 3,485 | -16,621 | 3,497 | -15,38  | 6,633 | -49,024 | 6,416 | -50,325 |
| 2,925 | 0,078 | -111,358 | 0,074 | -124,777 | 3,48  | -16,67  | 3,492 | -15,424 | 6,652 | -49,076 | 6,435 | -50,373 |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |          |       |          |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 2,95  | 0,077 | -111,937 | 0,073 | -125,405 | 3,475 | -16,718 | 3,488 | -15,469 | 6,671 | -49,126 | 6,453 | -50,42  |
| 2,975 | 0,076 | -112,512 | 0,072 | -126,031 | 3,47  | -16,766 | 3,483 | -15,513 | 6,69  | -49,177 | 6,472 | -50,468 |
| 3     | 0,076 | -113,086 | 0,071 | -126,653 | 3,465 | -16,814 | 3,478 | -15,557 | 6,709 | -49,227 | 6,49  | -50,515 |
| 3,025 | 0,075 | -113,656 | 0,07  | -127,272 | 3,46  | -16,861 | 3,473 | -15,601 | 6,727 | -49,277 | 6,508 | -50,561 |
| 3,05  | 0,074 | -114,225 | 0,069 | -127,889 | 3,455 | -16,908 | 3,468 | -15,644 | 6,746 | -49,326 | 6,526 | -50,607 |
| 3,075 | 0,073 | -114,79  | 0,069 | -128,503 | 3,45  | -16,954 | 3,463 | -15,687 | 6,764 | -49,375 | 6,544 | -50,653 |
| 3,1   | 0,072 | -115,353 | 0,068 | -129,115 | 3,446 | -17,001 | 3,459 | -15,73  | 6,782 | -49,423 | 6,562 | -50,699 |
| 3,125 | 0,071 | -115,914 | 0,067 | -129,723 | 3,441 | -17,047 | 3,454 | -15,773 | 6,8   | -49,471 | 6,579 | -50,744 |
| 3,15  | 0,07  | -116,472 | 0,066 | -130,329 | 3,436 | -17,092 | 3,449 | -15,815 | 6,818 | -49,519 | 6,597 | -50,788 |
| 3,175 | 0,07  | -117,028 | 0,065 | -130,933 | 3,431 | -17,138 | 3,445 | -15,857 | 6,836 | -49,567 | 6,614 | -50,833 |
| 3,2   | 0,069 | -117,581 | 0,065 | -131,534 | 3,427 | -17,183 | 3,44  | -15,898 | 6,854 | -49,614 | 6,631 | -50,877 |
| 3,225 | 0,068 | -118,132 | 0,064 | -132,132 | 3,422 | -17,227 | 3,436 | -15,94  | 6,871 | -49,66  | 6,648 | -50,92  |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |          |       |          |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 3,25  | 0,067 | -118,681 | 0,063 | -132,728 | 3,417 | -17,272 | 3,431 | -15,981 | 6,888 | -49,707 | 6,665 | -50,964 |
| 3,275 | 0,066 | -119,227 | 0,062 | -133,322 | 3,413 | -17,316 | 3,426 | -16,022 | 6,906 | -49,753 | 6,682 | -51,007 |
| 3,3   | 0,066 | -119,771 | 0,062 | -133,913 | 3,408 | -17,36  | 3,422 | -16,062 | 6,923 | -49,799 | 6,699 | -51,049 |
| 3,325 | 0,065 | -120,313 | 0,061 | -134,501 | 3,404 | -17,403 | 3,418 | -16,103 | 6,94  | -49,844 | 6,715 | -51,092 |
| 3,35  | 0,064 | -120,853 | 0,06  | -135,087 | 3,399 | -17,446 | 3,413 | -16,143 | 6,957 | -49,889 | 6,732 | -51,134 |
| 3,375 | 0,063 | -121,39  | 0,06  | -135,671 | 3,395 | -17,489 | 3,409 | -16,183 | 6,974 | -49,934 | 6,748 | -51,176 |
| 3,4   | 0,063 | -121,925 | 0,059 | -136,253 | 3,39  | -17,532 | 3,404 | -16,222 | 6,99  | -49,978 | 6,764 | -51,217 |
| 3,425 | 0,062 | -122,458 | 0,058 | -136,832 | 3,386 | -17,575 | 3,4   | -16,262 | 7,007 | -50,022 | 6,781 | -51,258 |
| 3,45  | 0,061 | -122,99  | 0,058 | -137,409 | 3,381 | -17,617 | 3,396 | -16,301 | 7,023 | -50,066 | 6,797 | -51,299 |
| 3,475 | 0,061 | -123,518 | 0,057 | -137,984 | 3,377 | -17,659 | 3,391 | -16,34  | 7,04  | -50,11  | 6,813 | -51,34  |
| 3,5   | 0,06  | -124,045 | 0,056 | -138,556 | 3,373 | -17,7   | 3,387 | -16,378 | 7,056 | -50,153 | 6,829 | -51,38  |
| 3,525 | 0,059 | -124,57  | 0,056 | -139,127 | 3,368 | -17,742 | 3,383 | -16,417 | 7,072 | -50,196 | 6,844 | -51,42  |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |          |       |          |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 3,55  | 0,059 | -125,093 | 0,055 | -139,695 | 3,364 | -17,783 | 3,379 | -16,455 | 7,088 | -50,238 | 6,86  | -51,46  |
| 3,575 | 0,058 | -125,614 | 0,054 | -140,261 | 3,36  | -17,824 | 3,374 | -16,493 | 7,104 | -50,281 | 6,876 | -51,499 |
| 3,6   | 0,057 | -126,132 | 0,054 | -140,825 | 3,355 | -17,864 | 3,37  | -16,531 | 7,12  | -50,323 | 6,891 | -51,539 |
| 3,625 | 0,057 | -126,649 | 0,053 | -141,386 | 3,351 | -17,905 | 3,366 | -16,568 | 7,136 | -50,365 | 6,907 | -51,577 |
| 3,65  | 0,056 | -127,164 | 0,053 | -141,946 | 3,347 | -17,945 | 3,362 | -16,606 | 7,151 | -50,406 | 6,922 | -51,616 |
| 3,675 | 0,055 | -127,677 | 0,052 | -142,504 | 3,343 | -17,985 | 3,358 | -16,643 | 7,167 | -50,447 | 6,937 | -51,655 |
| 3,7   | 0,055 | -128,188 | 0,051 | -143,059 | 3,339 | -18,025 | 3,354 | -16,68  | 7,182 | -50,488 | 6,952 | -51,693 |
| 3,725 | 0,054 | -128,697 | 0,051 | -143,613 | 3,335 | -18,064 | 3,35  | -16,717 | 7,198 | -50,529 | 6,967 | -51,731 |
| 3,75  | 0,054 | -129,205 | 0,05  | -144,165 | 3,331 | -18,103 | 3,346 | -16,753 | 7,213 | -50,569 | 6,982 | -51,768 |
| 3,775 | 0,053 | -129,71  | 0,05  | -144,714 | 3,326 | -18,142 | 3,342 | -16,789 | 7,228 | -50,61  | 6,997 | -51,806 |
| 3,8   | 0,052 | -130,214 | 0,049 | -145,262 | 3,322 | -18,181 | 3,338 | -16,826 | 7,243 | -50,649 | 7,012 | -51,843 |
| 3,825 | 0,052 | -130,716 | 0,049 | -145,808 | 3,318 | -18,22  | 3,334 | -16,862 | 7,258 | -50,689 | 7,026 | -51,88  |

## Продолжение таблицы Б.1

|       |       |          |       |          |       |         |       |         |       |         |       |         |
|-------|-------|----------|-------|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 3,85  | 0,051 | -131,216 | 0,048 | -146,352 | 3,314 | -18,258 | 3,33  | -16,897 | 7,273 | -50,729 | 7,041 | -51,917 |
| 3,875 | 0,051 | -131,714 | 0,048 | -146,893 | 3,31  | -18,296 | 3,326 | -16,933 | 7,288 | -50,768 | 7,055 | -51,953 |
| 3,9   | 0,05  | -132,211 | 0,047 | -147,434 | 3,306 | -18,334 | 3,322 | -16,968 | 7,302 | -50,807 | 7,07  | -51,99  |
| 3,925 | 0,05  | -132,705 | 0,047 | -147,972 | 3,302 | -18,372 | 3,318 | -17,003 | 7,317 | -50,845 | 7,084 | -52,026 |
| 3,95  | 0,049 | -133,199 | 0,046 | -148,508 | 3,299 | -18,409 | 3,314 | -17,038 | 7,332 | -50,884 | 7,098 | -52,061 |
| 3,975 | 0,049 | -133,69  | 0,046 | -149,043 | 3,295 | -18,447 | 3,31  | -17,073 | 7,346 | -50,922 | 7,113 | -52,097 |
| 4     | 0,048 | -134,18  | 0,045 | -149,576 | 3,291 | -18,484 | 3,307 | -17,108 | 7,36  | -50,96  | 7,127 | -52,133 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### ПРОГРАММА РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПЕРВИЧНЫХ ПРИЗНАКОВ, СОСТАВЛЯЮЩИХ ОБРАЗЫ СОСТОЯНИЙ

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

# Исходные параметры
E = 5
Zn = 0.198 * np.exp(64 * 1j * np.pi / 180)
Zo = 0.292 * np.exp(80 * 1j * np.pi / 180)
leng = 2.5
Zr1 = 0.8 * np.exp(65 * 1j * np.pi / 180)
gMax = 4
gMin = 0.025
g = gMin
Omega = 314
r0 = 700 * 0.000001
L0 = 1.27 * 0.000001
leng_zvena = 0.025
Ra = 0.2877
Zs = r0 + (1j * Omega * L0)
Zrz = 0.239 + 0.781j
st = 0

steps = int((gMax - gMin) / 0.025) + 1

Mat = np.zeros((steps, 25))

while g <= gMax:
    Zv = np.sqrt(Zr1 / g)
    gamma = np.sqrt(Zr1 * g)
    ChP_RL = np.array([
        [np.cosh(gamma * leng), Zv * np.sinh(gamma *
leng)],
        [(np.sinh(gamma * leng)) / Zv, np.cosh(gamma *
leng)]]

    Zvzv = np.sqrt(Zrz / g)
    gammazv = np.sqrt(Zrz * g)
    ChP_rz = np.array([
        [np.cosh(gammazv * leng_zvena), Zvzv *
np.sinh(gammazv * leng_zvena)],

```

```

    [(np.sinh(gammazv * leng_zvena)) / Zvzv,
np.cosh(gammazv * leng_zvena)]]

ChP_st = np.array([[1, Zs], [0, 1]])
result_matrix = np.eye(2, dtype=complex)
for _ in range(100):
    result_matrix = np.dot(result_matrix, ChP_rz)
    result_matrix = np.dot(result_matrix, ChP_st)
    result_matrix = np.dot(result_matrix, ChP_st)

    U_2 = (E * Zn) / ((ChP_RL[1, 0] * Zn + ChP_RL[1, 1]) *
Zo + ChP_RL[0, 0] * Zn + ChP_RL[0, 1])
    U_1 = (E * (ChP_RL[0, 0] * Zn + ChP_RL[0, 1])) /
((ChP_RL[1, 0] * Zn + ChP_RL[1, 1]) * Zo +
ChP_RL[0, 0] * Zn + ChP_RL[0, 1])
    I_1 = (E * (ChP_RL[1, 0] * Zn + ChP_RL[1, 1])) /
((ChP_RL[1, 0] * Zn + ChP_RL[1, 1]) * Zo +
ChP_RL[0, 0] * Zn + ChP_RL[0, 1])
    U_2z = (E * Zn) / (
        (result_matrix[1, 0] * Zn +
result_matrix[1, 1]) * Zo + result_matrix[0, 0] * Zn +
result_matrix[0, 1])
    U_1z = (E * (result_matrix[0, 0] * Zn +
result_matrix[0, 1])) / (
        (result_matrix[1, 0] * Zn +
result_matrix[1, 1]) * Zo +
        result_matrix[0, 0] * Zn + result_matrix[0,
1])
    I_1z = (E * (result_matrix[1, 0] * Zn +
result_matrix[1, 1])) / (
        (result_matrix[1, 0] * Zn +
result_matrix[1, 1]) * Zo +
        result_matrix[0, 0] * Zn + result_matrix[0,
1])

Mat[st, 0] = g
Mat[st, 1] = np.abs(U_2)
Mat[st, 2] = np.angle(U_2, deg=True)
Mat[st, 3] = np.abs(U_2z)
Mat[st, 4] = np.angle(U_2z, deg=True)
Mat[st, 5] = np.abs(U_1)
Mat[st, 6] = np.angle(U_1, deg=True)
Mat[st, 7] = np.abs(U_1z)

```

```

Mat[st, 8] = np.angle(U_1z, deg=True)
Mat[st, 9] = np.abs(I_1)
Mat[st, 10] = np.angle(I_1, deg=True)
Mat[st, 11] = np.abs(I_1z)
Mat[st, 12] = np.angle(I_1z, deg=True)

Mat[st, 13] = np.abs(np.abs(U_2) - np.abs(U_2z)) #
Абс. ошибка |U_2|
Mat[st, 14] = np.abs(np.angle(U_2, deg=True) -
np.angle(U_2z, deg=True)) # Абс. ошибка фазы U_2
Mat[st, 15] = np.abs(np.abs(U_1) - np.abs(U_1z)) #
Абс. ошибка |U_1|
Mat[st, 16] = np.abs(np.angle(U_1, deg=True) -
np.angle(U_1z, deg=True)) # Абс. ошибка фазы U_1
Mat[st, 17] = np.abs(np.abs(I_1) - np.abs(I_1z)) #
Абс. ошибка |I_1|
Mat[st, 18] = np.abs(np.angle(I_1, deg=True) -
np.angle(I_1z, deg=True)) # Абс. ошибка фазы I_1

Mat[st, 19] = 100 * np.abs((np.abs(U_2) - np.abs(U_2z))
/ np.abs(U_2)) if np.abs(
U_2) != 0 else 0 # Отн. ошибка |U_2|
Mat[st, 20] = 100 * np.abs(
(np.angle(U_2, deg=True) - np.angle(U_2z,
deg=True)) / np.angle(U_2, deg=True)) if np.angle(U_2,
deg=True) != 0 else 0 # Отн. ошибка фазы U_2
Mat[st, 21] = 100 * np.abs((np.abs(U_1) - np.abs(U_1z))
/ np.abs(U_1)) if np.abs(
U_1) != 0 else 0 # Отн. ошибка |U_1|
Mat[st, 22] = 100 * np.abs(
(np.angle(U_1, deg=True) - np.angle(U_1z,
deg=True)) / np.angle(U_1, deg=True)) if np.angle(U_1,
deg=True) != 0 else 0 # Отн. ошибка фазы U_1
Mat[st, 23] = 100 * np.abs((np.abs(I_1) - np.abs(I_1z))
/ np.abs(I_1)) if np.abs(
I_1) != 0 else 0 # Отн. ошибка |I_1|
Mat[st, 24] = 100 * np.abs(
(np.angle(I_1, deg=True) - np.angle(I_1z,
deg=True)) / np.angle(I_1, deg=True)) if np.angle(I_1,
deg=True) != 0 else 0 # Отн. ошибка фазы I_1

st += 1

```

```

g += 0.025

# Эксель
df = pd.DataFrame(Mat, columns=[
    'g',
    '|U_2|', 'Фаза U_2 (°)',
    '|U_2z|', 'Фаза U_2z (°)',
    '|U_1|', 'Фаза U_1 (°)',
    '|U_1z|', 'Фаза U_1z (°)',
    '|I_1|', 'Фаза I_1 (°)',
    '|I_1z|', 'Фаза I_1z (°)',
    'Абс. ошибка |U_2|', 'Абс. ошибка фазы U_2 (°)',
    'Абс. ошибка |U_1|', 'Абс. ошибка фазы U_1 (°)',
    'Абс. ошибка |I_1|', 'Абс. ошибка фазы I_1 (°)',
    'Отн. ошибка |U_2| (%)', 'Отн. ошибка фазы U_2 (%)',
    'Отн. ошибка |U_1| (%)', 'Отн. ошибка фазы U_1 (%)',
    'Отн. ошибка |I_1| (%)', 'Отн. ошибка фазы I_1 (%)'
])

df = df.round(3)
df.to_excel('results_with_errors.xlsx', index=False)

# Построение графиков
plt.figure(figsize=(12, 8))

# Модули напряжений и токов
plt.subplot(2, 2, 1)
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 1], label='|U_2|')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 3], label='|U_2z|')
plt.xlabel('g')
plt.ylabel('Модуль напряжения')
plt.title('Модули U_2 и U_2z')
plt.grid(True)
plt.legend()

plt.subplot(2, 2, 2)
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 5], label='|U_1|')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 7], label='|U_1z|')
plt.xlabel('g')
plt.ylabel('Модуль напряжения')
plt.title('Модули U_1 и U_1z')
plt.grid(True)
plt.legend()

plt.subplot(2, 2, 3)

```

```
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 9], label='|I_1|')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 11], label='|I_1z|')
plt.xlabel('g')
plt.ylabel('Модуль тока')
plt.title('Модули I_1 и I_1z')
plt.grid(True)
plt.legend()

# Фазы напряжений и токов
plt.subplot(2, 2, 4)
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 2], label='Фаза U_2 (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 4], label='Фаза U_2z (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 6], label='Фаза U_1 (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 8], label='Фаза U_1z (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 10], label='Фаза I_1 (°)')
plt.plot(Mat[:, 0], Mat[:, 12], label='Фаза I_1z (°)')
plt.xlabel('g')
plt.ylabel('Фаза (градусы)')
plt.title('Фазы напряжений и токов')
plt.grid(True)
plt.legend(fontsize='small')
plt.tight_layout()
plt.show()
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ПРОГРАММА ФОРМИРОВАНИЯ РЯДОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ  
ФУНКЦИЙ

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from itertools import combinations

# ----- ИСХОДНЫЕ КОНСТАНТЫ -----
E = 5
Zn = 0.198 * np.exp(64j * np.pi / 180)
Zo = 0.292 * np.exp(80j * np.pi / 180)
Omega = 314
r0 = 200e-6
L0 = 1.27e-6
leng_zvena = 0.025
Zrz = 0.239 + 0.781j
g = 0.2
N_styks = 100

# ----- ДЕФЕКТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ -----
Zs_bad_vals = {
    'Z1': 2 * r0 + 1j * Omega * L0,
    'Z2': 10 * r0 + 1j * Omega * L0,
    'Z3': 20 * r0 + 1j * Omega * L0,
    'Z4': 30 * r0 + 1j * Omega * L0,
    'Z5': 40 * r0 + 1j * Omega * L0,
    'Z6': 50 * r0 + 1j * Omega * L0
}

# ----- РАСЧЕТ ЛИНИИ -----
def calc_line(k_bad, Zs_bad):

    Zvzv = np.sqrt(Zrz / g)
    gammazv = np.sqrt(Zrz * g)

    ChP_rz = np.array([
        [np.cosh(gammazv * leng_zvena), Zvzv *

```

```

np.sinh(gammazv * leng_zvena)],
    [np.sinh(gammazv * leng_zvena) / Zvzv,
np.cosh(gammazv * leng_zvena)]
    ])

T = np.eye(2, dtype=complex)

for k in range(1, N_styks + 1):
    Zs = Zs_bad if k == k_bad else (r0 + 1j * Omega *
L0)

    T = T @ ChP_rz
    T = T @ np.array([[1, Zs], [0, 1]])
    T = T @ np.array([[1, Zs], [0, 1]])

    den = (T[1, 0] * Zn + T[1, 1]) * Zo + T[0, 0] * Zn +
T[0, 1]

    U1 = E * (T[0, 0] * Zn + T[0, 1]) / den
    I1 = E * (T[1, 0] * Zn + T[1, 1]) / den
    U2 = T[0, 0] * U1 + T[0, 1] * I1

    return U1, U2, I1

# ----- полиномиальные признаки -----
----
def build_poly(X, deg):
    A = [np.ones(X.shape[0])]
    for d in range(1, deg + 1):
        for comb in combinations(range(X.shape[1]), d):
            term = np.ones(X.shape[0])
            for idx in comb:
                term *= X[:, idx]
            A.append(term)
    return np.column_stack(A)

# ===== СБОР ДАННЫХ =====
all_data = []

```

```

for Zs_bad in Zs_bad_vals.values():
    for k_bad in range(1, N_styks + 1):

        U1, U2, I1 = calc_line(k_bad, Zs_bad)

        features = [
            np.abs(U1),      # 0
            np.angle(U1),   # 1
            np.abs(U2),      # 2
            np.angle(U2),   # 3
            np.abs(I1),      # 4
            np.angle(I1),   # 5
        ]

        all_data.append(features + [np.abs(Zs_bad), k_bad])

all_data = np.array(all_data)

# Кодировка признаков
feature_code_description = (
    "Кодировка признаков:\n"
    "0 - |U1|\n"
    "1 - |I1|\n"
    "2 - |U2|\n"
    "3 -  $\varphi$ U1\n"
    "4 -  $\varphi$ I1\n"
    "5 -  $\varphi$ U2"
)

feature_code_map = {
    0: 0,
    4: 1,
    2: 2,
    1: 3,
    5: 4,
    3: 5
}

```

```

X_full = all_data[:, :-2]
Z_abs = all_data[:, -2]
k_array = all_data[:, -1]

deg = 2

global_mape_Z = []
global_mape_k = []
global_labels = []

#
=====
=====
# ===== ПЕРЕБОР КОМБИНАЦИЙ
=====
#
=====
=====

# Отдельные гистограммы строим только для 2,3,4 признаков
for n_features in range(2, 7):
    comb_list = list(combinations(range(6), n_features))

    mape_Z_list = []
    mape_k_list = []
    comb_labels = []

    for feature_idx in comb_list:
        Xraw = X_full[:, feature_idx]
        mu = np.mean(Xraw, axis=0)
        sigma = np.std(Xraw, axis=0)
        Xnorm = (Xraw - mu) / sigma

        X = build_poly(Xnorm, deg)
        Y = np.column_stack([Z_abs, k_array])

        B = np.linalg.lstsq(X, Y, rcond=None)[0]

        Z_pred = X @ B[:, 0]

```

```

k_pred = X @ B[:, 1]

mape_Z = 100 * np.mean(np.abs((Z_abs - Z_pred) /
Z_abs))
mape_k = 100 * np.mean(np.abs((k_array - k_pred) /
k_array))

mape_Z_list.append(mape_Z)
mape_k_list.append(mape_k)

codes = [feature_code_map[j] for j in feature_idx]
label = ''.join(str(c) for c in sorted(codes))
comb_labels.append(label)

# ----- сортировка -----
min_error = np.minimum(mape_Z_list, mape_k_list)
idx_sort = np.argsort(min_error)

mape_Z_sorted = np.array(mape_Z_list)[idx_sort]
mape_k_sorted = np.array(mape_k_list)[idx_sort]
labels_sorted = np.array(comb_labels)[idx_sort]

global_mape_Z.extend(mape_Z_sorted)
global_mape_k.extend(mape_k_sorted)
global_labels.extend([f"{n_features}:{l}" for l in
labels_sorted])

# Гистограмма для n_features = 2,3,4
if n_features <= 4:
    x = np.arange(len(labels_sorted))
    width = 0.4

    fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(16, 6))

    bars1 = ax1.bar(x - width/2, mape_Z_sorted, width,
                    color='royalblue', label='MAPE
|Z|')

    ax1.set_ylabel('MAPE |Z|, %', color='royalblue')
    ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='royalblue')

```

```

ax2 = ax1.twinx()
bars2 = ax2.bar(x + width/2, mape_k_sorted, width,
                color='darkorange', label='MAPE k')
ax2.set_ylabel('MAPE k, %', color='darkorange')
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='darkorange')

# Подписи комбинаций под столбцами (повёрнуты)
ax1.set_xticks(x)
ax1.set_xticklabels(labels_sorted, rotation=90)
ax1.set_xlabel('Комбинации признаков')
ax1.grid(True, axis='y')

# Подписи процентов (уменьшенный шрифт)
for bar in bars1:
    ax1.text(bar.get_x() + bar.get_width()/2,
             bar.get_height(),
             f"{bar.get_height():.1f}%",
             ha='center', va='bottom', fontsize=7)

for bar in bars2:
    ax2.text(bar.get_x() + bar.get_width()/2,
             bar.get_height(),
             f"{bar.get_height():.1f}%",
             ha='center', va='bottom', fontsize=7)

# Легенда, заголовок и описание признаков удалены
fig.tight_layout()
plt.show()

#
=====
=====
# ===== ОБЩАЯ ГИСТОГРАММА
=====
#
=====
=====

```

```

min_error_global = np.minimum(global_mape_Z, global_mape_k)
idx_global = np.argsort(min_error_global)

Z_sorted = np.array(global_mape_Z)[idx_global]
k_sorted = np.array(global_mape_k)[idx_global]
labels_sorted = np.array(global_labels)[idx_global]

x = np.arange(len(labels_sorted))
width = 0.4

fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(20, 8))

bars1 = ax1.bar(x - width/2, Z_sorted, width,
               color='royalblue', label='MAPE |Z|')
ax1.set_ylabel('MAPE |Z|, %', color='royalblue')
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='royalblue')

ax2 = ax1.twinx()
bars2 = ax2.bar(x + width/2, k_sorted, width,
               color='darkorange', label='MAPE k')
ax2.set_ylabel('MAPE k, %', color='darkorange')
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='darkorange')

# Подписи комбинаций под столбцами
ax1.set_xticks(x)
ax1.set_xticklabels(labels_sorted, rotation=90)
ax1.set_xlabel('Комбинации признаков')
ax1.grid(True, axis='y')

# Подписи процентов отсутствуют (требование)
# Легенда, заголовок и описание признаков удалены

fig.tight_layout()
plt.show()

```



ПРИЛОЖЕНИЕ Е  
СВИДЕТЕЛЬСТВО ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024663943

Программа моделирования линейной электрической  
цепи постоянного тока с применением законов  
Кирхгофа

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ» (RU)**

Авторы: **Тарасова Анна Евгеньевна (RU), Надежкин Вадим  
Александрович (RU), Надежкина Снежана Андреевна (RU),  
Илиади Данил Александрович (RU)**

Заявка № 2024662247

Дата поступления 31 мая 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 июня 2024 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью  
Сертификат 429b6a0fe38c3164ba196183b73b4aa7  
Владельцу **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 18.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж  
СВИДЕТЕЛЬСТВО ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026619088

**Программа определения неисправного  
токопроводящего стыка и его координаты**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приволжский государственный университет путей сообщения» (RU)*

Авторы: *Надежкина Снежана Андреевна (RU), Тарасов Евгений Михайлович (RU), Бредун Илья Сергеевич (RU), Надежкин Вадим Александрович, (RU), Тарасова Анна Евгеньевна (RU)*

Заявка № 2026617327

Дата поступления 19 марта 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 31 марта 2026 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 00a570a4774d8d521b4b8818a75f29506  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 04.07.2015 по 28.11.2026

*Ю.С. Зубов*

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### АКТЫ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



**ФИЛИАЛ АО «РОСЖЕЛДОРПРОЕКТ»**  
Самарский проектно-исследовательский институт  
«ЖЕЛДОРПРОЕКТ ПОВОЛЖЬЯ»

ул. Красноармейская, д. 137 б,  
Самара, Россия, 443030  
т.: (846) 303-91-11  
ф: (846) 303-32-73  
e: zdp@rzdp.ru  
w: www.rzdp.ru

*23.03.2026* № *546/желога*

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

#### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
Надежкиной Снежаны Андреевны на тему:  
«Разработка методики контроля сопротивления токопроводящих стыков  
рельсовых линий на основе принципов распознавания образов»

Разработанные Надежкиной С.А. математические модели входных и выходных параметров рельсовой линии, учитывающие её дискретную структуру (каскадное соединение звеньев по 25 м и сопротивлений стыков), повышают точность проектных расчётов рельсовых цепей. Предложенная методика оценки информативности признаков на основе параметрической чувствительности, даёт возможность оптимизировать состав контролируемых параметров и структуру измерительных каналов в проектируемых системах мониторинга.

При разработке схем организации каналов связи для перспективных проектов, учтены архитектурные решения, обоснованные в диссертации. Предложение Надежкиной С.А. о переходе от классической линейной топологии к кольцевой структуре передачи данных с использованием волоконно-оптических линий связи и механизмов инкапсуляции информации повышает отказоустойчивость проектируемых систем и обеспечивает надежную доставку диагностической информации от устройств линейного пункта (данных о состоянии напольного оборудования) до дорожного диспетчерского центра технической диагностики и мониторинга.

Внедрение результатов диссертации положительно повлияло на результаты работ по обоснованию проектных решений в части диагностики токопроводящих стыков и позволило создать задел для идентификации предотказных состояний в условиях тяжеловесного движения поездов.

И.о. директора «Желдорпроект Поволжья» АО  
филиала АО «Росжелдорпроект»



А.А. Шапорин



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**ПРИВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**  
 (ПривГУПС)



«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор Приволжского государственного  
 университета путей сообщения

*М.А. Гаранин* М.А. Гаранин

«21» марта 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Надежкиной Снежаны Андреевны на тему: «Разработка методики контроля сопротивления токопроводящих стыков рельсовых линий на основе принципов распознавания образов» в учебном процессе Приволжского государственного университета путей сообщения

Мы, нижеподписавшиеся, и.о. проректора по учебной работе и цифровым технологиям Кожуханова Е.В., декан Электротехнического факультета к.т.н., доцент Блинкова С.А., заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» д.т.н., профессор Тарасов Е.М. составили настоящий акт о том, что результаты кандидатской диссертации Надежкиной С.А. внедрены в учебный процесс на кафедре АТС ПривГУПС, а именно:

1. В курсе «Рельсовые цепи», который читает профессор Тарасов Е.М., введен раздел «Стратегии технического обслуживания и ремонта токопроводящих стыков и виды их основных отказов».

2. В курсе «Математическое моделирование систем и процессов», который читает доцент Бредун И.С., введен раздел «Машинные исследования изменения модулей и фаз напряжения и тока на входе и выходе РЛ».

3. При выполнении курсовой работы на упомянутых дисциплинах и при дипломном проектировании для студентов образовательной программы «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» предусмотрены варианты заданий по построению систем диагностики и прогнозирования предотказных состояний элементов рельсовой линии.

4. В курсе «Технологии пакетной коммутации», который читает доцент Тарасова А.Е., введен раздел «Формирование пакетов данных для сбора распределенной информации».

И. о. проректора по учебной работе  
и цифровой трансформации



Е.В. Кожуханова

Декан ЭТФ



С.А. Блинкова

Заведующий кафедрой АТС



Е.М. Тарасов



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**ПРИВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**  
 (ПривГУПС)



УТВЕРЖДАЮ

Ректор Приволжского государственного  
 университета путей сообщения

 М.А. Гаринин

«21» марта 2026 г.

### СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы Надежкиной Снежаны Андреевны, полученных в ходе выполнения научно-исследовательской, опытно-конструкторской и технологической работы (НИОКТР) РНМЛ-2024-0004, Регистрационный номер №124040100033-0, выполнена по заказу Федерального агентства железнодорожного транспорта (Росжелдор).

В ходе выполнения НИОКТР, результаты научных исследований, полученные отв. исполнителем работы Надежкиной С.А., использованы при разработке многопараметральных обучаемых классификаторов состояний рельсовых линий с подстраиваемой моделью в канале самонастройки, базирующиеся на принципах распознавания образов, отличающиеся использованием авторской классификации состояний рельсовых линий.

Справка составлена на основе актов приемки сдачи работы, расчетов экономической эффективности работ, утвержденных в установленном порядке и находящихся в университете.

Руководитель управления  
 научных работ



С.С. Наместников