

На правах рукописи



ДЕНЕЖКИН ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТУРЫ
РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ
СИГНАЛИЗАЦИИ ПРИ ЭЛЕКТРОТЯГЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.9.4. Управление процессами перевозок

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шаманов Виктор Иннокентьевич

Официальные оппоненты: **Бочков Константин Афанасьевич**, доктор технических наук, профессор, учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», научно-исследовательская лаборатория «Безопасность и электромагнитная совместимость технических средств», научный руководитель - заведующий лабораторией;
Батраев Владимир Владимирович, кандидат технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», отделение разработки систем интервального регулирования движения поездов по радиоканалу, отдел информационного и цифрового развития, заместитель начальника отделения - начальник отдела.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «14» февраля 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miiit.ru

Автореферат разослан «___» декабря 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сидоренко Валентина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Помехи от тяговых токов в тяговой рельсовой сети электрифицированных железных дорог вызывают сбои в работе рельсовых цепей (РЦ) и автоматической локомотивной сигнализации (АЛС). Это отрицательно сказывается на безопасности и бесперебойности движения поездов, увеличивает психофизиологическую нагрузку на локомотивные бригады. Сбои являются самовосстанавливающимися отказами, поэтому выявление их причин требует привлечения к этим работам высококвалифицированных кадров, отнимает много времени и далеко не всегда приводит к обнаружению наиболее значимых источников помех, вызывающих появление сбоев. Это определяется сложностью, многофакторностью и динамичностью процессов зарождения помех от тяговых токов, многообразием их отрицательного воздействия на работу аппаратуры РЦ и АЛС.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в исследование вопросов помехоустойчивости устройств РЦ и АЛС при действии различных помех внесли известные учёные Баранов Л.А., Бестемьянов П.Ф., Брылеев А.М., Дмитриев В.С., Котляренко Н.Ф., Кравцов Ю.А., Леушин В.Б., Лунёв С.А., Переборов А.С., Розенберг Е.Н., Степенский Б.М., Табунщиков А.К., Талалаев В.И., Трофимов Ю.А., Шаманов В.И. и многие другие.

Исследованию проблем обеспечения электромагнитной совместимости РЦ и АЛС посвящены работы таких учёных как Бадёр М.П., Бочков К.А., Костроминов А.М., Котельников А.В., Кравцов Ю.А., Лисенков В.М., Пенкин Н.Ф., Шаманов В.И., Шишляков А.П., Щербина Е.Г. и других.

Объект исследования – электромагнитная обстановка на участках с электротягой переменного тока, помехозащищённость и помехоустойчивость аппаратуры РЦ и АЛС.

Предмет исследования – способы и методики анализа электромагнитной обстановки в рельсовых линиях на участках с электротягой переменного тока и расчёта распределения тягового тока по рельсовым линиям, способы измерения и контроля электрических параметров элементов в рельсовых линиях, способы повышения помехозащищённости и помехоустойчивости аппаратуры РЦ и АЛС.

Цель и задачи. Цель диссертации – научное обоснование разработанных методов, технических и технологических решений для оценки уровня помех от переменного тягового тока на работу аппаратуры РЦ и АЛС, а также защиты от этих помех.

Поставленная цель достигается решением следующих теоретических и практических задач:

– Анализ существующих методов и технических средств для оценки уровня помех на работу аппаратуры РЦ и АЛС и способов защиты от данных помех.

– Разработка модели рельсовой линии, позволяющей одновременно учитывать неоднородность сопротивлений по длине рельсовых нитей, их взаимную индуктивность и поверхностное сопротивление рельсовой линии.

– Разработка методики математического моделирования распределения тягового тока по рельсовым нитям с одновременным учётом неоднородности их сопротивлений по длине и взаимной индуктивности между рельсовыми нитями, что позволяет проводить анализ распределения гармоник тягового тока по элементам рельсовых линий, оборудованных РЦ любого типа.

– Разработка решения для уменьшения уровня помех от гармоник тягового тока, обладающих широким частотным диапазоном и большим изменением амплитуд во времени, на аппаратуру РЦ и АЛС за счёт компенсации данных помех.

– Разработка способов косвенного измерения продольного и поперечного сопротивлений отрезка рельсовой нити переменному тяговому току в конкретной точке пути, а также автоматического контроля состояния изолирующих стыков.

– Разработка способа автоматического обнаружения излома рельсов, отличающегося от известных ранее использованием тягового тока в рельсовых линиях как информационного сигнала с контролем величины его асимметрии.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Обобщены и проанализированы существующие методы и технические средства для оценки уровня помех на работу аппаратуры РЦ и АЛС и способов защиты от данных помех.

2. Разработана новая модель рельсовой линии, отличающаяся от известных ранее моделей тем, что позволяет одновременно учитывать неоднородность сопротивлений по их длине, взаимную индуктивность между рельсовыми нитями, а также поверхностное сопротивление рельсовой линии.

3. Разработана новая методика математического моделирования распределения переменного тягового тока по элементам рельсовых линий, оборудованных РЦ любого типа, позволяющая провести анализ мешающего влияния на работу аппаратуры РЦ и АЛС помех от переменного тягового тока при разных состояниях рельсовых линий по их электрическим параметрам.

4. Предложено и обосновано новое решение для повышения помехозащищённости приёмников РЦ и АЛС за счёт компенсации гармонических помех, отличающееся тем, что обеспечивает подавление помех, обладающих широким частотным диапазоном и большим изменением амплитуд во времени.

5. Предложены и обоснованы новые способы косвенного измерения продольного и поперечного сопротивлений отрезка рельсовой нити переменному тяговому току в конкретной точке пути, а также автоматического контроля состояния изолирующих стыков.

6. Предложен и обоснован новый способ автоматического обнаружения излома рельсов на участках с электротягой, отличающийся от известных ранее

контролем изменения асимметрии тягового тока в рельсовых линиях как информационного сигнала, что обеспечивает повышение своевременности и достоверности информации о проявлении таких происшествий.

Теоретическая и практическая значимость

1. Найденные диапазоны изменения величины и гармонического состава тягового тока в рельсовой линии, а также поперечного и продольного удельных сопротивлений её рельсовых нитей позволили определить требования к методам и техническим средствам, обеспечивающим помехоустойчивость аппаратуры РЦ и АЛС на электрифицированных участках железных дорог с тяжеловесным и/или высокоскоростным движением поездов.

2. Применение разработанной модели рельсовой линии обеспечило возможность одновременно учитывать неоднородность сопротивлений по их длине, взаимную индуктивность между рельсовыми нитями, а также поверхностное сопротивление рельсовой линии.

3. Разработанная методика математического моделирования рельсовых линий как сложных электрических цепей обеспечила возможность количественной оценки распределения переменного тягового тока по элементам рельсовых линий для определения степени влияния их состояния на величину асимметрии его гармоник, а также степени влияния уравнивающих дросселей, устанавливаемых на перегонах, оборудованных тональными бесстыковыми рельсовыми цепями, на уменьшение величины асимметрии тягового тока.

4. Разработка и использование устройства, технически реализующего новое решение, которое позволяет за счёт компенсации гармонических помех в среднем в два раза уменьшить уровень этих помех, по сравнению с серийно выпускаемыми фильтрами, что существенно снизит число сбоев в работе аппаратуры РЦ и АЛС на участках с интенсивным движением тяжеловесных и скоростных поездов.

5. Разработанные способы косвенного измерения продольного и поперечного сопротивлений отрезка рельсовой нити и автоматического контроля состояния изолирующих стыков уменьшают трудоёмкость и повышают качество работ по техническому обслуживанию РЦ.

6. Разработанный способ автоматического обнаружения излома рельсов обеспечивает повышение своевременности и достоверности информации о проявлении таких происшествий на участках с электротягой.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы математического и физического моделирования, численные методы расчётов и анализа, экспериментальные исследования. Для решения поставленных задач применялись теоретические основы электротехники, теория электрических цепей, теория рельсовых цепей, математический анализ, теория передачи сигналов по проводам, теория электрических измерений, теория автоматического контроля, методы обеспечения электромагнитной совместимости, имитационное моделирование. Результаты проверялись с

использованием экспериментов в лабораторных условиях, разработанных прикладных программ для ЭВМ, созданных в системе компьютерной алгебры Mathcad 15, и среды виртуального моделирования Multisim 13.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель рельсовой линии, позволяющая одновременно учитывать неоднородность сопротивлений по их длине, взаимную индуктивность между рельсовыми нитями и поверхностное сопротивление рельсовой линии.

2. Методика аналитической оценки электромагнитной обстановки для РЦ и АЛС на участках железных дорог с электротягой переменного тока.

3. Зависимости уровня генерируемых помех от переменного тягового тока на приёмники РЦ и АЛС от состояния рельсовых линий.

4. Решение для уменьшения уровня помех от гармоник тягового тока, действующих на аппаратуру РЦ и АЛС, за счёт компенсации гармонических помех.

5. Способы и технические решения для измерения продольного и поперечного сопротивлений отрезка рельсовой нити, а также автоматического контроля состояния изолирующих стыков при электротяге переменного тока.

6. Способы и технические решения для автоматического обнаружения излома рельсов за счет контроля изменения асимметрии тягового тока в рельсовых линиях как информационного сигнала.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных результатов обусловлена корректностью использования математического аппарата, обоснованностью принятых допущений, подтверждена результатами имитационного моделирования и известными результатами измерений в условиях эксплуатации. Полученные результаты не противоречат исследованиям других авторов.

Результаты, полученные в диссертационной работе, подтверждены актом внедрения.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XIX Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (Москва, 2018 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки» (Москва, 2019 г.); Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, 2019, 2020, 2021, 2022 гг.); Молодежном научном форуме студентов и аспирантов транспортных вузов (с международным участием) «Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли» (Санкт-Петербург, 2019 г.); Международной научной конференции «International Transport Scientific Innovation» (Москва, 2021 г.); VI Всероссийской конференции (с международным участием) «Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки» (Москва, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы» (Санкт-Петербург, 2021 г.); II Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы»

(Москва, 2023 г.), а также на заседаниях кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» в 2020 – 2023 гг.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка из 136 источников и восьми приложений. Работа изложена на 179 страницах печатного текста и содержит 9 таблиц и 62 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, указана степень её разработанности, определены предмет и объект исследования, поставлены цели и задачи диссертационного исследования, сформулированы значимость и научная новизна диссертации, а также положения, выносимые на защиту. Дана информация по апробации результатов исследования.

В первой главе проведён анализ методов и технических средств, обеспечивающих защиту аппаратуры РЦ и АЛС от гармонических помех от тягового тока. Проведённый анализ научных исследований в области оценки электромагнитной обстановки на участках с электротягой показал, что в процессах растекания переменного тягового тока по рельсовым линиям, оборудованным РЦ, ряд вопросов изучен недостаточно.

При расчётах режимов работы РЦ рельсовая линия, обладающая распределёнными параметрами, представляется пассивным четырёхполюсником типа *A*. Однако рельсовые линии чаще неоднородны по их продольным и поперечным электрическим сопротивлениям, что затрудняет проведение таких расчётов. При движении поезда по неоднородной линии входные сопротивления рельсовых нитей для тягового тока перед головным электровозом меняются, в результате чего изменяется и уровень помех от тягового тока на приёмную аппаратуру АЛС.

При решении задач электромагнитной совместимости реальные процессы растекания тяговых токов по элементам рельсовой линии лучше отражает модель, показанная на рисунке 1, в которой рельсовая линия, обладающая распределёнными параметрами, представляется как каскадное соединение отрезков её рельсовых нитей, обладающих сосредоточенными параметрами.

Отрезок рельсовой линии длиной l_i представляется как шестиполюсник, т.е. как параллельное соединение трёхполюсников, в каждой половине которых учитываются величины сопротивлений отрезков рельсов Z_{CP} , сопротивления их токопроводящих стыков Z_{TC} и магнитные сопротивления Z_M , а также сопротивления отрезков рельсовых нитей по отношению к земле R_{P3} и сопротивления цепей заземления опор R_0 , подключаемых к рельсам. При необходимости учитываются ёмкость рельсовой линии C_{12} и поверхностное сопротивление R_{II} . В качестве поверхностного сопротивления может учитываться и сопротивление дросселей, устанавливаемых для уравнивания тяговых токов в рельсовых нитях. На схеме тяговые токи обозначены \dot{I}_T , а сигнальные токи \dot{I}_C .

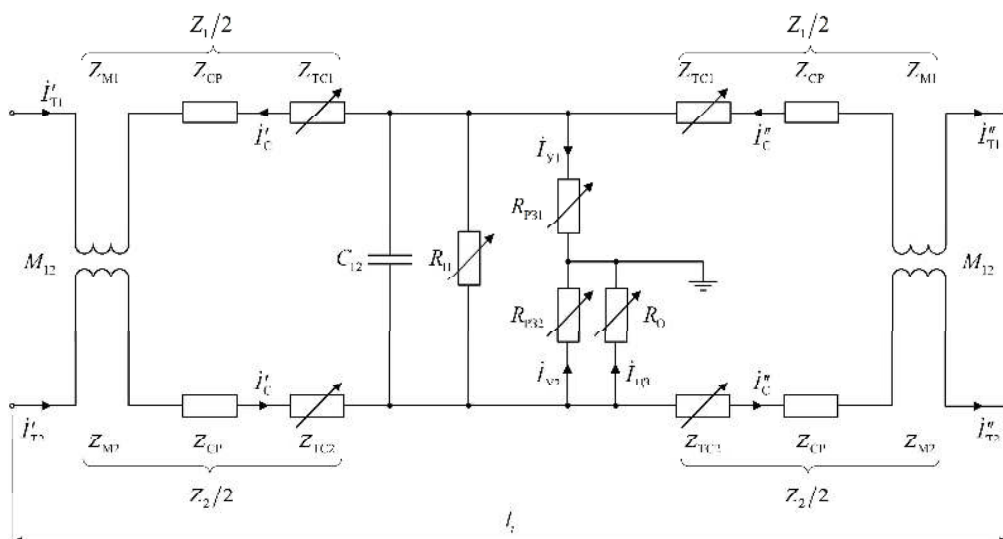


Рисунок 1 – Модель отрезка рельсовой линии

Представление отрезков рельсовой линии, обладающей распределёнными параметрами, в виде последовательно-параллельного соединения её элементов с сосредоточенными параметрами вносит погрешности в расчёты. Допускаемая величина этой погрешности обеспечивается выбором длины отрезка рельсовой линии при определённом соотношении в ней величин удельных продольного и поперечного сопротивлений рельсовых нитей на выбранной частоте. На рисунке 2 показаны графики найденной зависимости предельно допустимой длины трёхполюсников от частоты гармоники тягового тока при различных удельных сопротивлениях рельсов по отношению к земле, когда обеспечивается точность расчётов не хуже 5%. Увеличение точности расчётов, например, до 1% требует уменьшения предельных длин в 2,24 раза.

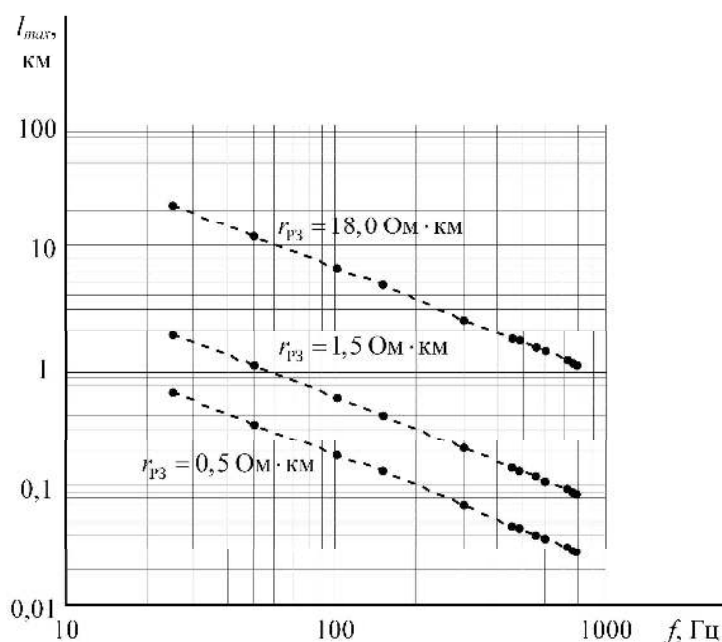


Рисунок 2 – Предельно допустимая длина отрезков рельсовой линии в зависимости от частоты гармоники тягового тока

Величина входных для гармоник тягового тока сопротивлений рельсовых нитей, а, следовательно, и уровень помех от него зависят от величины тока и температуры рельсов. На рисунке 3 построена найденная область изменения модуля удельного электрического сопротивления рельсовых нитей с рельсами типа Р65 для первой гармоники переменного тягового тока с частотой 50 Гц при диапазоне изменения температур от + 40°С до – 40°С и росте величины тока гармоники до 400 А.

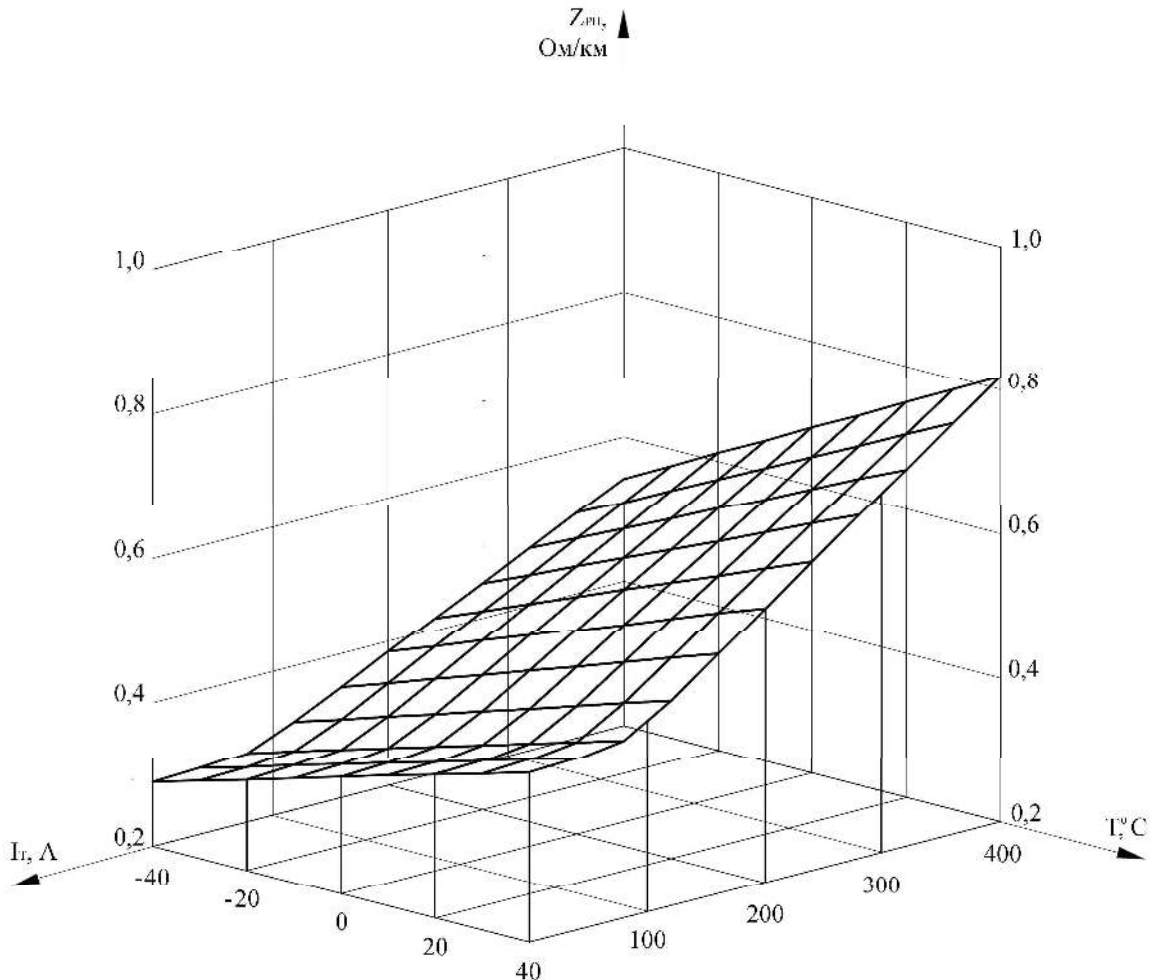


Рисунок 3 – Область изменения модуля удельного сопротивления рельсовых нитей на частоте 50 Гц

Проведённый анализ методов расчётов растекания электрических токов по длине электрических цепей, обладающих распределёнными параметрами, показал следующее. Классическая теория РЦ использовалась для определения мешающего влияния переменной составляющей постоянного тягового тока на приёмники сигналов в тональных станционных РЦ и бесстыковых перегонных РЦ только в однородных рельсовых линиях. Расчёты с использованием схем Кауэра мало пригодны для расчётов уровней помех на приёмники АЛС при движении поезда по неоднородным рельсовым линиям. Расчёты по величинам асимметрии тягового тока на входах отрезков рельсовой линии позволяют достаточно просто находить распределение асимметрии тягового тока по её

длине с использованием разработанной программы расчётов на ЭВМ. Однако такие расчёты не позволяют учитывать сопротивления шпал и дросселей для уравнивания тяговых токов в рельсовых нитях. Это определило необходимость проведения работ по совершенствованию методов расчётов распределения электрических токов по рельсовым линиям.

Вторая глава посвящена разработке методики математического моделирования распределения тягового тока по элементам однородных и неоднородных рельсовых линий, пригодной для любых типов РЦ. Представление рельсовой линии как электрической цепи, состоящей из элементов с сосредоточенными параметрами, позволяет применять при их анализе методы расчётов сложных электрических цепей с использованием уравнений, составленных на основании первого и второго законов Кирхгофа.

На рисунке 4 приведена электрическая схема, применённая при моделировании участка рельсовой линии, к концу которого подключен воздушный отсос (отсасывающая линия) тяговой подстанции. Отрезки рельсовой линии обозначены латинскими прописными буквами. За начало отрезка рельсовой линии принято место втекания в неё тягового тока.

Для расчёта тяговых токов, текущих под катушками АЛС при вступлении поезда на N -й отрезок, составляются системы уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для контуров, показанных на рисунке 4. Значения всех токов в схеме находятся решением этой системы уравнений. Найденные значения тяговых токов позволяют определить их величины в любом элементе рельсовой линии, в том числе находить асимметрию тягового тока в начале или конце любого из отрезков рельсовой линии.

Второй шаг расчёта необходим для учёта влияния взаимной индуктивности между рельсовыми нитями рельсовой линии, вызывающей появление в рельсовых нитях противоЭДС. За счёт этого растёт магнитное сопротивление в той рельсовой нити, в которой величина тягового тока меньше, и уменьшается магнитное сопротивление другой рельсовой нити.

Изменения падения напряжения на магнитных сопротивлениях в рельсовых нитях прямо пропорциональны отношению протекающих по ним токов. Найденные соотношения тяговых токов в рельсовых нитях в начале и конце каждого отрезка рельсовой линии учитываются в системе уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа. Дальнейшие расчёты позволяют определить величины токов в схеме и по ним найти реальные значения асимметрии тяговых токов под катушками АЛС.

Для моделирования движения поезда по неоднородной рельсовой линии, приближающегося к выходному концу РЦ, расчёты приходится проводить отдельно при вступлении поезда на каждый из отрезков рассматриваемой рельсовой линии. По мере приближения поезда к выходному концу число уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа, уменьшается.

← Направление движения поезда

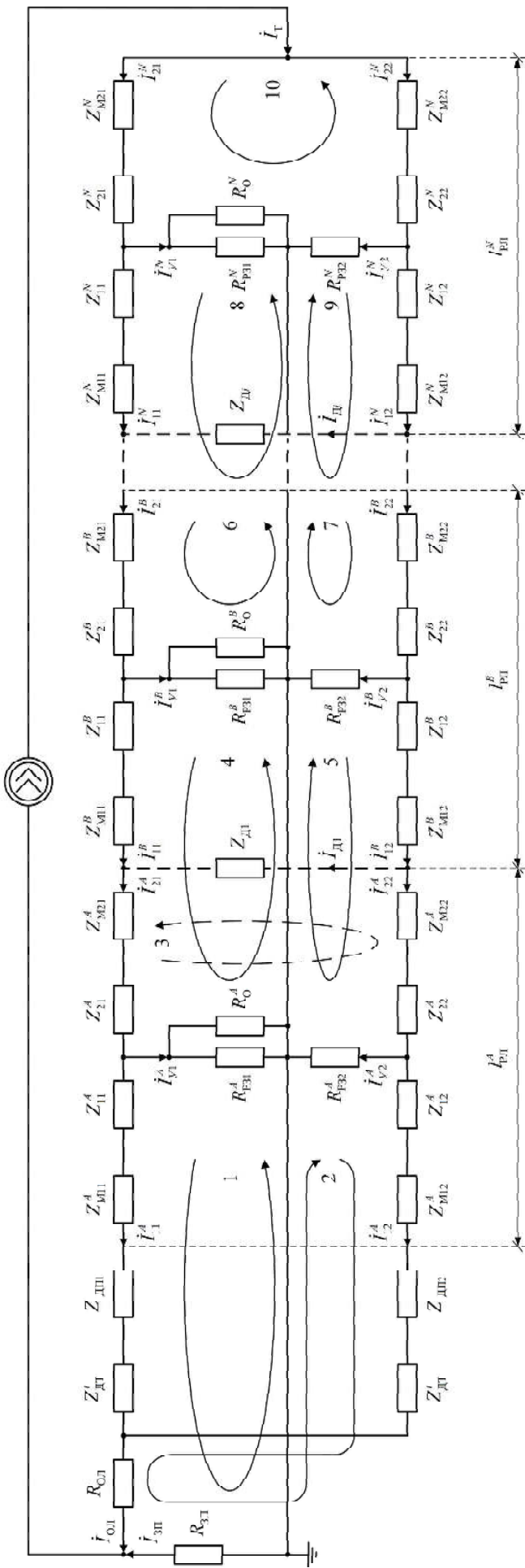


Рисунок 4 – Модель участка рельсовой линии

Для определения характера распределения гармоник тягового тока по неоднородной рельсовой линии на однопутном перегоне с бесстыковыми тональными рельсовыми цепями (ТРЦ), оборудованном уравнивающими дросселями, их сопротивления добавляются в расчётную схему. Систему уравнений дополняют уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа для контура, в который входят сопротивление этого дросселя и тяговый ток через него.

Методика расчёта тяговых токов в РЦ, свободной от подвижного состава, аналогична методике, рассмотренной для режима АЛС. Число уравнений в данной системе остаётся таким же, как при режиме АЛС и вступлении поезда на N -й отрезок. В уравнение для контура в начале РЦ добавляются сопротивления секций основных обмоток дроссель-трансформатора (ДТ) и дроссельных переключателей.

Третья глава посвящена расчёту и моделированию процесса распределения тяговых токов по элементам рельсовых линий, оборудованных РЦ различных типов, также разработке методов повышения помехоустойчивости приёмников РЦ и АЛС. Для этого были проведены расчёты изменения величин гармоник переменного тягового тока по длине рельсовой нити для значений её удельного сопротивления по отношению к земле от максимального до минимального.

Интенсивность стекания тягового тока из рельсовой нити в землю возрастает с уменьшением сопротивления рельсов по отношению к земле. Найдено, например, что при максимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле величина первой гармоники тягового тока в конце рельсовой нити длиной 1,5 км уменьшается до 94 % от его величины в начале рельсовой нити, а при минимальном сопротивлении рельсов она уменьшается только до 28 %. Расстояние от электровоза, на котором при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле в рельсах остаётся только 10 % первой гармоники тягового тока, равно 2,72 км.

Рост частоты гармоники тягового тока увеличивает продольное сопротивление рельсовых нитей. В результате гармоники тягового тока быстрее стекают из рельсов в землю с ростом их частоты. Расстояние, на котором утечка в землю третьей гармоники тягового тока из рельсовой нити, оборудованной бесстыковыми РЦ, при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле составляет 90 % от её величины в начале рельсовой нити, равно 2,17 км.

Следовательно, асимметрия тягового тока в смежной РЦ растёт при приближении к ней поезда, что может вызывать перекрытия светофоров на запрещающее показание перед движущимся поездом и срабатывание в нём автостопного торможения. На рисунке 5 приведены результаты исследования изменения асимметрии тягового тока на входном для него конце смежной РЦ при приближении поезда. Видно, что при тяговом токе 600 А величина его асимметрии начинает превышать допустимое по существующим нормам значение 12 А после приближения поезда на величину меньше 400 м.

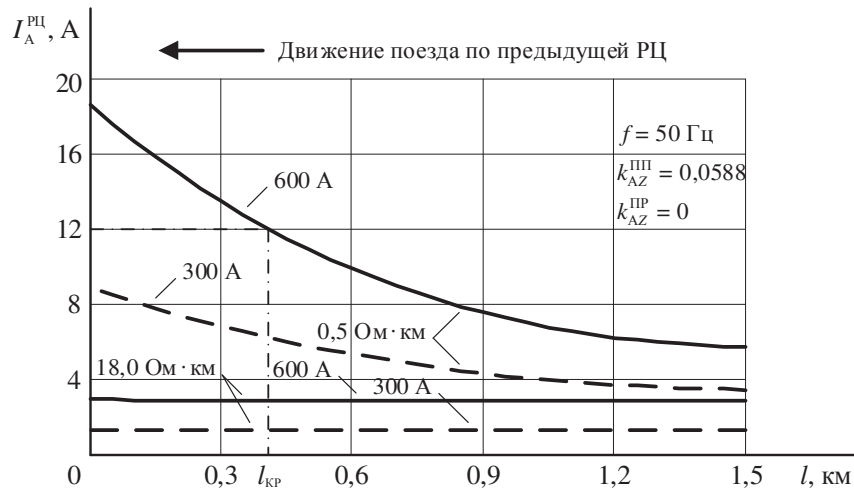


Рисунок 5 – Изменение асимметрии первой гармоники тягового тока на входном конце РЦ при приближении к ней поезда

На рисунке 6 приведены результаты исследований того, как меняется асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по однородным рельсовым линиям, обладающим только поперечной или только продольной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей при разной температуре окружающей среды. Путь звеньевой, оборудован РЦ с ДТ.

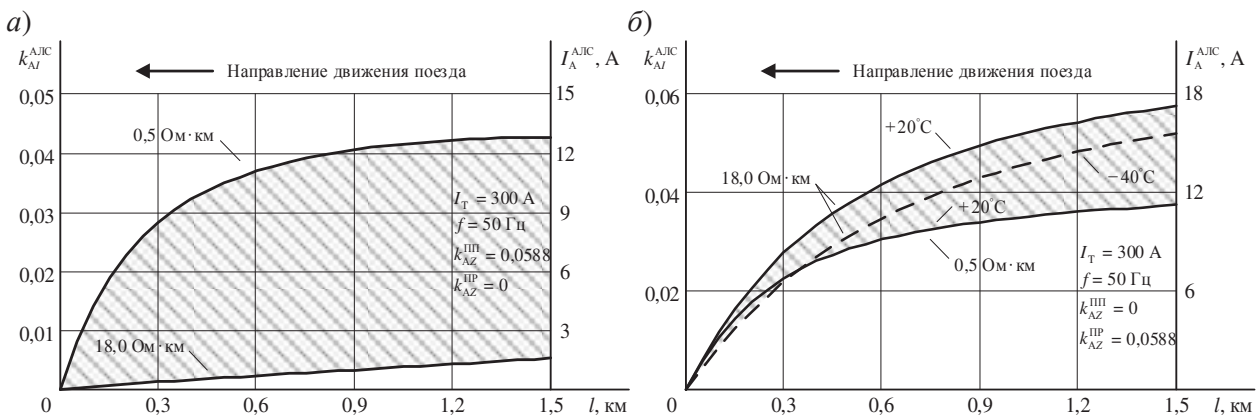


Рисунок 6 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по рельсовой линии при только поперечной (а) или только продольной (б) асимметрии сопротивлений рельсовых нитей

На перегонах, оборудованных ТРЦ, изолирующие стыки устанавливаются только на границах перегона со станциями, и асимметрия тягового тока под катушками АЛС может меняться в пределах всего перегона. Проведены исследования изменений этой асимметрии по длине перегона для бесстыкового пути, когда рельсовая линия обладает только поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей, вызванной подключением к рельсам цепей заземления опор контактной сети и других конструкций.

На рисунке 7 показаны графики изменения асимметрии первой гармоники тягового тока под приёмными локомотивными катушками АЛС при движении поезда по такому перегону длиной 15 км:

- без уравнивающих дросселей на стыках ТРЦ;
- при установке уравнивающих дросселей типа Д-20 на стыках ТРЦ (расстояние между этими дросселями $\Delta l_d = 1,5$ км);
- при установке уравнивающих дросселей этого типа посередине ТРЦ при уменьшении до 0,75 км расстояния между такими дросселями.

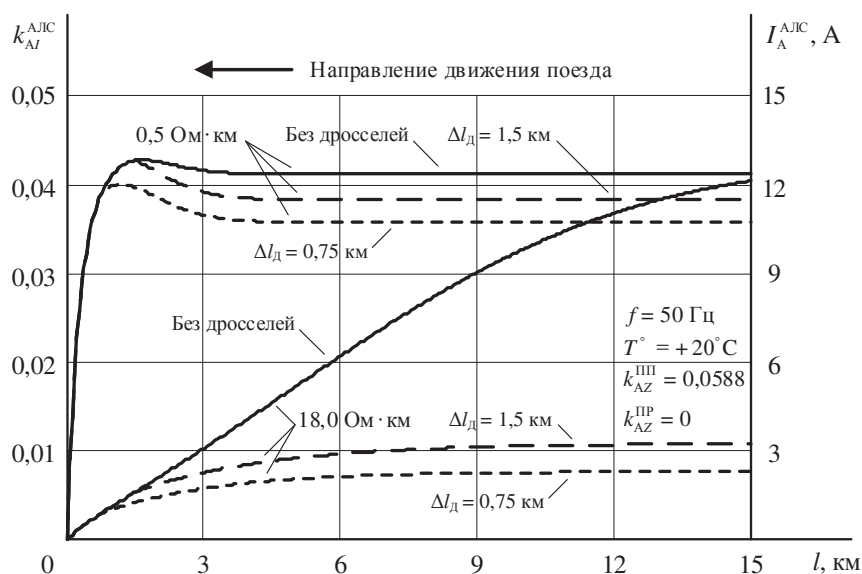


Рисунок 7 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по перегону с бесстыковыми ТРЦ

При движении поезда по перегону с ТРЦ без уравнивающих дросселей при минимальном сопротивлении рельсов по отношению к земле величина асимметрии первой гармоники тягового тока не изменяется и равна 12,4 А до тех пор, пока поезд не приблизится на расстояние 3,8 км от конца перегона. При дальнейшем движении асимметрия растёт и достигает максимума, равного 13,1 А, когда до конца перегона остаётся 2,3 км. При дальнейшем движении к выходному концу перегона ток асимметрии уменьшается до нуля.

С ростом сопротивления рельсов по отношению к земле уменьшаются утечки тягового тока из рельсов в землю через цепи заземления и поперечная асимметрия сопротивлений рельсовой линии. Поэтому, например, при удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле 18 Ом·км асимметрия тягового тока плавно уменьшается по мере движения поезда по перегону.

Установка уравнивающих дросселей на стыках ТРЦ в рассмотренном примере при минимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле уменьшала величину асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС в 1,1 раза. При дополнительной установке уравнивающих дросселей посередине каждой ТРЦ асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС снижалась в 1,2 раза.

При росте сопротивления рельсов по отношению к земле утечка тока из них в землю уменьшается, и степень уравнивания тягового тока дросселями растёт. При максимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле и установке уравнивающих дросселей на стыках РЦ значение асимметрии первой гармоники тягового тока под катушками АЛС в начале перегона уменьшалось почти в 4 раза. При дополнительной установке таких дросселей посередине каждой ТРЦ асимметрия в начале перегона уменьшалась в 5 раз.

Проведены исследования изменения асимметрии гармоник тягового тока под приёмными катушками АЛС при движении поезда по неоднородной рельсовой линии. На рисунке 8 приведены графики изменения абсолютной и относительной величины асимметрии первой гармоники тягового тока, когда поезд движется по рельсам типа Р65, оборудованным РЦ длиной 1,5 км с дроссель-трансформаторами типа ДТ-1-300.

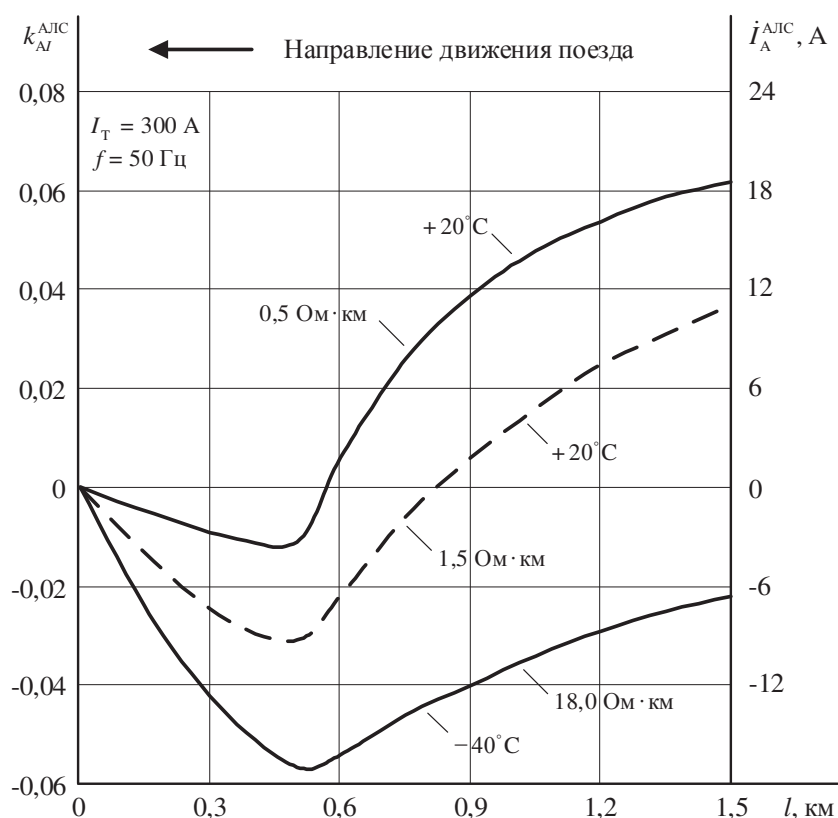


Рисунок 8 – Асимметрия первой гармоники тягового тока под катушками АЛС при движении поезда по неоднородной рельсовой линии

На первом по ходу поезда отрезке рельсовой линии длиной 1,0 км удельные продольные сопротивления рельсовых нитей одинаковы и равны по $0,40 e^{j65^\circ}$ Ом/км, а коэффициент поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей взят равным 0,0943. На оставшемся отрезке РЦ длиной 0,5 км удельное продольное сопротивление у рельсовой нити, к которой не подключены цепи заземления, равно $0,48 e^{j65^\circ}$ Ом/км, а у другой рельсовой нити $0,40 e^{j65^\circ}$ Ом/км. Коэффициент поперечной асимметрии сопротивлений

рельсовых нитей на этом отрезке равен 0,0588. Удельные сопротивления рельсов по отношению к земле брались равным 0,5, 1,5 и 18,0 Ом·км.

За отрицательное значение принята величина асимметрии тягового тока для случаев, когда ток в рельсовой нити, к которой подключены цепи заземления, меньше, чем в другой рельсовой нити.

На первом участке РЦ, где нет продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей, с увеличением значения сопротивления рельсов по отношению к земле величина асимметрии тягового тока уменьшается. При приближении поезда ко второму участку РЦ из-за действия продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей меняется знак асимметрии тягового тока. Величина её растёт до тех пор, пока на сопротивлениях рельсовых нитей не начинает сказываться действие одинаковых по величине сопротивлений секций основных обмоток ДТ.

С ростом величины сопротивления рельсов по отношению к земле на асимметрию тягового тока начинает больше сказываться продольная асимметрия сопротивлений рельсовых нитей. При температуре рельсов $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ действие поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей становится малозаметным. Таким образом, при движении поезда по такой неоднородной рельсовой линии можно ожидать сбои АЛС в начале движения по ней поезда в летний период, а в зимний период при приближении к концу РЦ.

В главе приводятся также результаты разработки способа ослабления гармонических помех, влияющих на работу приёмников РЦ и АЛС, за счёт их компенсации. Суть способа заключается в том, что принимаемый из рельсовой линии сигнал суммируется со сдвинутой на 180° его копией, из которой вырезана информационная составляющая. В результате на выходе остается информационный сигнал, практически полностью очищенный от гармонических помех.

Экспериментальные исследования с лабораторным макетом, реализующим данный способ, показал, что основная помеха на частоте 50 Гц ослаблялась макетом в два раза больше по сравнению с хорошо отрегулированным локомотивным фильтром типа ФЛ-25/75М. Запатентован один из вариантов технической реализации этого способа.

Четвёртая глава посвящена разработке способов и техническим решениям для измерения, контроля и диагностики параметров рельсовых линий.

Измерения и автоматический контроль электрических параметров в рельсовых линиях для оценки электромагнитной обстановки или для определения причин повышенной интенсивности сбоев в работе приёмников РЦ и АЛС удобно проводить с использованием косвенных измерений или методов неразрушающего контроля.

Разработан и запатентован способ измерения электрических сопротивлений неоднородных рельсовых нитей на электрифицированных участках железных дорог, заключающийся в измерении величин тяговых токов в рельсах в начале I_1 и конце I_2 выбранного участка рельсовой линии, а

также напряжений между рельсами и удалённой землёй \dot{U}_1 и \dot{U}_2 в этих точках. Измерения проводятся в нормальном режиме работы рельсовой нити (рисунок 9, а), а также при коротком замыкании рельсов на землю в конце выбранного участка (рисунок 9, б).

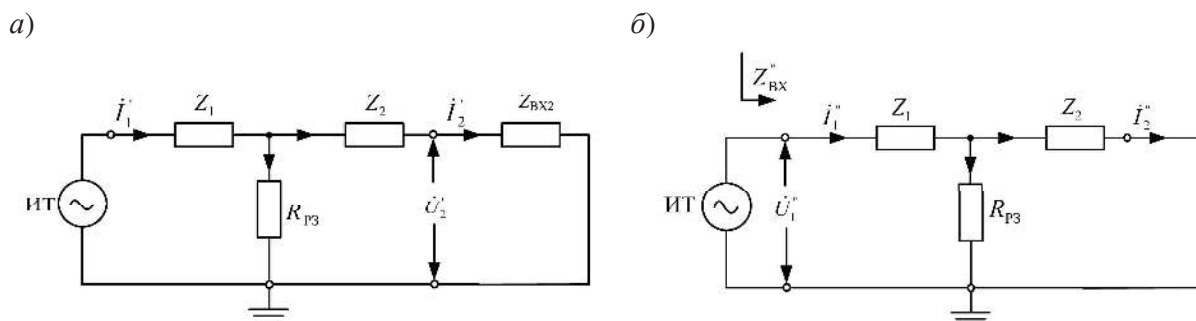


Рисунок 9 – Модель рельсовой нити при работе в нормальном режиме (а) и при коротком замыкании рельсов на землю на выходном конце рельсовой нити (б)

По найденным величинам измеренных токов и напряжений находятся численные значения продольных и поперечных сопротивлений рассматриваемого отрезка рельсовой нити. Величина продольного сопротивления Z_2 второй половины этого участка вычисляется по формуле

$$Z_2 = \frac{i_1'' - i_2''}{2i_1' i_2'' - i_1' i_1'' - i_2' i_2''} \dot{U}_2'. \quad (1)$$

Сопротивление между рельсами и землёй у данного отрезка рельсовой нити

$$R_{p3} = \frac{i_2''}{i_1'' - i_2''} Z_2, \quad (2)$$

а продольное сопротивление рельсов первой половины отрезка рельсовой нити

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_1''}{i_1''} - \frac{Z_2 R_{p3}}{Z_2 + R_{p3}}. \quad (3)$$

Результаты измерений позволяют выявлять причины повышенного уровня помех от тяговых токов, действующих на аппаратуру РЦ и АЛС, а также разрабатывать результативные меры по их устранению.

Оценивать состояние изолирующих стыков при электротяге переменного тока можно по результатам анализа особенностей растекания переменного тягового тока по изолирующим стыкам и по секциям основной обмотки ДТ, установленного рядом. На рисунке 10 показана функциональная схема запатентованного устройства для контроля состояния таких стыков при электротяге переменного тока, обеспечивающего реализацию такого анализа. При этом обеспечивается также сигнализация о случаях, когда асимметрия тягового тока в рельсовой линии возле изолирующих стыков превышает допустимое значение.

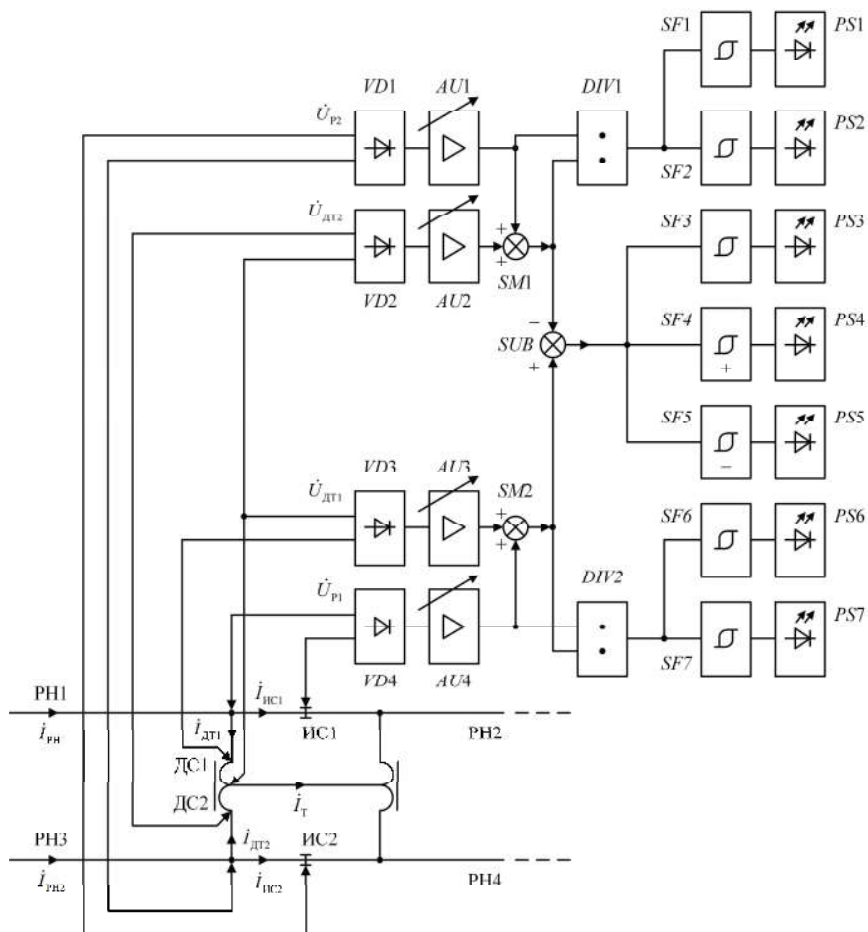


Рисунок 10 – Функциональная схема устройства для контроля состояния изолирующих стыков на участках с электротягой

В ТРЦ обязательно чередование частот сигнальных токов в смежных РЦ, что может использоваться для контроля состояния изолирующих стыков, разделяющих эти цепи. Эта особенность использована в запатентованном устройстве для контроля состояния изолирующих стыков в ТРЦ (рисунок 11).

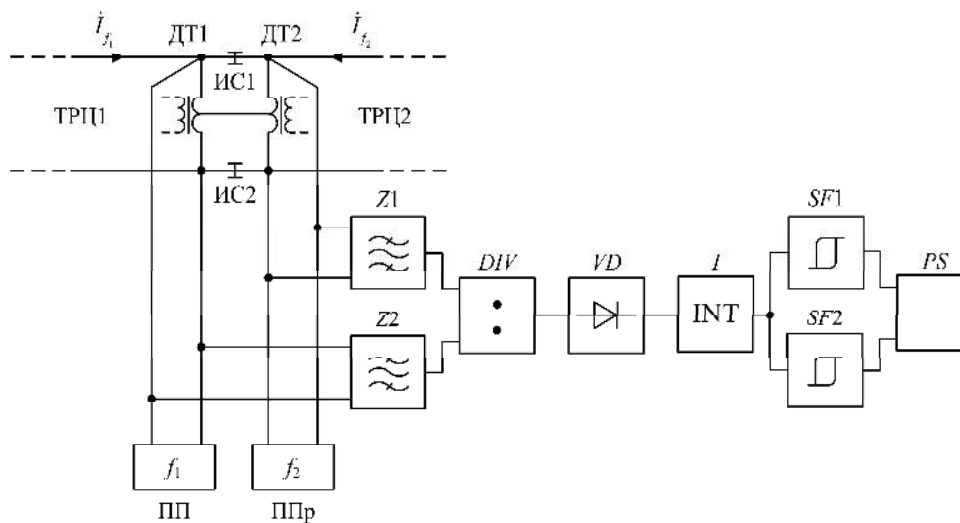


Рисунок 11 – Функциональная схема устройства для автоматического контроля состояния изолирующих стыков в ТРЦ

Принцип действия устройства основан на сравнении по результатам измерений уровня сигнала с частотами, используемыми в смежной РЦ и в рассматриваемой РЦ. Превышение этим соотношением определенной величины сигнализирует о недопустимом уменьшении сопротивления изолирующих стыков.

Излом рельса обнаруживается РЦ при их работе в контрольном режиме только когда происходит полный электрический разрыве в месте излома. Контроль процесса изменения асимметрии переменного тягового тока в рельсах в качестве информационного сигнала позволяет точнее фиксировать наступление такого события. Однако при этом необходимо исключить влияние на результаты контроля появления мощных импульсных помех в рельсовых линиях. На рисунке 12 приведена функциональная схема одного из запатентованных вариантов технической реализации этого способа контроля излома рельсов на участках с электротягой.

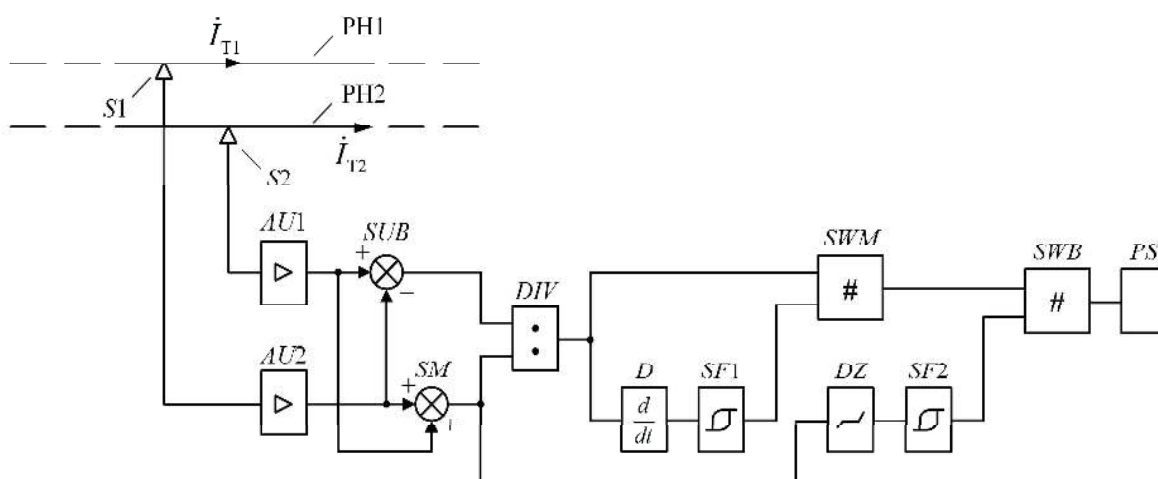


Рисунок 12 – Функциональная схема реализации способа автоматического контроля излома рельса

Анализ работы устройства, реализующего данный способ, показал его способность фиксировать излом рельса и при сохранении остаточной кондуктивной связи в месте излома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационного исследования получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Предложены и обоснованы методы и технические решения для оценки уровня помех от переменного тягового тока и способов защиты от данных помех, которые позволяют повысить уровень помехоустойчивости аппаратуры РЦ и АЛС.

2. Установлено, что существующие методы и технические средства не всегда обеспечивают требуемый уровень помехоустойчивости аппаратуры РЦ и АЛС на участках с электротягой переменного тока, а известные математические модели рельсовой линии не позволяют рассчитывать помехи

от тяговых токов на РЦ и АЛС с одновременным учётом неоднородностей сопротивлений рельсовых нитей, влияния их взаимной индуктивности, а также поверхностного сопротивления рельсовой линии.

3. Получена модель рельсовой линии в виде каскадного соединения шестиполюсников, моделирующих её отрезки, которая позволяет в комплексе учитывать неоднородности сопротивлений рельсовых нитей по их длине, влияние их взаимной индуктивности, а также поверхностное сопротивление рельсовой линии. Определены предельно допустимые длины отрезков рельсовых нитей рельсовой линии с распределёнными параметрами, представленной каскадным соединением шестиполюсников с сосредоточенными параметрами, удовлетворяющие требуемой точности расчётов.

4. Получена система линейных уравнений, которая обеспечила возможность математического моделирования процессов растекания гармоник тягового тока по элементам однородных и неоднородных рельсовых линий в тяговой рельсовой сети для анализа причин его мешающего влияния на приёмники РЦ и АЛС.

5. Получены количественные зависимости величины асимметрии разных гармоник тягового тока по длине однородных и неоднородных рельсовых линий от состояния элементов рельсовых нитей при разных соотношениях величин и разному распределению продольной и поперечной асимметрии их сопротивлений по длине.

6. Предложен и обоснован критерий, позволяющий сравнить величины асимметрии гармоник переменного тягового тока в рельсовых нитях на перегонах, оборудованных бесстыковыми ТРЦ с уравнивающими дросселями и без них. Полученные результаты применены АО «НИИАС» при разработке и анализе РЦ в проектах оборудования в части мест установки уравнивающих дросселей.

7. Разработано решение и реализующие его технические устройства, позволяющие ослабить уровень помех от гармоник переменного тягового тока в приёмниках РЦ и АЛС за счёт их компенсации более, чем в два раза по сравнению с серийно выпускаемыми фильтрами.

8. Разработаны способы и технические решения на основе методов косвенных измерений и методов неразрушающего контроля для измерения сопротивлений отрезка рельсовой нити в конкретной точке пути и автоматического контроля состояния изолирующих стыков. Применение данных решений на практике позволит уменьшить параметр потока отказов изолирующих стыков не меньше, чем в 1,5 раза.

9. Разработан способ автоматического обнаружения излома рельсов не только при полном разрыве электрической цепи при использовании контроля изменения асимметрии тягового тока в рельсовых линиях как информационного сигнала. Данный способ может быть применён в дополнение к контрольному режиму работы РЦ или взамен него, а также на электрифицированных участках железных дорог, не оборудованных РЦ.

10. Рекомендуется применение разработанных способов косвенных измерений и автоматического контроля при техническом обслуживании РЦ для повышения достоверности выявления причин возрастания уровня помех от тягового тока на аппаратуру РЦ и АЛС, а также уменьшения времени действия этих причин.

11. Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является создание математической модели рельсовой сети, учитывающей мешающее влияние тяговых токов в смежных рельсовых линиях и в контактных проводах с последующим совершенствованием методики расчёта помех на приёмники РЦ и АЛС.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях

1. Шаманов, В.И. Измерение электрических сопротивлений в неоднородных рельсовых линиях на участках с электротягой / В.И. Шаманов, А.Е. Ваньшин, Д.В. Денежкин, Л. Тасболатова // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 3. – С. 15-17.

2. Шаманов, В.И. Измерения параметров рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Автоматика, связь, информатика. – 2022, – №8. – С. 10-16.

б) патенты на изобретение

3. Патент № 2668007 С1 Российская Федерация, МПК В61L 23/16. Устройство для контроля состояния изолирующих стыков в тональных рельсовых цепях / В.И. Шаманов, А.Е. Ваньшин, В.С. Кузьмин, Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) (RU). – № 2017139555: заявл. 14.11.2017; опубл. 25.09.2018; Бюл. №27. – 5 с.

4. Патент № 2695438 С1 Российская Федерация, МПК G01R 27/16, В61L 23/16. Способ измерения электрических сопротивлений неоднородных рельсовых нитей на электрифицированных участках железных дорог / В.И. Шаманов, А.Е. Ваньшин, Д.В. Денежкин, В.С. Кузьмин, Л. Тасболатова; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) (RU). – № 2018136134: заявл. 12.10.2018; опубл. 23.07.2019; Бюл. №21. – 11 с.

5. Патент № 2748826 С1 Российская Федерация, МПК В61К 9/10, В61L 23/04. Устройство для контроля излома рельсов на участках с электротягой переменного тока / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта" (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). – № 2020138311: заявл. 23.11.2020; опубл. 31.05.2021. – Бюл. № 16. – 6 с.

6. Патент № 2754372 С1 Российская Федерация, МПК В61L 25/06. Компенсатор помех в гармоническом низкочастотном сигнале / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)) (RU). – № 2021108195: заявл. 26.03.2021; опубл. 01.09.2021, Бюл. № 25. – 7 с.

7. Патент № 2786253 С1 Российская Федерация, МПК В61L 23/16, СПК В61L 23/165. Устройство для контроля состояния изолирующих стыков при электротяге переменного тока / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) (RU). – № 2022115104: заявл. 03.06.2022; опубл. 19.12.2022; Бюл. № 35. – 9 с.

8. Патент № 2795528 С1 Российская Федерация, МПК В61L 23/04, В61К 9/00. Устройство для автоматического контроля излома рельсов на электрифицированных железных дорогах / В. И. Шаманов, Д. В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ) (RU). – № 2023101830: заявл. 27.01.2023; опубл. 04.05.2023; Бюл. № 13. – 5 с.

в) свидетельства на программу ЭВМ

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661104 Российская Федерация. Программа для расчёта помех от тягового тока в неоднородных рельсовых линиях: № 2021660044: заявл. 25.06.21: опубл. 06.07.21 / Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)).

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661645 Российская Федерация. Программа для расчёта распределения тягового тока в рельсовых линиях, оборудованных рельсовыми цепями: № 2022660738: заявл. 03.06.2022: опубл. 23.06.2022 / Д.В. Денежкин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ)).

г) в изданиях, входящих в международную базу цитирования SCOPUS

11. Shamanov, V.I. Automatic Control over Rail Breakage in Sections with AC Electric Traction. ISSN 1068-3712 / V.I. Shamanov, D.V. Denezhkin // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 93. No. 9. – P. 596-599. © Allerton Press, Inc., 2022. Russian Text © The Author(s), 2022, published in Elektrotehnika. – 2022. – No. 9. – P. 47-50. – DOI 10.3103/S1068371222090115.

12. Shamanov, V. Rail break monitoring in areas with AC electric traction / V. Shamanov, D. Denezhkin // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2476 (1): 020077.

д) в других изданиях и материалах конференций

13. Шаманов, В.И. Влияние сбоев в работе рельсовых цепей на безопасность движения поездов / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Безопасность движения поездов: труды XIX Всероссийской науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 2 – М.: РУТ (МИИТ), 2018. – С. 27-28.

14. Денежкин, Д.В. Изменения удельного сопротивления рельсовых нитей при промышленной частоте тока / Д.В. Денежкин // Труды Всероссийской научно-практической конференции Неделя науки - 2019, в двух частях, часть 1. – М.: РУТ (МИИТ), 2019. – Секция III. – С. 31.

15. Денежкин, Д.В. Контроль состояния изолирующих стыков в тональных рельсовых цепях / Д.В. Денежкин // Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли: материалы молодежного научного форума студентов и аспирантов транспортных вузов с международным участием, Санкт-Петербург, 14-15 ноября 2019 года. – Москва: Издательство «Перо», 2019. – С. 167-170.

16. Шаманов, В.И. Измерения электрических сопротивлений в неоднородных тяговых рельсовых линиях / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 250-251.

17. Шаманов, В.И. Контроль поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2020. – С. 52-54.

18. Шаманов, В.И. Косвенные измерения асимметрии тягового тока в рельсах под катушками автоматической локомотивной сигнализации / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2021. – С. 208-210.

19. Денежкин, Д.В. Влияние на уровень помех от тягового тока величины электрического сопротивления элементов рельсовых линий / Д.В. Денежкин // Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки: Материалы VI Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 125-летию РУТ (МИИТ). – М.: Перо, 2021. – С. 351-355.

20. Шаманов, В. И. Решения некоторых вопросов обеспечения безопасности интервального регулирования движения поездов / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2021. – С. 144-147.

21. Шаманов, В.И. Расчётные электрические схемы рельсовых линий / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Проблемы безопасности на транспорте:

материалы XII Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2022. – С. 230-232.

22. Шаманов, В.И. Аналитические методы оценки электромагнитного излучения для аппаратуры в интервальном регулировании движения поездов / В.И. Шаманов, Д.В. Денежкин // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы II международной научно-практической конференции, Москва, 25 мая 2023 года / Под редакцией Л.А. Баранова. – Москва: Российский университет транспорта, 2023. – С. 655-659.

Денежкин Дмитрий Валерьевич

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ АППАРАТУРЫ
РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ
СИГНАЛИЗАЦИИ ПРИ ЭЛЕКТРОТЯГЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.9.4. Управление процессами перевозок
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.11.2023

Формат 60x84 1/16

Заказ _____

Объем 1,0 усл. п.л.

Тираж 80 экз.
