

На правах рукописи



ТРЯПКИН Евгений Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА СИНХРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2024

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

Научный руководитель:

Игнатенко Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Шевлюгин Максим Валерьевич,

доктор технических наук, доцент.

Заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта»

Никифоров Михаил Михайлович,

кандидат технических наук.

Директор научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «24» сентября 2024 г. в 17:30 на заседании диссертационного совета Д 218.003.07 на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» по адресу: Россия, 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, главный корпус, ауд. 204.

С диссертацией, авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДВГУПС» (www.dvgups.ru) и на официальном сайте (www.vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, д. 47, ФГБОУ ВО «ДВГУПС», учёному секретарю диссертационного совета Д.218.003.07, e-mail: kabalyk@festu.khv.ru

Автореферат разослан «05» июля 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
Д 218.003.07, к.т.н., доцент



Ю.С. Кабалык

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Концепция развития транспортной отрасли России до 2030 и в перспективе до 2035 г. включает в себя концептуальные изменения в направлении движения грузов. Одной из главных поставленных целей является увеличение пропускной способности железнодорожной отрасли в направлении основных портов для экспорта грузов, а также предоставление каналов для транзита грузов между соседними государствами.

Выполнение поставленной цели становится возможным как за счет строительства новых транспортных путей, так и расширения существующих железнодорожных магистралей, а также изменения способов организации движения поездов.

Для увеличения интенсивности движения, а также массы поездов требуется обеспечить готовность инфраструктуры к заданным режимам работы. Система тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ является наиболее протяженной среди электрифицированных железных дорог. Дальнейшая электрификация участка Байкало-Амурской магистрали и Транссиба предполагается также с использованием этой системы.

Существующие методы расчета нагрузочной способности системы электроснабжения основаны на применении математического и имитационного моделирования. Такие модели применяются для целей выбора и проверки существующей или проектируемой системы электроснабжения, обеспечения заданных параметров движения, расчета аварийных режимов, целей текущего управления параметрами работы электроустановок, средств компенсации, вольтодобавки и др. Важным и перспективным направлением является контроль текущих и прогнозных параметров работы электроустановок, поэтому к математическим и имитационным моделям предъявляются высокие требования сходимости, достоверности и производительности расчетных систем при их применении. Данные требования зависят как от достоверности исходных данных моделей, так и адекватности ее исполнения, полноты учтенных процессов, имеющих наибольшее влияние. Многие элементы модели системы тягового железнодорожного электроснабжения (СТЖЭ) состоят из территориально-распределенных объектов, находящихся в электромагнитном взаимодействии как друг с другом, так и с другими цепями и элементами, что делает абсолютную математическую модель их совместной работы недостижимой. Верификация результатов математической модели, а также инструментальная параметризация ее отдельных компонентов является важным инструментом для подтверждения ее адекватности и для достижения поставленных целей, что снижает риски и повышает экономический эффект от ее применения.

Для контроля электрических параметров территориально-распределенных объектов требуется использование специализированных систем, позволяющих производить измерение значений с точной фиксацией времени для обработки результатов в единой системе координат. Это может быть достижимо при использовании средств регистрации и измерений, работающих в режиме единого времени, например, синхронных векторных измерений (PMU). Использование данной системы позволяет произвести инструментальную параметризацию элементов математической модели на реальном участке, а также произвести верификацию результатов расчета некоторых составных элементов.

Актуальность работы подтверждается необходимостью усовершенствования математических моделей СТЖЭ и ее составных элементов применением измерительного

комплекса, работающего в режиме реального времени. Результаты работы позволят повысить достоверность средств математического моделирования, и, как следствие, качество их использования для целей проектирования, управления и контроля объектов СТЖЭ.

Степень разработанности темы исследования

Диссертационное исследование выполнено на основании научных разработок учёных, которые занимались вопросами работы системы электроснабжения железных дорог, движением электроподвижного состава, интервального и тяжеловесного движения, а также его влиянием на электроэнергетическую систему.

Значительный вклад в моделирование и создание методик расчета системы тягового электроснабжения внесли: Аржанников Б.А., Бадер М.П., Басов В.А., Бочев А.С., Буякова Н.В., Быкадоров А.Л., Веников В.А., Вильгельм А.С., Гаранин М.А., Герман Л.А., Добрынин Е.В., Дынькин Б.Е., Жарков Ю.И., Закарюкин В.П., Игнатенко И.В., Кишкурно К.В., Карякин Р.Н., Котельников А.В., Косарев А.Б., Крюков А.В., Кулинич Ю.М., Лосев С.Б., Мамошин Р.Р., Марквардт Г.Г., Марквардт К.Г., Марский В.Е., Мельников Н.А., Мирошниченко Р.И., Митрофанов А.Н., Незевак В.Л., Никифоров М.М., Новиков А.С., Попов Н.М., Попова Н.А., Пупынин В.Н., Савоськин А.Н., Строев В.А., Субханвердиев К.С., Тарасов В.И., Тер-Оганов Э.В., Фигурнов Е.П., Черемисин В.Т., Черепанов А.В., Шалимов М.Г., Шевлюгин М.В., Korba P. и другие.

В анализ работы обратных рельсовых сетей и рельсовых линий переменного тока значительный вклад внесли: Авдеева К.В., Антонов А. А., Аркатов В. С., Бадёр М. П., Бушуев А. В., Игнатенко И. В., Кандаев В. А., Карякин Р. Н., Кириленко А. Г., Косарев А. Б., Корниенко В. В., Котельников А. В., Кравцов Ю. А., Кузнецов К. Б., Леушин В. Б., Лунев С. А., Марискотти А., Марквардт, К. Г., Наумов А. А., Наумов А. В., Остапенко А. Н., Скоков Р. Б., Тарасов Е. М., Трофимов Ю. А., Шамапов В. И., Ходкевич А. Г., Фигурнов Е. П., Mariscotti A., Korba P. и другие.

Результаты, полученные в диссертационном исследовании, дополняют имеющиеся научные труды.

Объектом исследования является система тягового электроснабжения переменного тока.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы расчета параметров работы системы тягового железнодорожного электроснабжения.

Цель исследования – совершенствование методов расчета системы тягового железнодорожного электроснабжения переменного тока путем определения параметров системы, параметров режима за счет синхронного контроля параметров ее элементов при увеличении массы и интенсивности движения поездов.

Задачи:

1. Провести анализ существующих моделей тягового электроснабжения с разработкой предложений для их совершенствования;
2. Разработать систему и оборудование для регистрации параметров режима территориально-распределенных объектов в режиме единого времени;
3. Провести экспериментальное определение сопротивления тяговой сети для верификации результатов, полученных по математической модели СТЖЭ;

4. Разработать способ и методику контроля параметров сопротивления системы внешнего электроснабжения предложенной системой регистрации путем контроля параметров тяговой сети 25 кВ;

5. Провести экспериментальное определение сопротивления рельс-земля и участка рельсовой линии (РЛ) для исследования их электрических параметров в условиях электромагнитной обстановки действующего участка электроснабжения.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Получена имитационная модель режимов работы системы тягового электроснабжения, имеющая повышенную точность работы за счет совместного моделирования большего количества межподстанционных зон и количества параллельных тяговых сетей;

2. Разработана система и оборудование для регистрации территориально-распределенных объектов в режиме единого времени;

3. Разработан способ и методика контроля параметров сопротивления системы внешнего электроснабжения предложенной системой регистрации методом контроля параметров тяговой сети 25 кВ;

4. Определена релевантность модели расчета сопротивления участка тяговой сети на основе синхронных измерений параметров тяговой сети рабочего режима СТЖЭ;

5. Разработана модель участка обратной тяговой сети с использованием синтезированной функции параметров на основе измерений, позволяющая производить расчеты потенциалов «рельс-земля» в условиях электромагнитной обстановки действующего участка электроснабжения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложен алгоритм программы и расчетная схема проведения электрических расчетов системы тягового электроснабжения, позволяющие повысить протяженность расчетного участка тяговой сети с повышением количества рассчитываемых путей;

2. Разработано устройство и система измерений параметров территориально-распределенных объектов системы электроснабжения в условиях электромагнитного влияния действующей электроустановки;

3. Разработана методика, позволяющая определять параметры внешней питающей системы, не требующая проведения переключений на подстанции и приема информационных данных от внешних систем;

4. Разработана методика определения переходного сопротивления «рельс-земля» и входных параметров рельса тяговому току.

Личный вклад автора заключается в выполнении анализа методик и способов расчета устройств тягового электроснабжения, с последующей разработкой способа и методики контроля параметров сопротивления системы тягового электроснабжения, внешней питающей системы, переходного сопротивления «рельс-земля», а также входных параметров обратной рельсовой сети (РС) тяговому току.

Методология и методы исследований. Теоретические и экспериментальные исследования проведены на основе методов системного подхода с использованием теорий электромагнитного поля, основ энергетического расчета, математического и имитационного моделирования на ЭВМ. Для проведения расчетов применялись следующие программные продукты: MATLAB Simulink R2016A, Microsoft Excel 2016, NI LabView 2019, ELCUT 6.0.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм расчета и расчетная схема системы тягового электроснабжения с учётом повышения протяженности расчетного участка тяговой сети и повышением количества путей;
2. Система и устройства регистрации и параметрической идентификации параметров элементов тяговых сетей, работающие в режиме единого времени;
3. Методики контроля параметров внешней питающей энергосистемы и сопротивления тяговой сети, контроля входных параметров РС и параметров РС.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты теоретических и практических исследований приняты к использованию Дальневосточной дирекцией по энергообеспечению – структурным подразделением Трансэнерго – филиалом ОАО «Российские железные дороги» и АО «ВНИИЖТ», что подтверждено соответствующими актами.

Научные результаты диссертационного исследования применялись при выполнении ряда научно-исследовательских работ, а также в ходе реализации учебного процесса по дисциплинам «Автоматизация устройств электроснабжения», «Основы компьютерного проектирования и моделирования устройств электроснабжения», «Микропроцессорные информационно управляющие системы», в лаборатории «Цифровые электрические системы и инфраструктура» ДВГУПС.

достоверности научных положений, выводов и полученных результатов подтверждаются согласованностью расчетных данных с данными, полученными из опыта эксплуатации и проведенных инструментальных измерений.

Апробация результатов работы. Материалы диссертации докладывались, обсуждались и были одобрены на международной научно-практической конференции, г. Екатеринбург, 29 ноября 2022г.; международной научно-практической конференции, г. Самара, 1-2 июня 2023г.; IV международной научно-практической конференции, г. Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 г.; десятом международном симпозиуме "Eltrans 10.0", г. Санкт-Петербург, 09–11 октября 2019 г.; XVII международной конференция по науке и технологиям Россия-Корея-СНГ : г. Южно-Сахалинск, 15– 17 июня 2017 г.; международной научно-практической конференции, г. Ростов-на-Дону, 18–21 апреля 2017 г.; всероссийской научно-практической конференции, г. Хабаровск, 19–20 ноября 2015 г.; международной научно-практической конференции, г. Омск, 11–12 декабря 2014 г.; XIV краевом конкур-се молодых ученых и аспирантов, г. Хабаровск 17–24 января 2012 г.; всероссийской научно-практической конференции с международным участием представителей производства, ученых транспортных вузов и инженерных работников, г. Хабаровск, 11–12 ноября 2010 г.; заседаниях и научно-технических семинарах кафедры «Системы электроснабжения», г. Хабаровск, ДВГУПС, 2010 – 2024 гг.

Научные достижения. Новизна и значимость полученных результатов настоящего исследования представлены в рамках XV международной выставки «Транспорт России».

Публикации. Основные положения диссертации нашли отражение в 27 печатных работах, из них 7 работ представлены в журналах, входящих в международную базу научного цитирования Scopus, 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России (3 – по специальности, 2 – по смежным специальностям).

Структура и объём диссертации. Работа включает введение, четыре раздела, заключение, список литературы из 160 наименований, десять приложений. Текст диссертационной работы изложен на 139 страницах печатного текста, включает 20 таблиц, 48 рисунков.

Во введении обоснованы актуальность, значимость выбранной темы диссертации, её научное и практическое значение, сформулированы цель и задачи исследований и основные научные положения, выносимые на защиту. Описана степень достоверности, а также приведены сведения об апробации и внедрении полученных результатов.

В разделе 1 представлен обзор и анализ существующих методик расчета систем тягового электроснабжения. Рассмотрены этапы выбора параметров и расчета элементов системы тягового электроснабжения. Рассмотрены применяемые модели тяговых сетей, тяговых подстанций, системы внешнего электроснабжения и обратной РС. Рассмотрены ограничения существующих методик расчета, сформулированы мероприятия для их адаптации к применению в задачах текущей эксплуатации. Модели, вошедшие в состав методики электрических расчетов, обладают рядом ограничений, и по ряду источников их результаты могут не совпадать с реальными на 5-10% при определении параметров сопротивления элементов, и до 17-44% при определении величин токов короткого замыкания и интегральных параметров. В целях повышения точности выполнения тягового расчета, в том числе для учета влияния соседних межподстанционных зон, поставлена задача создания методов и алгоритмов расчета с масштабируемой функцией количества участков и путей, при одновременном снижении разрядности используемых матриц и условий упрощения их использования в автоматизированных программных комплексах.

Разработана математическая модель и алгоритм расчета. Результаты исследований были использованы в НИР «Разработка программного модуля электрических расчетов в рамках системы АСУ ТЭР 2020-1». Заказчик: АО «ВНИИЖТ». Договор №0.ЦЭТ.10.07844/20 от 23.10.2020г. Пример отображения комбинации графов, состоящих из тяговой подстанции, ветви тяговой сети и узла представлен на рисунке 1.

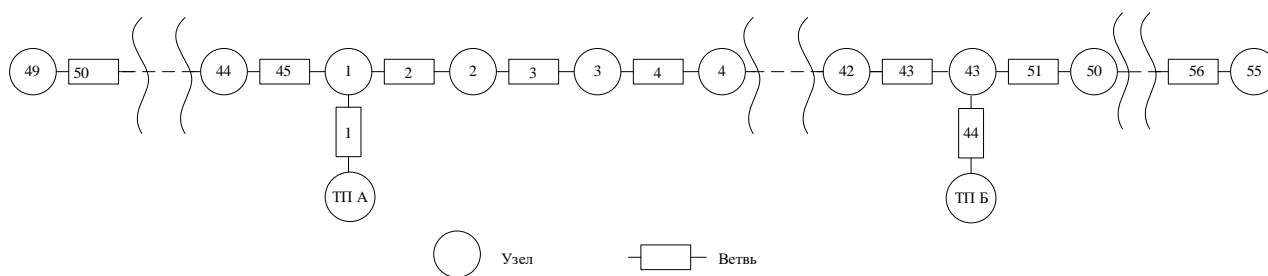


Рисунок 1 – Схема-граф тяговой сети

Математическая модель тяговой сети состоит из следующих основных элементов:

- тяговые подстанции, соответственно А и В;
- ветви тяговой сети;
- узлы секционирования и нагрузки тяговой сети.

Схема элементов представленной тяговой сети для двухпутного исполнения приведен на рисунке 2.

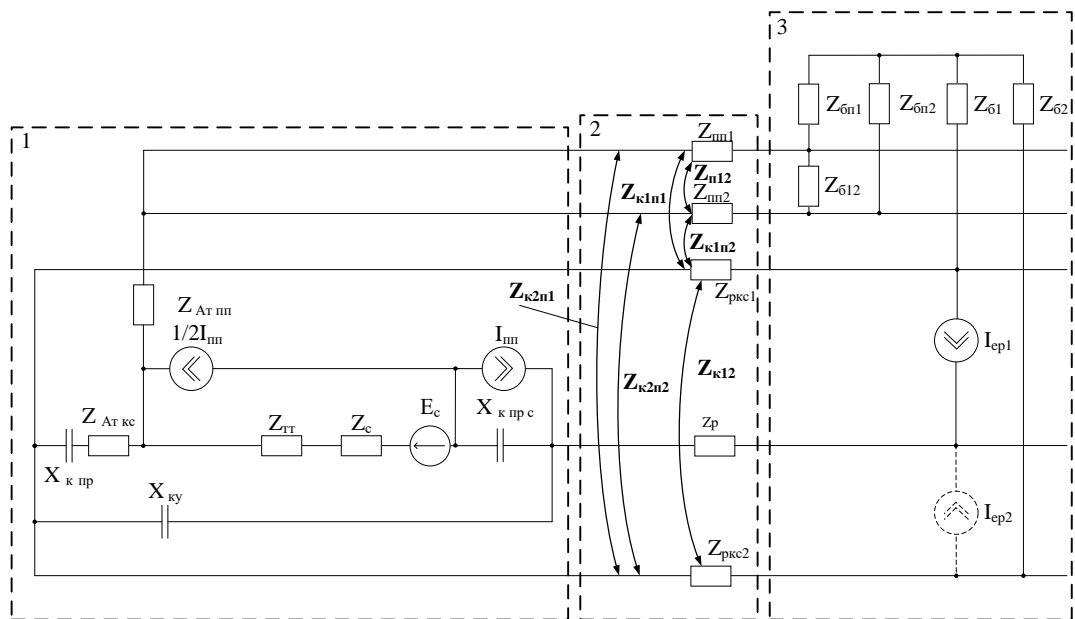


Рисунок 2 – Расчетная схема части тяговой сети 25 и 2x25 кВ.

Схема тяговой сети обладает совместимостью с тяговой сетью 25 и 2x25 кВ, в том числе для производства совместных тяговых расчетов этих систем тягового электроснабжения. На схеме отображены параметры следующих элементов:

E_c – ЭДС генератора энергосистемы; Z_c – сопротивление энергосистемы ветви параметров тяговой подстанции; $Z_{ТТ}$ – сопротивление трансформатора (автотрансформатора) ветви параметров тяговой подстанции; $Z_{АТ пп}$, $Z_{АТ кс}$ – сопротивление полуобмоток автотрансформатора, соответственно тяговой сети и подпитывающего провода; $1/2I_{пп}$, $I_{пп}$ – источник тока для учета нагрузки соседнего плеча тяговой подстанции; $X_{к пр}$, $X_{к пр с}$ – сопротивление продольной компенсации в цепи плеча питания или заземляемой фазы тяговой подстанции; $X_{к у}$ – сопротивление поперечной компенсации тяговой подстанции; $Z_{ркс1}$, $Z_{ркс2}$ – сопротивления участков тяговой сети первого и второго пути, соединяющие узлы тяговой сети; $Z_{к12}$ – сопротивления взаимной проводимости тяговой сети первого и второго путей; $Z_{пп1}$, $Z_{пп2}$ – сопротивления подпитывающих проводов; $Z_{к1п1}$, $Z_{к1п2}$, $Z_{к2п1}$, $Z_{к2п2}$, $Z_{к12}$, $Z_{п12}$ – сопротивления взаимных проводимостей между контактными сетями и подпитывающими проводами; $Z_{р}$ – сопротивление обратной тяговой цепи; $I_{рп1}$, $I_{рп2}$ – реальный и мнимый ток поезда, полученный в результате тягового расчета; $Z_{бп1}$, $Z_{бп2}$, $Z_{б1}$, $Z_{б2}$ – сопротивления узлов тяговой сети; $Z_{б12}$ – секционное сопротивление подпитывающих проводов тяговой сети.

Разработанная модель позволяет производить расчет одного межподстанционного участка тяговой сети в комплексных величинах или фазных координатах. Унификация количества элементов до трех упрощает процесс автоматической подготовки расчетных матриц. Взаимосвязь между отдельными рассчитанными межподстанционными зонами, а также со схемой системы внешнего электроснабжения (СВЭ) (при ее наличии) осуществляется посредством подстановки параметров элементов схемы через значения $1/2I_{пп}$; $I_{пп}$; Z_c , E_c и реализуется в ходе итерационных вычислений. Укрупненная схема работы алгоритма расчета одной межподстанционной зоны СТЖЭ приведена на рисунке 3.

Сравнение результатов расчета разработанным методом с результатами «КОРТЭС» показали высокую сходимость для систем 25 и 2x25 кВ при одинаковых исходных данных. Различия обусловлены округлением значений применяемых типов

переменных и параметрами X/R внешней энергосистемы.

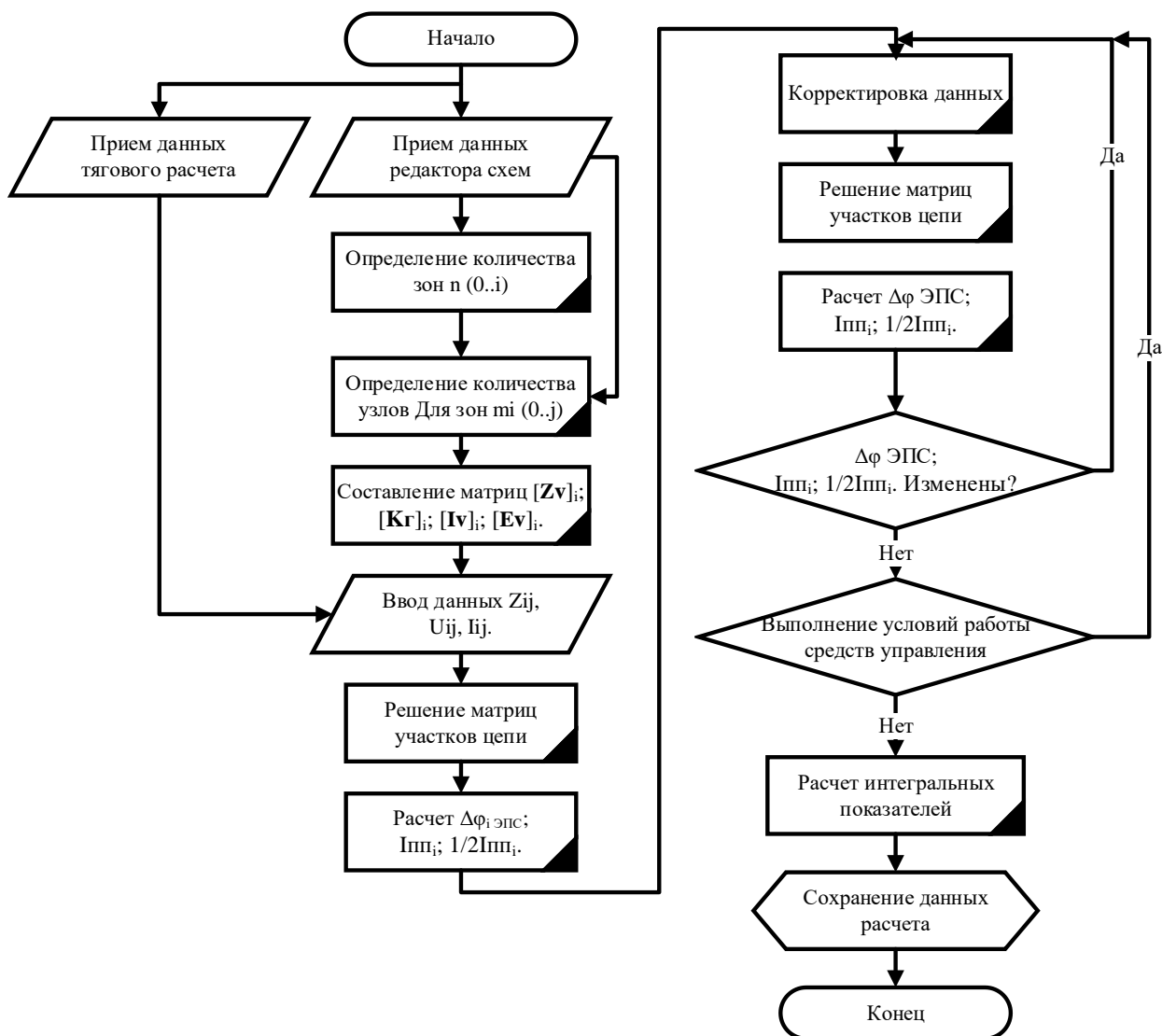


Рисунок 3 – Укрупнённая схема алгоритма моделирования режимов работы СТЖЭ

Для учета работы внешней системы электроснабжения разработаны приемы и методики, снижающие погрешность расчета, так сопротивление энергосистемы может быть представлено реактансом, комплексным сопротивлением, эквивалентной или полной схемой. Независимо от метода моделирования энергосистемы для нужд детерминированного расчета важной задачей остается определение сопротивления энергосистемы на вводах тяговой подстанции методом измерений без необходимости производства специальных переключений.

Обратная тяговая сеть является сложным элементом системы тягового электро-снабжения. При определении токораспределения в РС, а также расчётах потенциалов рельс-земля большинство авторов исходит из классической модели представления РС переменного тока. Однако данная модель содержит ряд упрощений. В частности, методика расчета не подразумевает протекание тяговой составляющей тока в рельсах, а также не учитывает его несинусоидальной формы. Данное обстоятельство приводит к

значительным расхождением расчетных моделей и результатов инструментальных замеров величин напряжений «рельс-земля» на действующих участках с большим переходным сопротивлением верхнего строения пути и балластной призмы.

В результате проведенных исследований сформулированы цель и задачи в диссертационном исследовании.

В разделе 2 для решения задач определения параметров элементов СТЖЭ была разработана система регистрации и измерения территориально распределенных и удаленных электроустановок и сетей, работающая в режиме единого времени. Целью создания системы явилось: определение точности расчета сопротивления тяговой сети; определение сопротивления тяговой подстанции и сопротивления внешней питающей сети; определение параметров РЛ и рельсовой петли (РП) при повышенных переходных сопротивлениях «рельс-земля».

Система состоит из отдельных синхронно работающих цифровых регистрирующих комплексов, имеющих особенности применения и конструктивные различия. Типовая структурная схема цифрового комплекса системы изображена на рисунке 4.

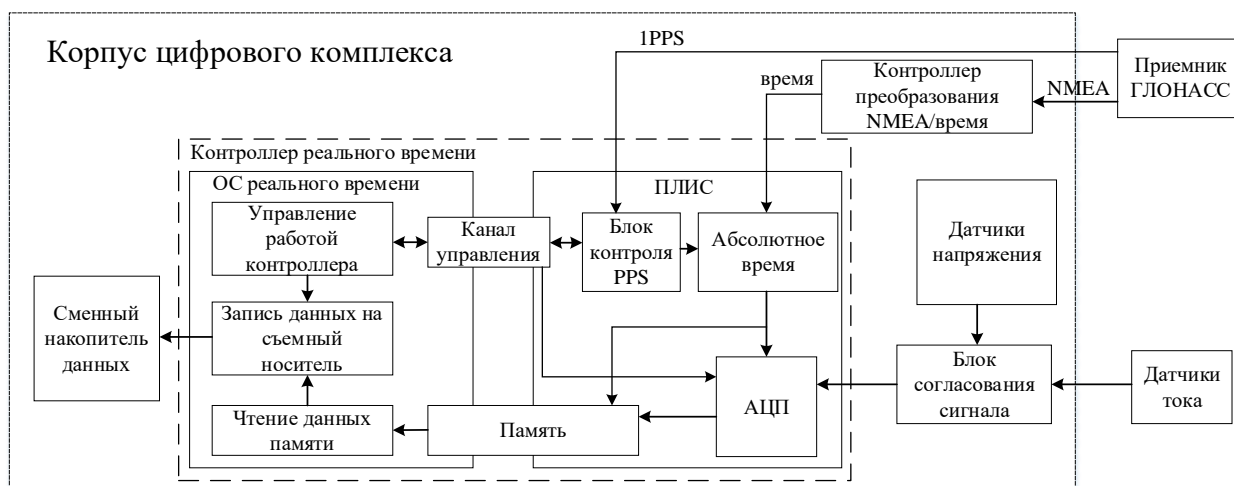


Рисунок 4 – Структурная схема мобильного цифрового комплекса

Устройства сконструированы в корпусе алюминиевых кейсов (рисунок 5).

Ход работ: создание цифровых исследовательских полигонов

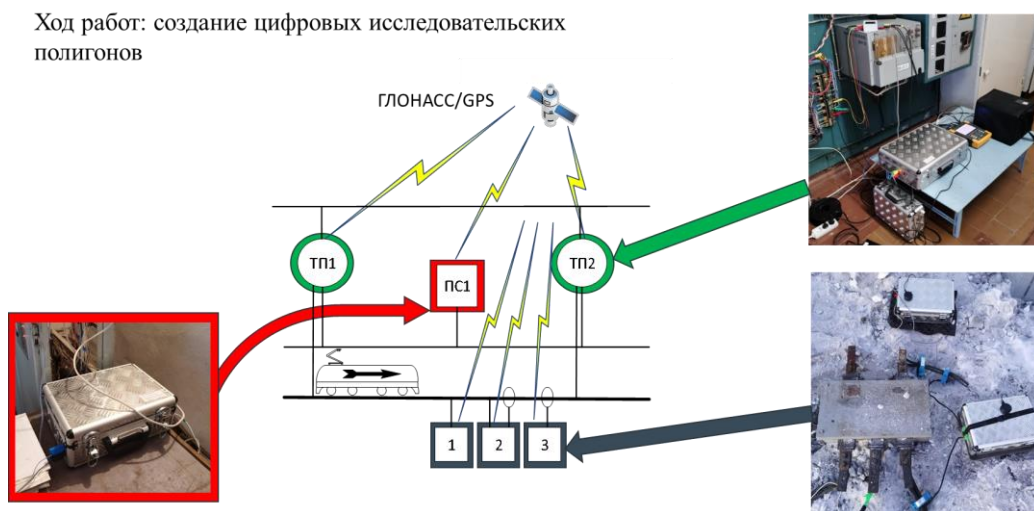


Рисунок 5 – Структурная схема размещения комплексов системы на полигоне

Каждое устройство содержит следующие элементы: выносные измерительные датчики тока, встроенные датчики напряжения, блок согласования сигналов, систему бесперебойного/автономного и сетевого питания, систему аналого-цифрового преобразования, систему программируемой логической интегральной схемы ПЛИС с функцией детерминированного управления работой АЦП, контроллер под управлением операционной системы (ОС) реального времени.

Масштабирование и преобразование величин регистрируемого сигнала для формата используемых переменных, а также присваивание временной метки регистрируемым значениям происходит в ПЛИС. Полученные значения записываются в блоки промежуточной памяти. Функции чтение потока данных из промежуточной памяти, их структурирование, архивирование и запись на сменный накопитель выполняется в контроллере под управлением ОС реального времени. Съём информации с цифрового комплекса и продление периода регистрации осуществляется заменой накопителя.

Для обеспечения работы регистраторов в режиме единого времени применяется два вида синхронизации: календарная и тактовая. Календарная синхронизация обеспечивает структурирование регистрируемых параметров при их сохранении в накопителе, параметр времени берется из структуры массива данных сигнала NMEA часов ГЛОНАСС-приемника. Тактовая синхронизация на основе сигнала 1PPS применяется для синхронизации и корректировки скорости наносекундных часов, работающих в структуре ПЛИС. Все цифровые комплексы снабжены системой индикации, позволяющей определять состояние работы устройства и статус работы спутниковой системы синхронизации.

Особенностями работы комплекса является продолжительная ее длительность (до 1500 часов), непрерывная регистрация процессов и режимов со скоростью 12800 изм./с, возможность применения и использования автономных комплексов при полевых измерениях. Комбинация характеристик отличает данную систему от других. Данные регистрации различных комплексов обрабатываются на сервере в одних осях координат, что позволяет производить совместные расчеты, как действующих значений величин, так комплексных и мгновенных значений регистрируемых данных. Система позволяет производить контроль протяженных энергообъектов, таких как параметры тяговых сетей и элементов РС. Комплексы установлены на тяговой подстанции (ТП) Розенгартовка, ТП Бикин, посту секционирования (ПС) Бойцово. Период регистрации и измерений составил 2 года. Автономные измерительные комплексы, в количестве от 3 до 5 штук, применялись для полевых испытаний, с продолжительностью совместной работы не менее 6 часов.

В разделе 3 рассмотрены мгновенные схемы работы системы тягового электропитания. Произведен расчет системы тягового электропитания в данных режимах согласно методике, предложенной в главе 1, произведено сравнение результатов расчета с результатами прямой регистрации параметров работы тягового электропитания, а также результатами расчета в программно-техническом комплексе «КОРТЭС».

В анализе результатов измерений в качестве опорного канала выбрана контролируемая фаза С шин 25 кВ ТП Розенгартовка. Все измерения контролируемых величин производились для основного интервала времени измерения 10 периодов (2560 значений каждой величины). Объединение интервалов не производилось. Расчет значений производился согласно ГОСТ 30804.4.30-2013. Схема проведения исследований приведена на рисунке 6.

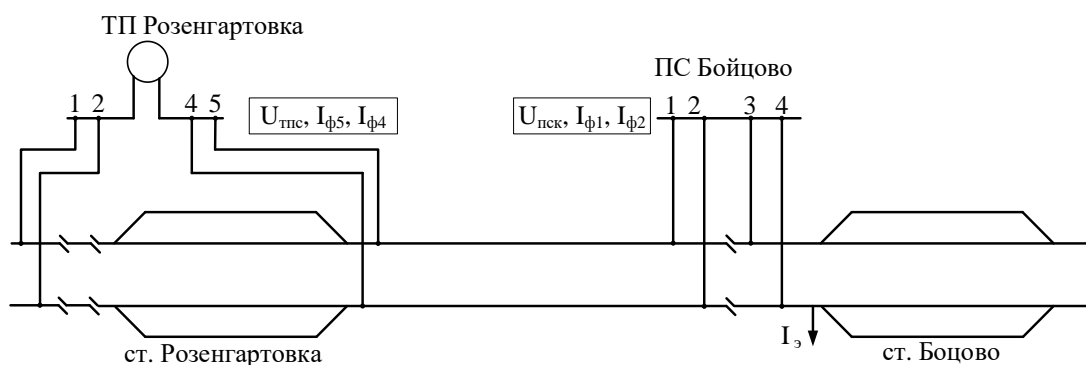


Рисунок 6 – Схема участка сбора данных

В качестве расчетного участка тяговой сети был рассмотрен участок ТП Розенгартовка – ПС Бойцово. Условиями выбора мгновенных схем были следующие: нормальная схема питания тяговой сети электроснабжения участка – узловая; отсутствие на расчетном участке электроподвижного состава (ЭПС) с находящимися в работе главными или вспомогательными двигателями; наличие ЭПС в режиме тяги или рекуперации на станции Бойцово или перегоне Бойцово – Бикин.

Для данных условий были выбраны 6 мгновенных схем.

Пример зарегистрированных значений рассматриваемого участка для одной из мгновенных схем приведен на рисунке 7.

Параметры ΔU_{TC} – значение потери напряжения в рассматриваемом участке тяговой сети для измеренного значения, расчета в системе «КОРТЭС» и расчета с применением математической модели, предложенной в разделе 1, сведены в таблицу 1. Параметры комплексного сопротивления участка тяговой сети Z_{TC} приведены в таблице 2 (расчетный комплекс «КОРТЭС» не позволяет вывести это значение). Параметры сходимости величины потери напряжения в ТС ΔU при максимальной зафиксированной нагрузке приведены в таблице 3.

Произведённые исследования показали высокую сходимость значений потерь напряжения в тяговой сети, и результатов расчета в программном комплексе «КОРТЭС».

Таблица 1 – Результаты расчетов потери напряжения в тяговой сети ΔU

№ п/п	ΔU_{TC} рас., В	ΔU_{TC} расч., В	ΔU_{TC} изм., В
1	940	947,976	953,44
2	1240	1218,03	1271,91
3	1510	1505,51	1516,53
4	660	675,74	738,81
5	680	685,02	731,47
6	1030	1040,58	1084,2

Таблица 2 – Параметры сходимости сопротивления тяговой сети

№ п/п	Z_{TC} рас., Ом	Z_{TC} расч., Ом	ΔZ , %
1	$6,04 e^{j75,58}$	$5,97 e^{j75,07}$	6,53
2	$6,11 e^{j74,02}$	$5,97 e^{j75,07}$	7,76
3	$6 e^{j74,85}$	$5,97 e^{j75,07}$	5,82
4	$6,46 e^{j74,61}$	$5,97 e^{j75,07}$	13,93
5	$6,46 e^{j75,63}$	$5,97 e^{j75,07}$	13,93
6	$6,08 e^{j74,04}$	$5,97 e^{j75,07}$	7,23

Таблица 3 – Параметры сходимости величины потери напряжения в ТС ΔU при максимальной зафиксированной нагрузке

Сходимость	1	2	3
1. «КОРТЭС»	-	99,42%	96,81%
2. Предложенная методика	99,42%	-	96,97%
3. Результаты измерений	96,81%	96,97%	-

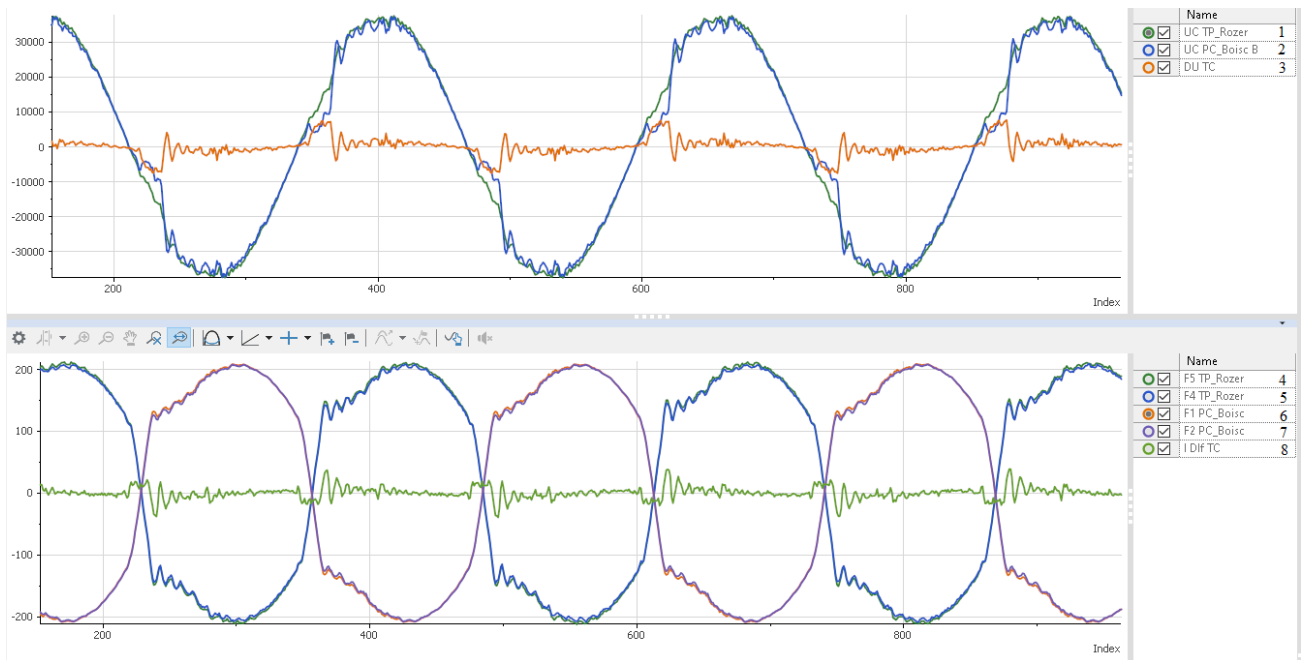


Рисунок 7 – Зарегистрированные значения напряжений и токов тяговой сети
 1 - напряжение шин 25 кВ ТП Розергантовка; 2 – напряжение шин ПС Бойцово; 3 – разница напряжений, приложенная к исследуемой тяговой сети; 4,5 – токи фидеров; 5,4 ТП Розергантовка; 6,7 – токи фидеров 1,2 ПС Бойцово; 8 – ток небаланса на участке тяговой сети

Незначительные различия результатов «КОРТЭС» и предложенного алгоритма объясняются значениями минимального шага задаваемых параметров и выводимых результатов программного комплекса. Результаты расчета сопротивления участка тяговой сети приведены на рисунке 8.

Расчеты показали, что значения $Z_{тс}$ и $X_{тс}$ во всех мгновенных схемах за исключением незначительных отклонений совпадают с результатами моделирования. На рисунке 8 приведена комплексная диаграмма значений сопротивлений тяговой сети и результатов расчета. При увеличении тока в тяговой сети и увеличении значения потерь напряжения разница измеренного и рассчитанного значения ΔZ участка составляет 5,82%. Полученные значения можно объяснить влиянием погрешности трансформаторов напряжения, к вторичным цепям которых были подключены датчики напряжения комплексов. Так при увеличении регистрируемого значения падения напряжения ΔU на участке тяговой сети влияние погрешности снижается.

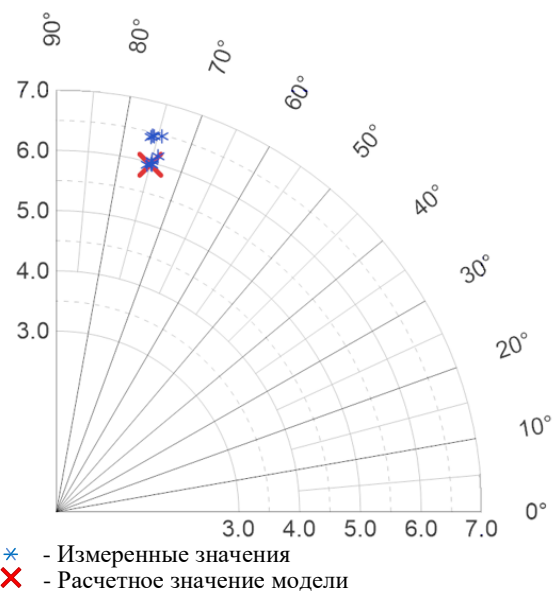


Рисунок 8 – Значения сопротивления тяговой сети рассматриваемого участка

Также в работе был разработан и предложен алгоритм контроля параметров внешней системы электроснабжения (СВЭ) в части определения её сопротивления и способов его измерения в условиях эксплуатации. Алгоритм работает на основе измеряемых значений токов и напряжений тяговой подстанции ввода 27,5 кВ и позволяет реализовать контроль параметра сопротивления $Z_{ТП}$ за интервал времени T . Расчет сопротивления $Z_{ТП}$ выполняется исходя из следующих предположений: существует эквивалентный генератор с симметричной трехфазной системой напряжения на его шинах, рассматриваемая подстанция является единственной нагрузкой данной энергосистемы, и потери напряжения в энергосистеме и тяговых трансформаторах обусловлены токами потребления шин 27.5 кВ данной подстанции.

Приведя напряжения в тяговой сети через оператора поворота \mathbf{a} к одной фазе (рисунок 9) и решив систему уравнений, были получены уравнения сопротивления тяговой подстанции $Z_{ТП}$ и напряжение ЭДС эквивалентного генератора $\dot{U}_{ген.А}$:

$$\underline{Z}_{ТП} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{пр.С}}{\dot{I}_{пр.С} - \dot{I}_A} = \frac{\dot{U}_{пр.С} - \dot{U}_{пр.В}}{\dot{I}_{пр.В} - \dot{I}_{пр.С}} = \frac{\dot{U}_{пр.В} - \dot{U}_A}{\dot{I}_A - \dot{I}_{пр.В}}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_{ген.А} = \frac{\dot{U}_A \cdot \dot{I}_{пр.С} - \dot{I}_A \cdot \dot{U}_{пр.С}}{\dot{I}_{пр.С} - \dot{I}_A} = \frac{\dot{U}_{пр.С} \cdot \dot{I}_{пр.В} - \dot{I}_{пр.С} \cdot \dot{U}_{пр.В}}{\dot{I}_{пр.В} - \dot{I}_{пр.С}} = \frac{\dot{U}_{пр.В} \cdot \dot{I}_A - \dot{I}_{пр.В} \cdot \dot{U}_A}{\dot{I}_A - \dot{I}_{пр.В}}. \quad (2)$$

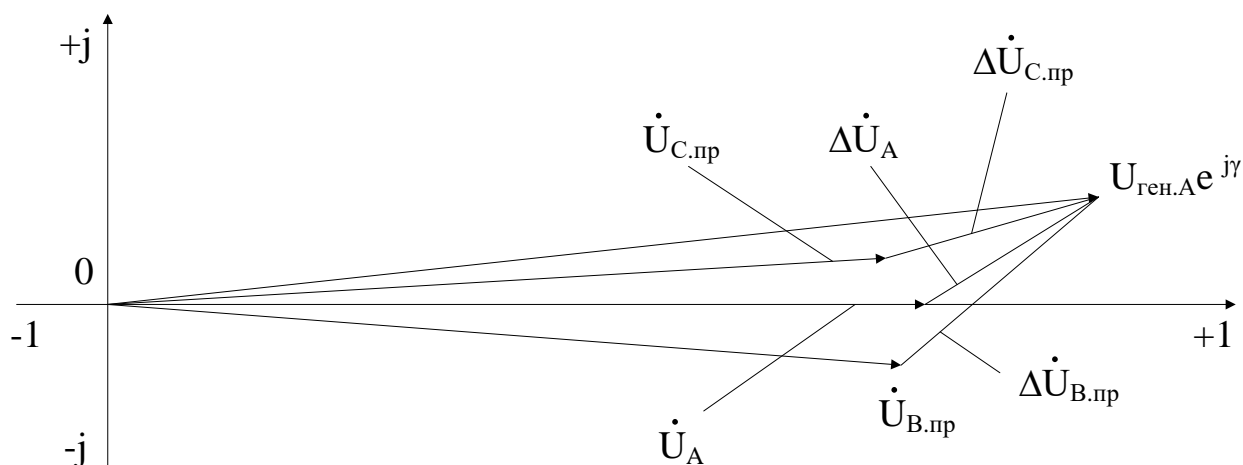


Рисунок 9 - Условная векторная диаграмма приведенных напряжений

Сопротивление энергосистемы при реализации расчета мгновенных схем является составляющей сопротивления тяговой подстанции: $Z_{ТП} = Z_c + Z_{тр}$. Так как первоначальные задаваемые условия не выполнимы, решение выдает значительные расхождения, и будет точнее в режиме наибольших нагрузок за исследуемый интервал времени. Для ее решения был разработан и опробован алгоритм контроля параметров внешней энергосистемы. Результаты расчетов сопротивления энергосистемы для ТП Бикин приведены на рисунках 10, 11. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 12.

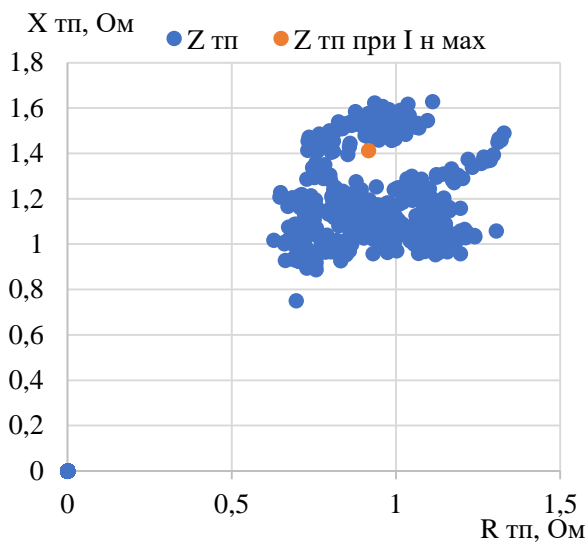


Рисунок 10 – Результаты расчета сопротивления ТП Бикин за интервал 6 часов

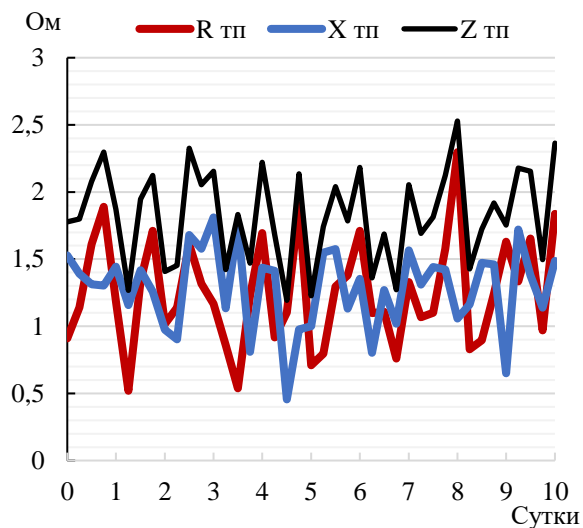


Рисунок 11 – Результаты расчета сопротивления ТП Бикин за интервал 10 суток

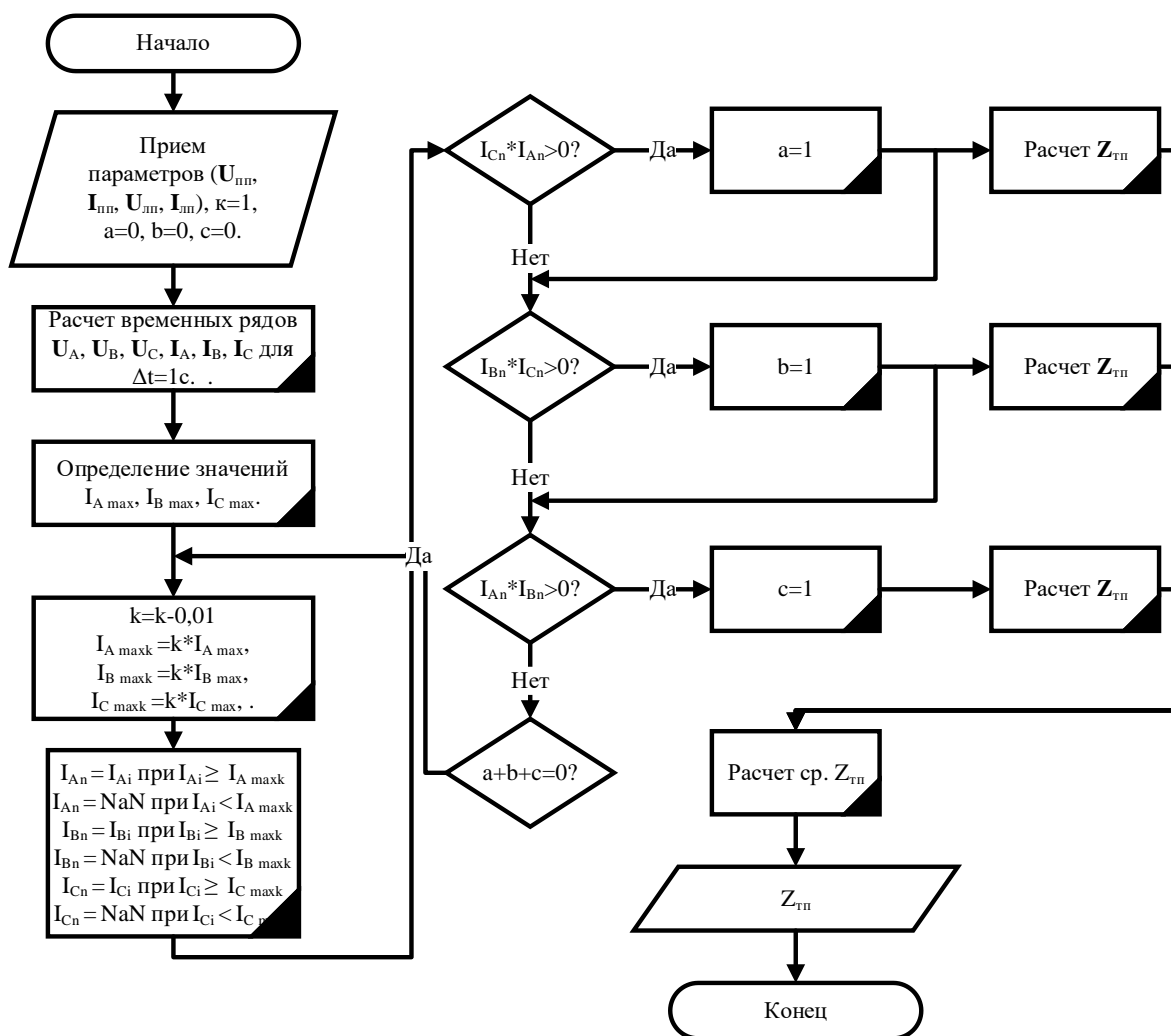


Рисунок 12 – Блок – алгоритм расчета сопротивления тяговой подстанции

В разделе 4 были проведены исследования работы обратной тяговой сети. Результаты исследований были использованы в НИР «Исследование физических процессов в системах тягового электроснабжения в нормальном, вынужденном и аварийных режимах их работы для разработки мероприятий для исключения влияния разности потенциалов между рельсом и землей при работе системы тягового электроснабжения на функционирование систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на участках железных дорог с повышенным сопротивлением балласта и (или) земляного полотна». Заказчик: АО «ВНИИЖТ». Договор №0.ЦЭТ.10.10013/22 от 22.02.2022 г. Так по результатам совместного имитационного моделирования рельсовой и контактной сети показано, что в зависимости от направления тока в контактной сети сопротивление РС на частоте 50Гц меняется в пределах 14,2%. Таким образом показано слабое влияние наведенной составляющей тока в рельсах при высоком переходном сопротивлении «рельс-земля». Наличие экранирующего провода снижает ток в рельсах не более чем на 32%, при этом сопротивление РЛ возрастает. Отмечено, что существующие математические модели слабо коррелируют с данными ранее проведенных инструментальных исследований в 2018 году на участке Розенгартовка – Бойцово ДВЖД, а значительную часть высоких потенциалов «рельс-земля» создает тяговая составляющая тока.

Для изучения причин возникновения повышенных потенциалов «рельс-земля», а также описания данного процесса и оценки его влияния на результаты расчетов мгновенных схем были проведены экспериментальные замеры. Для выполнения исследований при испытаниях были применены автономные цифровые комплексы в составе системы синхронных измерений. Типовая схема испытаний для участка РЛ для одного блок-участка приведена на рисунке 13. Измерения производились как при различных температурных условиях (от -5 до -20 С°), так и для различных участков, характерных повышенным количеством отказов устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Испытания производились при обращении весовых норм 6300, 7100, 12000 и 14000 т. без влияния на устройства РЦ и токораспределения в РС. Проводимость рельс-земля на исследуемых участках и в условиях проведения экспериментов была несущественной, что подтверждается отсутствием регистрации продольной асимметрии тока на участке исследуемой РЛ. Также отсутствовала поперечная асимметрия тягового тока. При этом на обоих участках фиксировалось мгновенное значение потенциала «рельс-земля» >1000 В.

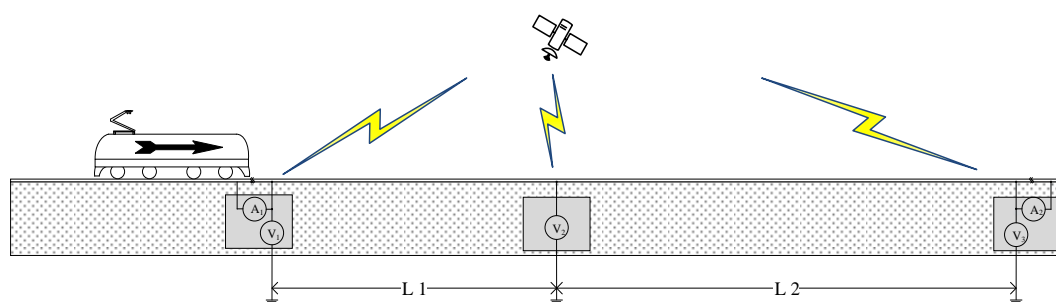


Рисунок 13 – Типовая схема проведения испытаний

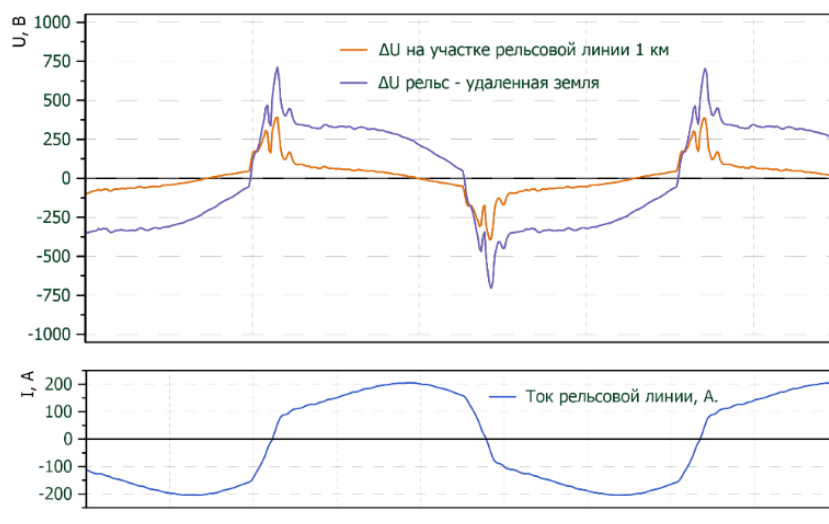


Рисунок 14 – Зависимость падения напряжения на участке РС, приведенной к 1 км, и напряжение «рельс-земля» от кривой тока в рельсовой линии

Полученные параметры позволили оценить влияние несинусоидальности и величины тока на процесс формирования потенциала «рельс-земля» на участке РС. В работе предлагается использовать входной параметр рельсового пути $Z_{p.BX}$ как поддающийся прямому измерению параметр опасности возникновения высоких потенциалов «рельс-земля»

$$Z_{p.BX} = \frac{U_{max}}{I} = \frac{U \cdot k_u}{I},$$

где k_u – коэффициент амплитуды напряжения.

График зависимости $Z_{p.BX} = f(U_{max})$ приведен на рисунке 15. Из графика видно, что среднее значение измеренного параметра $Z_{p.BX}$ соответствует случаям возникновения максимальных потенциалов «рельс-земля» U_{max} за периоды проведенных испытаний. График зависимости активного и индуктивного сопротивления рельса от протекающего тока $R_p = f(I)$ и $X_p = f(I)$ приведен на рисунке 16.

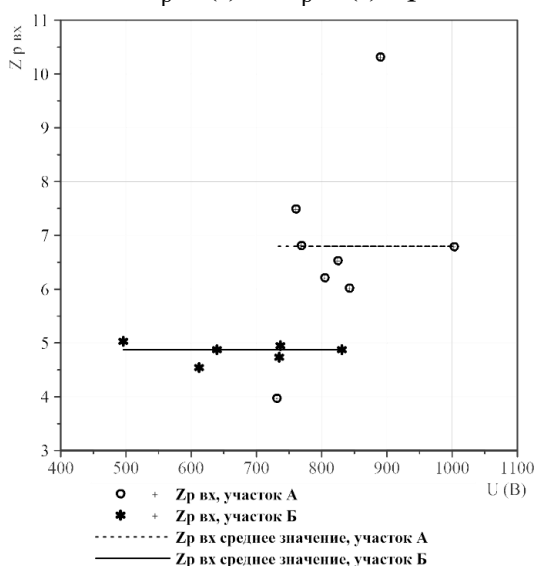


Рисунок 15 – Значения входного параметра $Z_{p.BX}$ от мгновенного значения потенциалов «рельс-земля» для участков А и Б

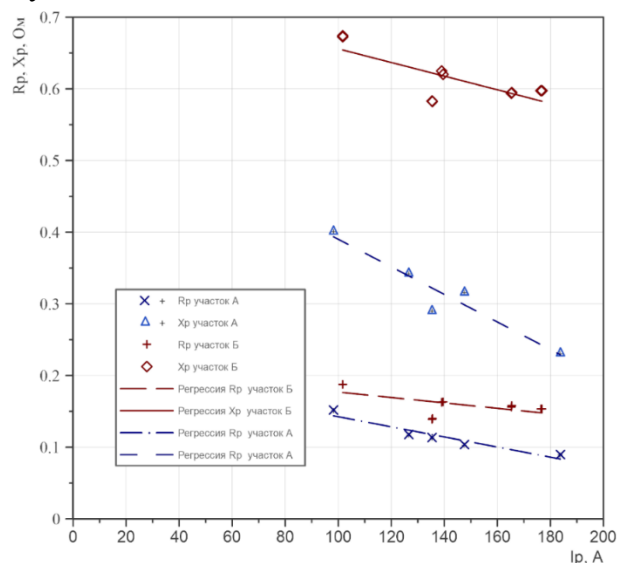


Рисунок 16 – График зависимости сопротивления 1 км РЛ для $f=50$ Гц от тока в РЛ

Сопротивления рельса двух участков значительно отличаются (в 1,5-2 раза). Активное и реактивное сопротивление рельсовой линии на частоте 50 Гц уменьшается при увеличении значения протекающего тока. Данный факт не коррелирует с общепринятым (теоретическим) характером изменения сопротивления рельса от тока.

В таблице 4 приведены усредненные за периоды замеров значения сопротивлений РЛ различным гармоникам для каждого участка, приведенные к длине 1 км.

Таблица 4 – сопротивление 1 км РЛ для гармоник тягового тока

№ гармоники	Участок А		Участок Б	
	R	X	R	X
1	0,115	0,316	0,16	0,614
3	0,265	0,848	0,4	1,468
5	0,65	1,49	0,546	2,164
7	0,622	1,885	0,671	2,974
9	0,973	2,194	0,787	3,647
11	1,959	3,027	1,058	3,858
13	2,835	3,668	1,443	4,709
15	2,943	2,721	2,311	4,985

Для оценки максимального уровня напряжения обратной РС относительно земли сформирована имитационная модель. Функцию напряжения на участке РС от тока можно задать уравнением:

$$U = A \cdot \frac{\partial I}{\partial t} + B \cdot I - C \int_0^t I dt, \text{ В,}$$

где А – индуктивность участка РЛ; В – активное сопротивление участка РЛ; С – емкость участка РЛ.

Сравнение результатов работы функции $U=f(I)$ и измеренные значения U на участке РЛ приведены на рисунке 17. На графике эффект шероховатости вызван влиянием погрешности измерений тока ввиду пределов разрядности АЦП и применяемых типов переменных (16 разрядов). Таким образом, участок РЛ можно представить последовательным RLC сопротивлением, параметры которого определяются вышеперечисленными коэффициентами. Переходное сопротивление «рельс-земля» формируется в виде проводимости активного сопротивления. Сам участок РЛ представляет четырехполюсник (рисунок 18).

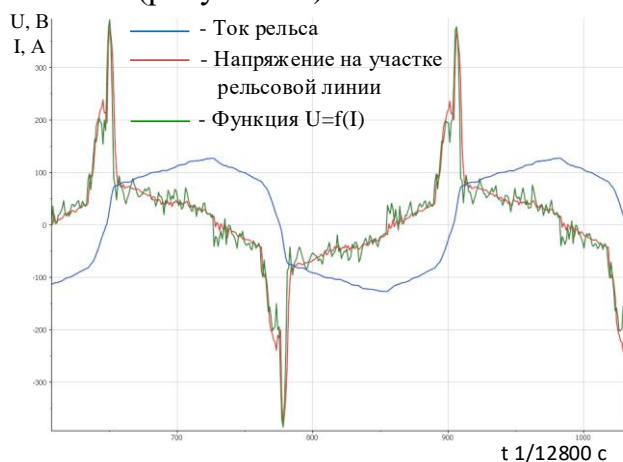


Рисунок 17. График $U=f(I)$ и измеренные значения U на участке РЛ

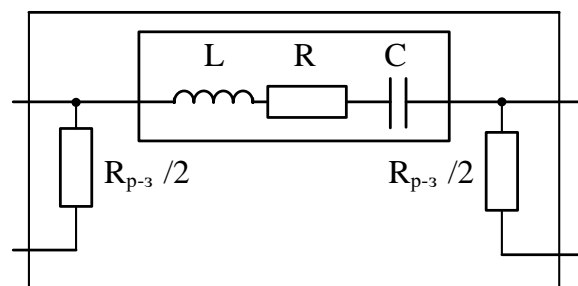


Рисунок 18 – Параметры четырехполюсника участка РЛ

Имитационное моделирование производилось в среде MATLAB SIMULINK. Для этого участок РС был разбит на отрезки длиной 100 м (рисунок 19). Данная схема позволяет как изменять проводимость «рельс-земля» отдельных элементов, так и формировать однопутные и многопутные участки, моделировать подключение схем заземления к элементам РС. Рельсовую сеть представляют в виде цепочки четырехполюсников.

ков, подключённых последовательно. В этом случае можно рассмотреть условия формирования максимального потенциала при различных, в том числе неравномерных значениях проводимости «рельс-земля», задаваемых параметрами сопротивления $R_{p-з}$, влиянии стационарных заземлителей и сопротивлений контуров тяговых подстанций.

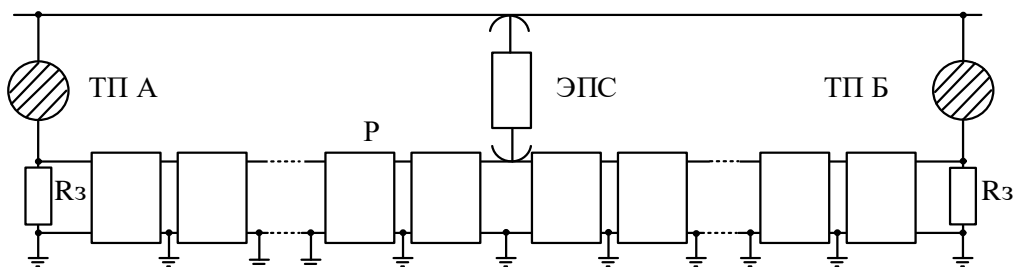


Рисунок 19 – Структурная схема модели участка РС,
 $R_з$ – сопротивление контура заземления ТП

Распределение действующих значений напряжений, а также максимальных потенциалов «рельс-земля» для различных значений удельной проводимости «рельс-земля» (C) на 1 км рельсовой сети представлено на рисунке 20. Протяженность участка составляет 50 км. Ток поезда, находящегося в его середине, составляет 625,08 А. Формы напряжения рельс-земля для места нахождения ЭПС приведены на рисунке 21.

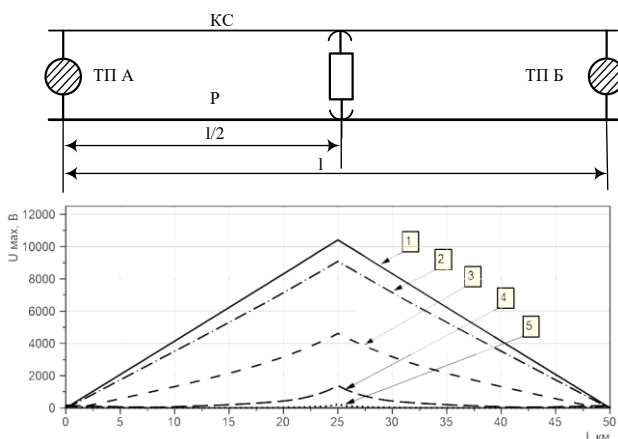


Рисунок 20 – Зависимость изменения максимального мгновенного значения потенциалов «рельс-земля» от расстояния (l) и значения проводимости «рельс-земля» для однопутного участка. Для проводимости «рельс-земля» для кривых 1,2,3,4,5 соответственно 0,00001; 0,0001; 0,001; 0,01 и 0,1 См/км

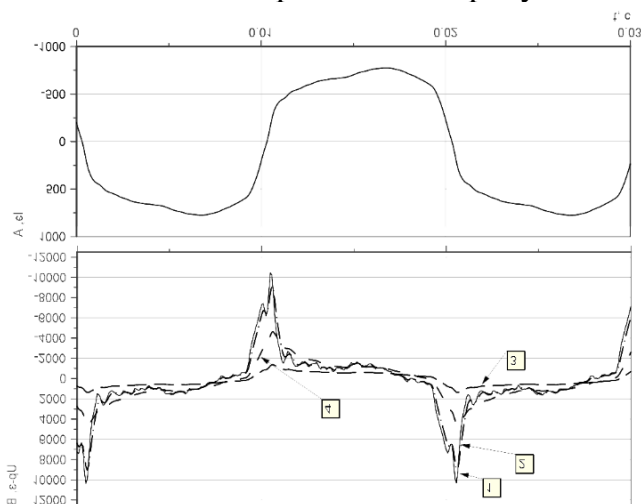


Рисунок 21 – Формы напряжения «рельс-земля» в точке нахождения ЭПС, для значения проводимости «рельс-земля» для кривых 1,2,3,4 соответственно 0,00001; 0,0001; 0,001 и 0,01 См/км

Разработанная имитационная модель позволяет производить моделирование возникновения потенциалов «рельс-земля» с учетом формы обратного тягового тока и параметров проводимости балласта. Произведено классифицирование мероприятий по снижению влияния тягового тока на работу устройств СЦБ и ЖАТ, где основным влияющим фактором является потенциал «рельс-земля». На основе приведенной модели

произведено численное моделирование эффективности основных мероприятий по снижению потенциалов «рельс-земля».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для целей проектирования, обслуживания и управления системой тягового электроснабжения необходимо производить анализ работы тяговых сетей на основании электрического расчета. Данные расчеты ложатся в основу работы специализированных программных комплексов. Модели, вошедшие в состав методики электрических расчетов, обладают рядом ограничений, и по ряду источников их параметры могут не совпадать на 5-10% при определении параметров сопротивления элементов, и до 17- 44 % при определении величин токов короткого замыкания и иных интегральных параметров. Для учета работы внешней системы электроснабжения разработаны приемы и методики, снижающие погрешность расчета. Однако ключевым фактором остается определение сопротивления энергосистемы на вводах ряда подстанций. РС является сложным элементом системы тягового электроснабжения. При расчете и моделировании параметров элементов РС, таких как РЛ и РП, важное значение имеет определение собственного и наведенного сопротивления в РС. Ввиду значительности и многообразия, влияющих на эти значения параметров, вопросы создания адекватной модели остаются актуальными. Особенно в области протекания тяговой составляющей тока в рельсах.

2. Разработан цифровой мобильный информационно-регистрационный комплекс, состоящий из автономных регистрирующих комплексов, работающих в режиме единого времени. Особенности работы комплекса является продолжительная длительность, непрерывная регистрация процессов и режимов, возможность применения и использования автономных комплексов. Данные, зарегистрированные различными комплексами, могут быть рассмотрены в одних координатных осях, что позволяет производить совместные расчеты как действующих значений величин, так и комплексных и мгновенных значений регистрируемых данных. Применение данной системы позволяет провести параметрическую идентификацию для следующих целей: определение точности расчета сопротивления тяговой сети; определение сопротивления тяговой подстанции и сопротивления внешней питающей сети; определение параметров РЛ и РС при повышенных переходных сопротивлениях «рельс-земля».

3. В работе был произведён параметрический анализ участка тяговой сети на основе данных, снятых разработанной системой синхронной регистрации параметров системы электроснабжения. На основе полученных измерений были выбраны режимы для определения характеристик участков, получены параметры потерь и падения напряжения, сопротивления участка электроснабжения. Для сравнения результатов измерений с данными программного комплекса «КОРТЭС» были смоделированы зарегистрированные режимы. Для получения значений падения напряжения и комплексного сопротивления участка тяговой сети были произведены расчёты режимов системы тягового электроснабжения с использованием имитационной модели, предложенной в разделе 1. В целях автоматизации проведения расчётов была разработана программа на ЭВМ. В результате были получены значения потерь, падения напряжения и значения сопротивлений тяговой сети. Сравнение результатов расчетов, измерений и имитационного моделирования показали высокую сходимость. Разница величин падения напряжения между результатами измерений и работой имитационной модели в «КОРТЭС» при максимальном регистрируемом токе была менее 4%, а между предло-

женной имитационной моделью и «КОРТЭС» – менее 1%. На основе полученных значений сделан вывод, что разработанная имитационная модель и разработанная на ее основе программа для ЭВМ обладают высокой достоверностью, что подтверждается высокими значениями сходимости потерь напряжения на участке. Также была показана практическая возможность производства прямых измерений параметров участка тяговой сети.

4. В разделе был предложен алгоритм и метод измерения сопротивления внешней энергосистемы на основе прямых измерений при помощи разработанного комплекса. Разработанный алгоритм и метод показали высокую сходимость как между измерением сопротивления на соседних тяговых подстанциях.

5. В работе представлены результаты прямого инструментального исследования параметров РС в условиях действующего участка тяговой сети. Полученные параметры позволяют оценить влияние несинусоидальности и величины тока на процесс формирования потенциала на участке РС. Синтезирована функция для четырехполюсника участка РС для частного случая расчета формы напряжения. Разработана имитационная модель в среде MATLAB Simulink, позволяющая производить моделирование потенциалов «рельс-земля» с учетом формы обратного тягового тока и параметров проводимости балласта. Модель основана на практических исследованиях процессов в обратных рельсовых сетях переменного тока 25 кВ. Произведено классифицирование мероприятий по снижению влияния тягового тока на работу устройств СЦБ и ЖАТ, где основным влияющим фактором является потенциал «рельс-земля».

Личный вклад соискателя. Первый раздел диссертации выполнен в соавторстве с Игнатенко И.В., с 85% долей участия соискателя. Второй раздел диссертации выполнен соискателем со 100% участием. Третий раздел диссертации выполнен в соавторстве с Игнатенко И.В. с 95% долей участия соискателя. Четвертый раздел диссертации выполнен в соавторстве с Игнатенко И.В. с 65% долей участия соискателя.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах и изданиях перечня ВАК Российской Федерации (по специальности)

1. Ли, В.Н. Информационные технологии в автоматизированной системе мониторинга инфраструктуры железной дороги / В.Н. Ли, П.С. Пинчуков, М.Ю. Кейно, **Е.Ю. Тряпкин** // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 3 (34). – С. 58-61.

2. Игнатенко, И. В. Разработка элементов программного обеспечения для совершенствования расчета системы тягового электроснабжения / И. В. Игнатенко, **Е. Ю. Тряпкин**, С. А. Власенко // Транспорт Урала. – 2021. – № 1(68). – С. 64-68.

3. **Тряпкин, Е.Ю.** Исследование причин возникновения повышенных потенциалов тяговой рельсовой сети переменного тока путем регистрации данных в режиме единого времени / **Е. Ю. Тряпкин**, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, Н. К. Шурова // Транспорт Урала. – 2023. – № 1(76). – С. 120-125. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-1-120-125.

Зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618905 Российская Федерация. Расчет потенциалов "рельс-земля" системы тягового электроснабжения переменного тока 25 КВ : № 2022618138 : заявл. 04.05.2022; опубл. 18.05.2022 / И. В. Игнатенко, В. А. Ковалев, С. А. Власенко, Е. Ю. Тряпкин;

заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Прочие наиболее значимые научные издания и материалы конференций

5. Investigation of the Conditions for the Occurrence of Rail-Ground Potentials on AC Railways / **E. Yu. Tryapkin**, I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko [et al.] // Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles : Conference proceedings, St.Petersburg, 08–10 февраля 2022 года. Vol. 510-2. – Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 893-902.

6. Algorithm for calculating the rail-ground potential in heavy load conditions / I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko, **E. Tryapkin**, V. Kovalev // E3s web of conferences : Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering (TPACEE-2021), Moscow, 28–30 апреля 2021 года. Vol. 284. – Moscow: EDP Sciences, 2021. – P. 06002.

7. Impact of Return Traction Current Harmonics on the Value of the Potential of the Rail Ground for the AC Power Supply System / I. Ignatenko, **E. Tryapkin**, S. Vlasenko [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1115. – P. 117-127. – DOI 10.1007/978-3-030-37916-2_13. – EDN XPRAHB.

8. Digital information exchange technologies at electric power facilities of the railway transport and its cost-benefit / A. N. Kobylitsky, I. V. Ignatenko, S. A. Vlasenko **E. Y. Tryapkin** and I A Rebrov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 8, Novosibirsk, 22–27 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2020. – P. 012185. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012185.

9. Synchronous phase measurements in the automated monitoring system of railway power supply facilities / **E. Y. Tryapkin**, M. Y. Keino, F. A. Protasov // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87, No. 2. – P. 110-112.

10. Игнатенко, И.В. Разработка методики расчета потенциала рельс-земля в условиях тяжеловесного движения / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **Е. Ю. Тряпкин**, В. А. Ковалев // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2022. – № 4. – С. 93-102.

11. Игнатенко, И. В. Совершенствование программного комплекса по расчету системы тягового электроснабжения переменного тока / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **Е. Ю. Тряпкин** // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2021. – № 4(29). – С. 68-71. – EDN DDASPL.

12. Тряпкин, Е. Ю. Система синхронизации времени для работы распределенной измерительной системы / **Е. Ю. Тряпкин**, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2021. – № 4(29). – С. 72 - 76.

13. **Тряпкин, Е. Ю.** Исследование влияния режима работы электроподвижного состава на потенциал в рельсовой цепи / **Е. Ю. Тряпкин**, Н. К. Шурова // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – № 4(25). – С. 74-78

14. Ковалев, В. А. Расчет потенциала "рельс-земля" системы тягового электроснабжения 25 кВ в среде PascalABC.net / В. А. Ковалев, **Е. Ю. Тряпкин**, И. В. Игнатенко // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 2(19). – С. 44-46.

Тряпкин Евгений Юрьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА СИНХРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 04.07.2024.
Уч.-печ. л. 1,4. Зак. 131. Тираж 100 экз.

Издательство ДВГУПС
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.