

На правах рукописи



РОЖКИН Борис Викторович

**МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ДРОССЕЛЬ-
ТРАНСФОРМАТОРОВ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С ИЗОЛИРУЮЩИМИ
СТЫКАМИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ВВОДЕ
ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ**

05.22.08 – Управление процессами перевозок (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
БУШУЕВ Сергей Валентинович

Официальные оппоненты:

МАНАКОВ Александр Демьянович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), центр компьютерных железнодорожных технологий (ЦКЖТ), старший научный сотрудник

ИСАЙЧЕВА Алевтина Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СамГУПС), кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»

Защита состоится «13» декабря 2019 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС) по адресу: 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, аудитория Б2-15 – зал диссертационных советов

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: <http://www.usurt.ru>

Автореферат разослан: «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день существенная доля протяженности маршрута следования тяжеловесного поезда проходит по участкам, электрифицированным по системе постоянного тока напряжением 3.3кВ, оборудованным рельсовыми цепями с изолирующими стыками и дроссель-трансформаторами. Цель организации тяжеловесного движения – повышение пропускной и провозной способности железнодорожных линий. Отказы элементов инфраструктурного комплекса железных дорог оказывают мешающее влияние в достижении поставленной цели.

Устойчивая работа рельсовых цепей напрямую зависит от исправного состояния рельсовой линии, включающей в себя рельсы, дроссель-трансформаторы, токопроводящие стыки и соединители. Повышение тяговых токов, вследствие возросшей массы грузового состава, негативно сказывается на тепловых режимах работы дроссель-трансформаторов и соединителей, что приводит к отказам рельсовых цепей, снижению технической скорости и пропускной способности участка.

Отказы рельсовых цепей по указанной причине это следствие несовершенства расчетных методов оценки нагрузки на элементы рельсовой линии при определении наличной пропускной способности и межпоездных интервалов. Поэтому требуется совершенствование расчетных методов оценки допустимых межпоездных интервалов по условию отсутствия ненормативного перегрева масла дроссель-трансформатора.

В расчет наличной пропускной способности участка заложено значение коэффициента готовности устройств автоматики равное 0,96 для участков с электротягой. Применяемые средства мониторинга не производят оценку текущей эксплуатационной готовности рельсовой цепи по условиям асимметрии обратного тягового тока, что не позволяет оперативно реагировать на снижение показателя готовности ниже нормативного значения. Поэтому требуется совершенствование математического обеспечения систем мониторинга, путем добавления алгоритмов

контроля готовности рельсовой цепи по асимметрии обратного тягового тока.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в развитие теории рельсовых цепей, исследования режимов их работы, внесли: А.М.Брылеев, И.В.Беляков, В.М.Лисенков, В.И.Бушуев, В.И.Шаманов, Ю.А.Кравцов, В.С.Аркатов, Б.М.Степенский и другие.

Значительный вклад в исследование тепловых режимов работы элементов рельсовой линии внесли: Н.Ф.Пенкин, А.А.Наумов, А.В.Наумов, А.В. Котельников, С.А.Лунев и другие.

Исследованием вопросов измерения, мониторинга и диагностирования устройств автоматики занимались И.Е.Дмитренко, Д.В.Дьяков, В.В.Сапожников, Вл.В.Сапожников, В.И.Бушуев, С.В.Бушуев, Е.М.Тарасов, Д.В.Железнов, А.Г.Исайчева и другие.

Целью диссертационной работы является разработка и научное обоснование методов обеспечения нормативных режимов работы дроссель-трансформаторов рельсовых цепей с изолирующими стыками в условиях обращения поездов повышенной массы и длинны.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- 1) Проанализировать методы расчета растекания обратного тягового тока в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов, существующие теоретические и экспериментальные исследования термической устойчивости дроссель-трансформаторов, методы синтеза систем мониторинга и диагностики железнодорожной автоматики;
- 2) Усовершенствовать методику расчета токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов;
- 3) Усовершенствовать методику теплового расчета дроссель-трансформатора;
- 4) Разработать метод определения интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом фактической температуры масла и значений протекающего обратного тягового тока;
- 5) Разработать метод определения достаточности симметрии рельсовой

линии для исключения отказов рельсовых цепей вследствие насыщения сердечника дроссель-трансформатора током асимметрии;

б) Усовершенствовать существующие средства мониторинга рельсовых цепей, дополнив их функционал контролем текущих режимов работы дроссель-трансформаторов.

Область исследования: системы автоматики и телемеханики, предназначенные для управления перевозочным процессом, методы их построения и испытания.

Объект исследования: рельсовая цепь с изолирующими стыками на участках с электротягой постоянного тока.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1) Разработана и апробирована конечно-элементная модель токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов, позволяющая определять мгновенные значения тока и потенциала рельс-земля в точках с заданными координатами;

2) Разработана и апробирована аналитическая модель теплового баланса дроссель-трансформатора при нестационарном теплообмене, дроссель-трансформатор представлен системой однородных тел: токовой обмотки, масла, сердечника и корпуса, учтен теплообмен между компонентами системы, все виды охлаждения и нагрева корпуса окружающей средой учтены отдельно;

3) Разработана регрессионная модель определения интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом токовой и тепловой нагрузки в условиях эксплуатации;

4) Разработана методика определения достаточности симметрии рельсовой линии для исключения отказов рельсовых цепей связанных с насыщением сердечника дроссель-трансформатора током асимметрии.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется результатами, полученными в ходе исследования:

Теоретическая значимость:

1) С помощью модели токораспределения, была исследована работа рель-

совой линии в аварийном режиме, при увеличении переходного сопротивления токопроводящего стыка с ослабленным прижатием накладок;

2) Модель теплового баланса дроссель-трансформатора позволила провести исследование тепловых режимов работы при различных условиях охлаждения и значениях протекающего тока.

Практическая значимость:

1) Определены условия зажигания электрической дуги при аварийном режиме работы рельсовой линии – обрыве стыкового соединителя токопроводящего стыка и ослабленном прижатии накладок;

2) На основе разработанного метода оценки интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом фактической нагрузки, был предложен диагностический параметр «обобщенный коэффициент нагрузки» дроссель-трансформатора и метод его расчета;

3) Разработанный метод оценки достаточности симметрии рельсовой линии, позволил сформировать диагностический параметр «коэффициент готовности дроссель-трансформатора по току асимметрии» и метод его численной оценки.

Методология и методы исследования. При разработке темы диссертации были использованы теории: электрических цепей, теплообмена, подобия тепловых процессов, планирования эксперимента, методы конечно-элементного моделирования, статистического и регрессионного анализа. Экспериментальная часть исследования включает: калибровку измерительных каналов напряжения и температуры, оценку их погрешностей, измерения обратного тягового тока, тока асимметрии и температуры масла дроссель-трансформатора, проведенные на действующем участке железной дороги, по которому происходит регулярное движение поездов повышенной массы и длины.

Положения, выносимые на защиту:

1) Конечно-элементная модель токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов позволяющая определять мгновенные значения тока и потенциала земля-рельс в точке с указанными координатами;

2) Аналитическая модель теплового расчета дроссель-трансформатора, позволяющая определять температуру перегрева масла над окружающей средой, обусловленную транзитом обратного тягового тока;

3) Модель определения интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом фактических режимов работы, позволяющая получить численное выражение эффективности принятых мер по реконструкции рельсовой линии;

4) Метод определения достаточности симметрии рельсовой линии для исключения ложной занятости рельсовой цепи из-за насыщения сердечника дроссель-трансформатора током асимметрии.

Степень достоверности результатов исследования. Оценка степени достоверности проводилась путем сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований. Расхождение результатов экспериментальных данных и теоретических расчетов мгновенных значений обратного тягового тока и температуры масла дроссель-трансформатора не превышает 12%. Разница в результатах объясняется ошибками измерений, упрощениями, принятыми в моделях и не полным совпадением исходных условий моделирования и экспериментальных исследований.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: III Международной научно-практической конференции «Инновации и исследования в транспортном комплексе» (Курган, 2015г.); Региональной научно-практической конференции «Полигонная технология вождения поездов весом 8-9 тысяч тонн на направлении Кузбасс – Северо-Запад» (Екатеринбург 2015г.); I Международной научно-практической конференции «Инновации в системах обеспечения движения поездов» (Самара, 2016г.); Международной научно-технической конференции, приуроченной к 60-ти летию УрГУПС «Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог» (Екатеринбург, 2016г.); Региональной научно-технической конференции «Транспорт Урала – 2018» (Екатеринбург, 2018г.); XII Международной конференции «Российские регионы в фокусе перемен» (Екатеринбург, 2018г.) и на заседаниях кафедр «Автоматика телемеханика и связь на ж.д. транспорте» УрГУПС и «Авто-

матика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в девяти научных изданиях, шесть из них в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для публикаций научных результатов диссертаций.

Структура и объем диссертации. Текст диссертации включает в себя введение, основную часть, состоящую из четырех глав, заключение, список литературы, включающий 124 наименования, и четыре приложения. Основная часть диссертации изложена на 139 страницах текста, содержит 46 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, представлена общая характеристика работы, приведены сведения об апробации результатов работы.

В первой главе рассмотрены особенности работы рельсовых цепей участков, электрифицированных на постоянном токе, в условиях обращения тяжеловесных поездов. Сделан вывод о необходимости дальнейшего исследования вопроса устойчивой работы рельсовых цепей, для сокращения потерь в поездной работе от отказов, обусловленных ненормативными режимами работы дроссель-трансформаторов.

Анализ, проведенный в области теплового воздействия обратного тягового тока на дроссель-трансформаторы, показал наличие упрощенных моделей, рассматривающих дроссель-трансформатор как однородное с тепловой точки зрения тело, отсутствие учета влияния магнитопровода и корпуса на тепловые процессы и использование константных коэффициентов теплопередачи. Также было отмечено, что теоретические и экспериментальные исследования, не согласуются между собой и теорией теплообмена.

Обзор опубликованных исследований растекания тока в рельсовой линии показал использование моделей на основе системы уравнений электрически

длинной линии с константными первичными параметрами. Такие модели не позволяют проводить корректный анализ токовой нагрузки элементов рельсовой линии в нормальном и аварийном режимах работы, когда линию некорректно считать однородной по условию решаемой задачи. Разработанная во ВНИИЖТе методика определения эффективных токов в обратной тяговой сети применяет обобщенные методы расчета, приводящие к ошибкам определения фактических тепловых режимов работы дроссель-трансформатора.

Современные системы мониторинга средств железнодорожной автоматики и телемеханики не производят непрерывный контроль тока асимметрии дроссель-трансформаторов. Следовательно, нет возможности непрерывного контроля готовности работы рельсовой цепи по данному параметру и оперативной реакции при его снижении ниже порога, заложенного в расчет наличной пропускной способности участка.

Вторая глава посвящена решению вопросов анализа токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов и совершенствованию теплового расчета дроссель-трансформатора.

Модель токораспределения в неоднородной рельсовой линии, в аналитическом виде описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений (1), решение которой в символьном виде затруднено в силу отсутствия общих методов решения и табличной формы задания зависимостей первичных параметров линии от координаты. Поэтому предложенная в работе модель производит дискретизацию уравнений линии по пространству и численно их решает с применением метода конечных элементов.

Модель токораспределения построена в программной среде *Comsol Multiphysics*, предназначенной для конечно-элементного моделирования мультифизических процессов. Конфигурация обратной тяговой сети представляет геометрию расчетной области и построена в натуральную величину в графическом редакторе программной среды. Система дифференциальных уравнений, описывающая взаимосвязь между токами и напряжениями длинной линии постоянного тока (1) решена относительно потенциала рельс-земля, что позволяет задать граничные

условия – равенство потенциалов рельса относительно земли в точках подключения дроссель-трансформаторов разных путей перегона к междупутной перемычке.

Существующий профиль участка в разработанной модели учитывается через данные тока электроподвижной единицы, получаемые с системы моделирования тягового электроснабжения «Кортес», разработки ВНИИЖТ. Исходными данными для моделирования токораспределения в рельсовой линии являются: токи электроподвижных единиц на участке с привязкой к ординате, путевые планы перегонов и ординаты подключения отсасывающих фидеров тяговых подстанций.

$$\begin{cases} \frac{du(x)}{dx} + r(x) \cdot i(x) = 0 \\ \frac{di(x)}{dx} + g(x) \cdot u(x) = 0 \end{cases} \Rightarrow -\frac{1}{r(x)} \cdot \frac{d^2u(x)}{dx^2} + g(x) \cdot u(x) = 0, \quad (1)$$

где $r(x)$ – удельное сопротивление рельсов, Ом/км;

$g(x)$ – удельная проводимость изоляции, Сим/км;

$u(x)$ – потенциал земля-рельс в точке с координатой x , В;

$i(x)$ – ток в рельсовой линии в точке с координатой x , А.

Верификация данной модели проводилась в два этапа: теоретический и экспериментальный. Теоретический этап включал в себя сравнение результатов моделирования с эталонной аналитической моделью, построенной для однородной рельсовой линии двухпутного перегона. Разработанная в диссертации модель при одинаковых исходных данных, показала результаты моделирования токораспределения идентичные эталонной аналитической модели. Экспериментальная проверка выполнена путем сравнения результатов моделирования участка Свердловской железной дороги с результатами прямых измерений обратного тягового тока, протекающего через дроссель-трансформатор, рисунок 1.

Зафиксировано совпадение результатов в 11%. Расхождения объясняются ошибками измерения обратного тягового тока во время шунтирования изолирующего стыка колесными парами, различными режимами ведения состава машиноистом и системой моделирования тягового энергоснабжения «Кортес».

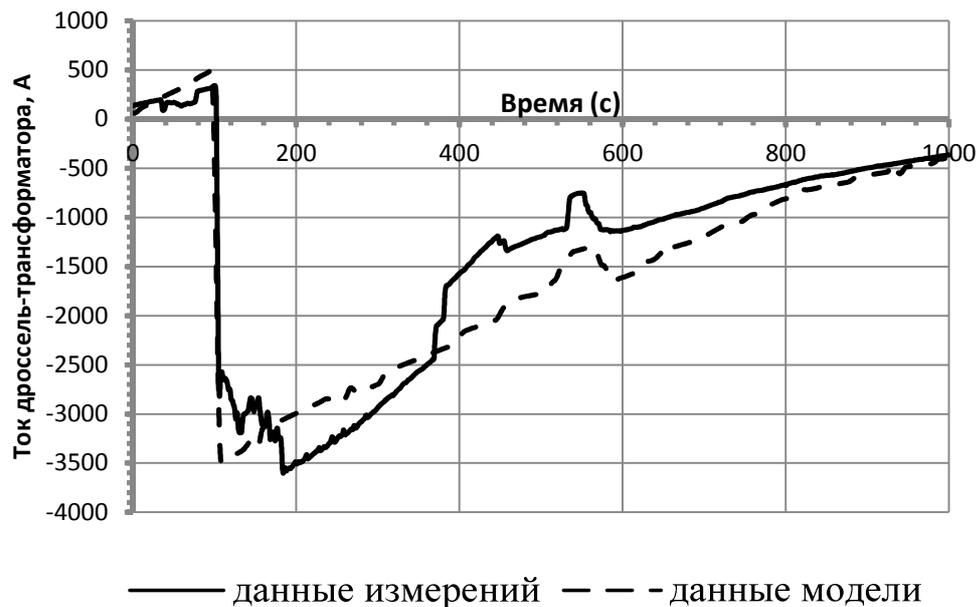


Рисунок 1 – Данные экспериментальной проверки разработанной модели токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов

Аналитическая модель теплового расчета дроссель-трансформатора должна учитывать внутренние теплообменные процессы и все виды охлаждения и нагрева корпуса. Поэтому дроссель-трансформатор был рассмотрен как система однородных с тепловой точки зрения тел: обмотки, сердечника, масла и корпуса и проанализированы процессы теплопередачи между компонентами системы и окружающей средой (2).

В разработанной модели анализируются ранее не учтенные факторы: процессы теплопередачи внутри дроссель-трансформатора; нагрев корпуса дроссель-трансформатора солнечной радиацией; теплоотдача с корпуса в окружающую среду учтена отдельно для конвективного теплопереноса, излучения и теплопроводности. Модель не учитывает нагрев масла сигнальным током, так как по технологии заправки дроссель-трансформатора маслом сигнальная обмотка не погружается в масло и не участвует в рассматриваемых процессах теплопередачи. Модель позволяет определять средние значения температур конструктивных элементов дроссель-трансформатора без учета неравномерности поля их температур. Данное допущение упростило вид уравнений системы (2), и внесло ошибку в определение длительности тепловых процессов. Так как цель синтеза данной мо-

дели – расчет достигаемых значений температур, то это упрощение не имеет критического значения.

$$\begin{cases} \frac{dT_0}{dt} c_0 m_0 = Q_0^{\text{Дж}} - Q_{0-М}^{\text{КОНВ}} \\ \frac{dT_M}{dt} c_M m_M = Q_{0-М}^{\text{КОНВ}} - Q_{М-К}^{\text{КОНВ}} - Q_{М-С}^{\text{КОНВ}} \\ \frac{dT_K}{dt} c_K m_K = Q_{М-К}^{\text{КОНВ}} + Q_{СЛ}^{\text{ИЗЛ}} - Q_{К-В}^{\text{КОНВ}} - Q_{К-В}^{\text{ИЗЛ}} - Q_{К-З}^{\text{КОНД}} \\ \frac{dT_C}{dt} c_C m_C = Q_{М-С}^{\text{КОНВ}} \end{cases} \quad (2)$$

где T_0, T_M, T_K, T_C – средние значения температур обмотки, масла, корпуса, сердечника соответственно, К;

c_0, c_M, c_K, c_C – удельные теплоемкости обмотки, масла, корпуса, сердечника соответственно, Дж/(кг·К);

m_0, m_M, m_K, m_C – массы обмотки, масла, корпуса, сердечника соответственно, кг;

$Q_0^{\text{Дж}}$ – мощность нагрева основной обмотки обратным тяговым током, Вт;

$Q_{0-М}^{\text{КОНВ}}$ – теплопередача тепловой мощности конвекцией от токовой обмотки к маслу, Вт;

$Q_{М-К}^{\text{КОНВ}}, Q_{М-С}^{\text{КОНВ}}$ – мощность конвективного теплопереноса между маслом корпусом и сердечником, Вт;

$Q_{К-В}^{\text{КОНВ}}, Q_{К-В}^{\text{ИЗЛ}}$ – мощность теплоотдачи с корпуса в окружающую среду конвекцией и излучением, Вт;

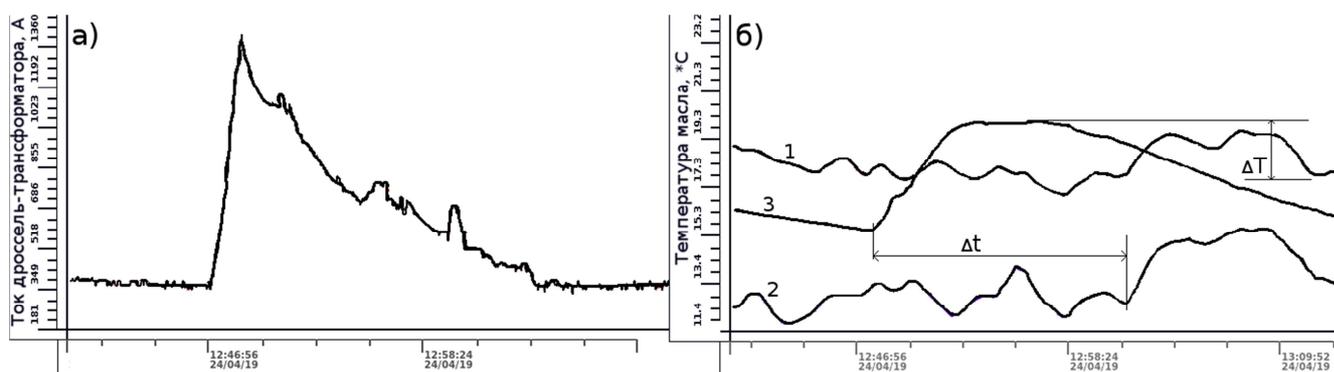
$Q_{К-З}^{\text{КОНД}}$ – мощность теплопередачи с корпуса в грунт, Вт;

$Q_{СЛ}^{\text{ИЗЛ}}$ – нагрев корпуса солнечной радиацией, Вт.

Каждое уравнение системы (2) представляет собой уравнение теплового баланса однородного тела, записанное относительно средней температуры и массы элемента. Коэффициенты теплоотдачи, были получены с использованием теории подобия тепловых процессов и представлены функциями разности абсолютных температур однородного тела и охлаждающей среды (температур перегрева).

Экспериментальная верификация модели проводилась путем сравнения

данных расчета средней температуры масла на основании измеренного значения обратного тягового тока дроссель-трансформатора, с данными измерений температуры верхнего и нижнего слоя масла, полученных с термопар погруженных в масло того же дроссель-трансформатора, рисунок 2. Источником обратного тягового тока служил электровоз 2ЭС10 проходящего состава массой 6176 тонн.



а) – график измеренных значений обратного тягового тока, протекающего через исследуемый дроссель-трансформатор, А; б) – графики измеренных и расчетной температуры масла, °С: графики 1,3 – измеренная температура верхних и нижних слоев масла, график 2 – средняя температура масла согласно модели, Δt – опережение начала изменения температуры масла в модели относительно данных эксперимента, ΔT – разница в средних температурах нагрева масла.

Рисунок 2 – Верификация модели теплового расчета дроссель-трансформатора

Средняя температура перегрева масла рассчитанная моделью на 2 °С (10%), превысила измеренную, что объясняется ошибкой настройки условий охлаждения в аналитической модели. Разница в началах нагрева масла Δt , объясняется отказом от учета неоднородности температурных полей в дроссель-трансформаторе.

В третьей главе диссертации производится разработка методов оценки характеристик надежности дроссель-трансформатора в условиях эксплуатации. Разработан метод определения интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом условий эксплуатации и метод определения достаточности симметрии рельсовой линии для исключения ложной занятости рельсовой цепи из-за насыщения сердечника дроссель-трансформатора током асимметрии.

Метод расчета интенсивности отказов дроссель-трансформатора в условиях эксплуатации, основан на учете текущих режимов функционирования устройства и их влияния на интенсивность отказов. В теории надежности для этих целей ис-

пользуется поправочный коэффициент к номинальной интенсивности отказов (4). Значение коэффициента для трансформаторов и дросселей приведены в справочной литературе в виде табличной формы. Это затрудняет его применение в аналитических моделях надежности, поэтому табличные значения были аппроксимированы методом регрессионного анализа (4).

$$\lambda_э = \hat{\alpha} \cdot \lambda_н$$

$$\hat{\alpha} = \begin{cases} -1.31 + 0.01 \cdot t + 2.42 \cdot k, & \text{при } t \cdot k < 30 \\ 0.0084 \cdot e^{0.048 \cdot t} e^{4.086 \cdot k}, & \text{при } t \cdot k \geq 30 \\ \hat{\alpha} = 0.1, & \text{при } \hat{\alpha} < 0.1 \end{cases} \quad (4)$$

$$k = \frac{I_\Phi}{I_н}$$

где $\lambda_э$ – интенсивность отказов в режиме эксплуатации, c^{-1} ;

$\lambda_н$ – интенсивность отказов в номинальном режиме, c^{-1} ;

$\hat{\alpha}$ – аппроксимированное значение поправочного коэффициента к интенсивности отказов;

t – средняя температура масла трансформатора, $^{\circ}C$;

k – коэффициент токовой нагрузки;

I_Φ – фактическое значение тока, А;

$I_н$ – фактическое значение тока, А.

Полученная модель проверена на адекватность и доказано, что остатки модели являются независимыми нормально распределенными случайными величинами с нулевым средним значением, имеют однородную дисперсию, средняя ошибка аппроксимации составила 9,84 %. Поправочный коэффициент к интенсивности отказов обобщенно учитывает влияние эксплуатационной нагрузки на надежность работы, и позволяет сравнить условия эксплуатации различных дроссель-трансформаторов.

Ложная занятость рельсовой цепи, обусловленная насыщением сердечника дроссель-трансформатора, является следствием недостаточной симметрии рельсовой линии при текущих значениях обратного тягового тока. Оценка текущего

уровня симметрии рельсовой линии в этом случае сводится к определению вероятности того факта, что ток асимметрии во всех дроссель-трансформаторах рельсовой цепи не превысит максимально допустимого значения, определенного конструкцией дроссель-трансформатора. Для определения искомой вероятности был разработан метод использующий элементы теории вероятности и управления рисками. Под термином «риск» понимается вероятность события. Такая трактовка термина допускается по ГОСТ Р 54505-2011, что позволило использовать устоявшуюся терминологию теории управления рисками и применить аналог матрицы рисков для получения численной оценки искомой вероятности. Исходными данными для расчета являются известные функции распределения обратного тягового тока и коэффициента асимметрии каждого дроссель-трансформатора рельсовой цепи, полученные по результатам статистических измерений.

Построение матрицы рисков требует выделения категорий риска, по степени критичности. Для решаемой задачи выделено 4 категории, на основе соотношения фактического, нормативного и конструктивного тока асимметрии, таблица 1. Процедура построения матрицы вероятностей (таблица 2) аналогична, построению матрицы рисков, с той лишь разницей, что уровни частот событий и тяжести последствий – заменены на уровни вероятностей тока и коэффициента асимметрии.

Таблица 1 – Категории риска

Категория риска	Описание категории
Недопустимый	Фактический ток асимметрии больше конструктивного значения данного типа дроссель-трансформатора.
Нежелательный	Фактический ток асимметрии находится в диапазоне от 0,9 до 1,0 от значений конструктивного тока асимметрии.
Допустимый	Фактический ток асимметрии больше нормативного значения, но менее 0,9 от значения конструктивного тока.
Незначительный	Фактический ток асимметрии меньше нормативного значения.

Для определения уровней вероятностей, множества значений тока и коэф-

коэффициента асимметрии разбиты на интервалы с равным шагом. Значения тока от I_0 до I_m , разбиты на m интервалов с шагом I_s , значения коэффициента асимметрии от k_0 до k_n , разбиты на n интервалов с шагом k_s . По известным функциям распределения, определяем вероятность попадания мгновенных значений тока $P_{I(m)}$ и коэффициента асимметрии $P_{k(n)}$ в полученные интервалы. Ячейки матрицы вероятностей заполнены обыкновенными дробями, где в числителе указано значение тока асимметрии, а в знаменателе – вероятность его появления, определенная как вероятность совместного события. Значение тока асимметрии позволяет определить категорию риска, к которой относиться каждая ячейка матрицы вероятностей.

Таблица 2 – Матрица вероятностей

Уровни вероятностей коэффициента асимметрии		Уровни вероятностей обратного тягового тока				
		$I_0 - I_1, A$	$I_1 - I_2, A$	$I_2 - I_3, A$		$I_{m-1} - I_m, A$
		$P_{I(1)}$	$P_{I(2)}$	$P_{I(3)}$		$P_{I(m)}$
$k_0 - k_1$	$P_{k(1)}$	$\frac{I_1 \cdot k_1}{P_{I(1)} \cdot P_{k(1)}}$	$\frac{I_2 \cdot k_1}{P_{I(2)} \cdot P_{k(1)}}$	$\frac{I_3 \cdot k_1}{P_{I(3)} \cdot P_{k(1)}}$		$\frac{I_m \cdot k_1}{P_{I(m)} \cdot P_{k(1)}}$
$k_1 - k_2$	$P_{k(2)}$	$\frac{I_1 \cdot k_2}{P_{I(1)} \cdot P_{k(2)}}$	$\frac{I_2 \cdot k_2}{P_{I(2)} \cdot P_{k(2)}}$	$\frac{I_3 \cdot k_2}{P_{I(3)} \cdot P_{k(2)}}$...	$\frac{I_m \cdot k_2}{P_{I(m)} \cdot P_{k(2)}}$
$k_2 - k_3$	$P_{k(3)}$	$\frac{I_1 \cdot k_3}{P_{I(1)} \cdot P_{k(3)}}$	$\frac{I_2 \cdot k_3}{P_{I(2)} \cdot P_{k(3)}}$	$\frac{I_3 \cdot k_3}{P_{I(3)} \cdot P_{k(3)}}$		$\frac{I_m \cdot k_3}{P_{I(m)} \cdot P_{k(3)}}$
$k_{n-1} - k_n$	$P_{k(n)}$	$\frac{I_1 \cdot k_n}{P_{I(1)} \cdot P_{k(n)}}$	$\frac{I_2 \cdot k_n}{P_{I(2)} \cdot P_{k(n)}}$	$\frac{I_3 \cdot k_n}{P_{I(3)} \cdot P_{k(n)}}$		$\frac{I_m \cdot k_n}{P_{I(m)} \cdot P_{k(n)}}$

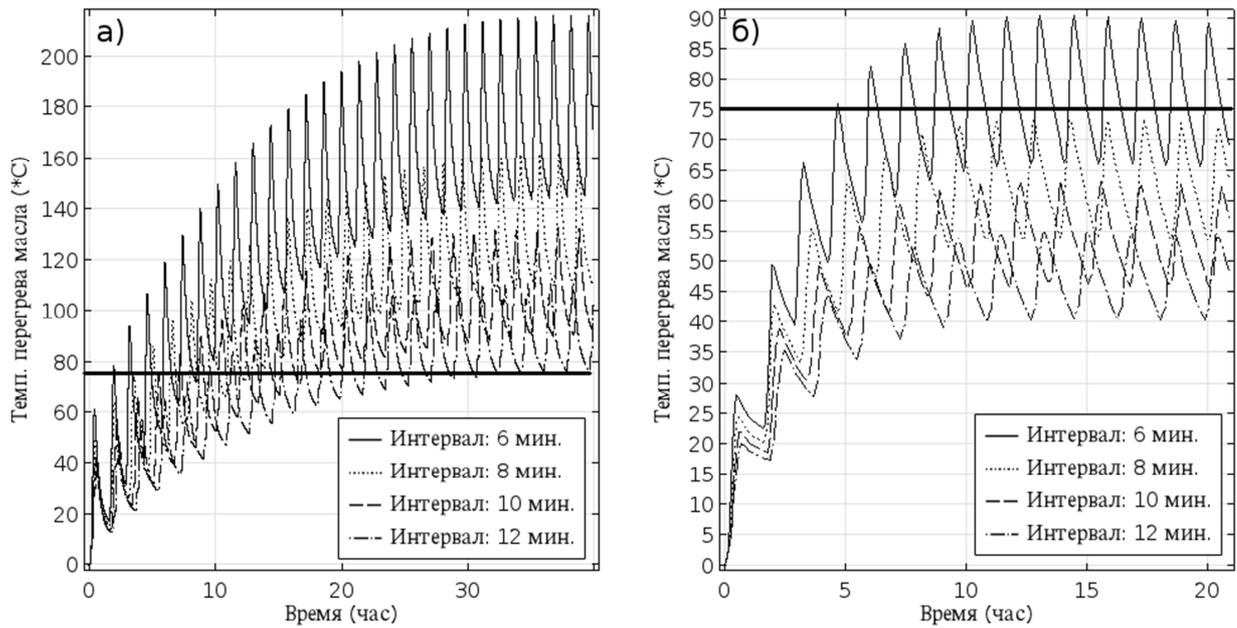
Численное значение вероятности не превышения током асимметрии конструктивного значения данного дроссель-трансформатора определяется как сумма знаменателей дробей в ячейках с незначительной и допустимой категорией риска. Полученное значение показывает вероятность того, что при текущих условиях эксплуатации данный дроссель-трансформатор не вызовет ложную занятость рельсовой цепи из-за насыщения сердечника, что соответствует определению коэффициента готовности, согласно ГОСТ 27.002-2015. Поэтому предложенный метод применяется для определения коэффициента готовности дроссель-трансформатора по асимметрии обратного тягового тока. Численная оценка до-

статочности симметрии рельсовой линии определяется как произведение коэффициентов готовности всех дроссель-трансформаторов рассматриваемой рельсовой цепи.

В четвертой главе рассматривается применение разработанных методов для подготовки участка железной дороги к обращению тяжеловесных поездов и совершенствование средств мониторинга.

Применение предложенных во второй главе моделей токораспределения и теплового расчета позволяет проверить выполнение тепловых режимов работы дроссель-трансформаторов участка по известному нормативному графику движения поездов. Определение средней температуры трансформаторного масла производится на основе мгновенных значений обратного тягового тока. Расчет тока производится с учетом существующего профиля пути и конфигурации обратной тяговой сети. Если фиксируется превышение максимальной температуры перегрева масла над окружающей средой, то требуется увеличение межпоездных интервалов или усиление дроссель-трансформатора. Применение среды моделирования *Comsol Multyphysics*, существенно снижает временную сложность моделирования и позволяет подобрать наиболее оптимальный вариант восстановления тепловых режимов дроссель-трансформатора. На рисунке 3 показано как измениться температура перегрева масла после усиления дроссель-трансформатора при сохранении графика движения поездов. Горизонтальная линия на рисунке 3, ограничивает максимально допустимый перегрев масла над окружающей средой указанный в нормативной документации, 75°C . Средняя температура масла была рассчитана из условия регулярного движения пакета из трех грузовых поездов массами 6.3-9.0-6.3 тыс. тонн с различными межпоездными интервалами.

Так как вначале моделирования температура дроссель-трансформатора равна температуре окружающей среды, определение установившейся температуры перегрева потребовало моделирования нескольких проходов пакета по участку, с интервалом между пакетами в 1 час, в течение которого осуществляется пропуск легких составов, тепловое воздействие от которых не учитывается в данном исследовании.



а – график температуры перегрева масла ДТ-0.6-1000 при различных межпоездных интервалах, б – график температуры перегрева масла ДТ-0.4-1500 при различных межпоездных интервалах;

Рисунок 3 – Влияние усиления дроссель-трансформатора на его тепловые режимы

Анализ графиков с рисунка 3.б позволяет сделать вывод, что замена дроссель-трансформатора ДТ-0.6-1000 на ДТ-0.4-1500 и межпоездной интервал 8 минут обеспечивают нормативный тепловой режим работы дроссель-трансформатора при рассмотренных размерах движения. Анализ влияния межпоездного интервала на температуру перегрева масла, приведенный в тексте работы показал, что увеличение межпоездного интервала до 18 минут, позволяет обеспечить нормативный тепловой режим без замены дроссель-трансформатора.

Предложенные в третьей главе и методы использованы для совершенствования системы мониторинга на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров (СТД-МПК). Перечень задач контроллера мониторинга сигнальной точки (КМСТ-МПК) был расширен измерением значений обратного тягового тока и тока асимметрии, а также расчетом предложенных в данной работе диагностических параметров дроссель-трансформатора. Прототип модернизированного КМСТ-МПК был испытан на Свердловской железной дороге на участках с различным

профилем пути, полученные численные значения параметров, позволяющих сравнить условия эксплуатации, приведены в таблице 3. По приведенным данным можно сделать вывод, что дроссель-трансформатор на участке со сложным профилем работает в более тяжелых тепловых режимах. Наблюдаются перегревы трансформаторного масла свыше нормативного значения ($75\text{ }^{\circ}\text{C}$), при этом среднее значение перегрева ниже нормативного значения. На участке со сложным профилем качество содержания рельсовой линии лучше, так как ниже среднее значение коэффициента асимметрии, но при этом коэффициент готовности дроссель-трансформатора на участке со спокойным профилем больше, вследствие меньших значений обратного тягового тока. Полученные значения коэффициентов готовности больше чем значение, заложенное в расчет наличной пропускной способности (0,96). Исходя из проведенного анализа режимы эксплуатации дроссель-трансформаторов следует признать, на текущий момент времени, номинальными. С выдачей рекомендации об усилении дроссель-трансформатора на участке со сложным профилем.

Таблица 3 – Сравнение условий эксплуатации дроссель-трансформаторов

Параметр	Дроссель-трансформатор на ...	
	участке со сложным профилем	участке со спокойным профилем
Максимальное значение обратного тягового тока	4246, А	1235, А
Среднее значение обратного тягового тока	1150, А	1002, А
Максимальное значение перегрева масла над окружающей средой	109, $^{\circ}\text{C}$	79, $^{\circ}\text{C}$
Средний перегрев масла над окружающей средой	70, $^{\circ}\text{C}$	20, $^{\circ}\text{C}$
Средней коэффициент асимметрии	1,59 %	2,51 %
Обобщенный коэффициент нагрузки дроссель-трансформатора	0,310	0,059
Коэффициент готовности дроссель-трансформатора по току асимметрии	0,9866	0,9999

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отказы систем автоматики вызывают задержки в движении поездов и снижают пропускную способность. Поэтому для достижения положительного эффекта от развития тяжеловесного движения необходимо исключить возможные отказы рельсовых цепей из-за увеличенного теплового и токового воздействия на их элементы.

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1) Анализ существующих методов оценки тепловой нагрузки на элементы рельсовых цепей позволил выявить перспективную концепцию их дальнейшего развития: синтез методов и средств контроля режимов работы дроссель-трансформатора при подготовке к вводу тяжеловесного движения, так и в условиях эксплуатации. На основе этой концепции был разработан метод расчета средней температуры масла дроссель-трансформатора по нормативному графику движения поездов с использованием мгновенных значений обратного тягового тока, и усовершенствованы средства мониторинга рельсовых цепей;

2) Разработана модель расчета токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов, позволяющая определять мгновенные значения тока и потенциала земля–рельс в любой точке. В результате анализа аварийного режима работы, при возрастании переходного сопротивления токопроводящего стыка, были определены условия зажигания электрической дуги. Показано, что при нормативном сопротивлении изоляции (1 Ом/км), переходном сопротивлении стыка 0,1 Ом и обратном тяговом токе в 1800 А, создаются условия для зажигания электрической дуги в обход стыка.

3) Создана аналитическая модель теплового расчета дроссель-трансформатора, позволяющая определять средние значения температур элементов конструкции. Модель учитывает все способы охлаждения корпуса (кондукцией, конвекцией, излучением), нагрев корпуса солнечной радиацией и теплообменные процессы между конструктивными элементами дроссель-трансформатора. Применение разработанной модели позволило определить установившиеся тем-

пературы перегрева масла над окружающей средой при длительном протекании токов различной величины.

4) Разработан метод численной оценки интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом условий эксплуатации, позволяющий сравнить нагрузку на различные дроссель-трансформаторы участка;

5) Разработан метод определения достаточности симметрии рельсовой линии для исключения ложной занятости рельсовой цепи при текущих значениях обратного тягового тока и коэффициента асимметрии, обусловленных существующими размерами движения и качеством содержания пути;

6) На основании разработанных методов была усовершенствована система мониторинга на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров (СТД-МПК) – добавлен контроль режимов работы дроссель-трансформаторов.

Основные научные и практические результаты изложены в следующих публикациях

а) в журналах из перечня ВАК:

1) Рожкин, Б.В. Оценка готовности устройств автоматики к пропуску тяжеловесных поездов [Текст] / Б.В.Рожкин //Транспорт Урала — Екатеринбург: УрГУПС, 2016. — №1(48). — С. 61-65.

2) Рожкин, Б.В. Учет влияния условий эксплуатации на параметры надежности обратной тяговой сети [Текст] / Б.В.Рожкин //Транспорт Урала. — Екатеринбург: УрГУПС, 2016. — №2(49). — С. 87-92.

3) Рожкин, Б.В. Расчет нагрева дроссель-трансформатора при обращении поездов повышенной массы и длины [Текст] / А.В.Паранин, Б.В.Рожкин // Транспорт Урала. — Екатеринбург: УрГУПС, 2016. — №4(51). — С. 47–51.

4) Рожкин, Б.В. Возможности и применение системы технического диагностирования и удаленного мониторинга на базе микроЭВМ и программируемых контроллеров СТД-МПК [Текст] / С.В.Бушуев, К.В.Гундырев, Б.В.Рожкин //Автоматика на транспорте. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2016. — №4.Том 2 — С. 513–529.

5) Рожкин, Б.В. Анализ условий работы рельсовой линии на основе моде-

лирования растекания обратного тягового тока [Текст] / Б.В.Рожкин, А.В.Паранин // Транспорт Урала. — Екатеринбург: УрГУПС, 2018. — №4(59). — С. 28–34

6) Рожкин, Б.В. Теплофизический расчет дроссель-трансформатора [Текст] / Б.В.Рожкин С.В.Бушуев // Вестник транспорта Поволжья. — Самара: СамГУПС, 2018. — №6. — С.45-53.

б) в других изданиях

7) Рожкин, Б.В. Оценка влияния реконструкции на параметры надежности обратной тяговой сети [Текст] / Б.В.Рожкин //Иновационный транспорт. — Екатеринбург: УрГУПС, 2016. — №1(19). — С. 37-42.

8) Рожкин, Б.В. Измеритель значений тягового тока и его асимметрии в обратной тяговой сети [Текст] / Б.В.Рожкин //Иновационный транспорт. — Екатеринбург: УрГУПС, 2013. — №4(10). — С. 59-64

9) Рожкин, Б.В. Проблемы точности измерения асимметрии тягового тока в автоматическом режиме [Текст] / Б.В.Рожкин //Иновационный транспорт. — Екатеринбург: УрГУПС, 2017. — №1. — С. 43-47.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Статьи [1,2,7,8,9] подготовлены единолично. Личный вклад в работах, опубликованных в соавторстве заключается в следующем: [3] – определены средние значения перегрева обмотки над маслом и масла над окружающей средой, [4] – разработан алгоритм самодиагностики подсистемы ввода дискретных данных в резервированной информационной системе, [5] – проведены исследования работы рельсовой линии в нормальном и аварийном режимах, [6] – предложен способ моделирования, определены выражения для расчета коэффициентов теплопередачи.

РОЖКИН Борис Викторович

**МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ДРОССЕЛЬ-
ТРАНСФОРМАТОРОВ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С ИЗОЛИРУЮЩИМИ
СТЫКАМИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИ ВВОДЕ
ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ДВИЖЕНИЯ**

**05.22.08 – Управление процессами перевозок
(технические науки)**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «27» сентября 2019

Формат 60x84/16

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,4

Заказ № 48