

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

*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)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
кандидат технических наук,  
доцент Бушуев С.В.

Екатеринбург – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
<b>1 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОБРАТНОГО ТЯГОВОГО ТОКА НА ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Особенности работы рельсовых цепей на электрифицированных участках	11
1.2 Анализ исследований теплового воздействия обратного тягового тока на дроссель-трансформаторы.....	15
1.3 Анализ исследований растекания обратного тягового тока в рельсовой линии .....	21
1.4 Анализ способов контроля асимметрии обратного тягового тока .....	30
1.5 Анализ методов построения систем мониторинга и формирования диагностических параметров .....	31
Выводы и постановка задачи исследования.....	33
<b>2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ДРОССЕЛЬ-ТРАНСФОРМАТОРА.....</b>	<b>35</b>
2.1 Разработка модели токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов .....	35
2.2 Разработка модели теплового расчета дроссель-трансформатора при нестационарном теплообмене.....	44
Выводы .....	62
<b>3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСОВАНИЯ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ.....</b>	<b>63</b>
3.1 Формирование списка диагностических параметров рельсовой линии.....	63
3.2 Определение интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом токовой и тепловой нагрузки .....	66
3.3 Определение достаточности уровня симметрии рельсовой линии для исключения отказов «ложная занятость» при движении тяжеловесных поездов.....	77
Выводы .....	82
<b>4 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ УЧАСТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ .....</b>	<b>83</b>
4.1 Оптимизация режимов работы рельсовой линии по графику движения поездов.....	83
4.2 Развитие средств мониторинга рельсовой линии .....	93

4.3 Экспериментальные исследования на участках обращения поездов повышенной массы и длины .....	100
Выводы .....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	137

## ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт является стратегическим ресурсом Российской Федерации, обеспечивающим основной объем перевозок экспортных и транзитных грузов. Период спада объема перевозок и заморозки проектов развития инфраструктуры в 90-х годах XX столетия, сменился периодом устойчивого роста в начале нового столетия. К концу первого десятилетия XXI века сформировались новые транспортные коридоры, обеспечивающие основной объем грузоперевозок. Перераспределение транспортных потоков привело к быстрому исчерпанию пропускной способности. По данным на 2008 год на 30% участков железных дорог или 8.3 тыс. км, была зафиксирована нехватка пропускной способности. Тем не менее, эти участки обеспечивали до 80% от всего объема грузоперевозок магистрального транспорта, благодаря изменению схем организации движения – появлению сдвоенных поездов и увеличению осевой нагрузки.

В стратегии научно-технического развития железнодорожного транспорта России [1], увеличение весовой нормы поезда приводится как основное направление ликвидации нехватки пропускной способности. Проведенный в стратегии анализ показал, что необходимо ускоренное обновление основных фондов с одновременным преодолением технического и технологического отставания от мирового уровня по объемам перевозимых грузов. Немаловажная роль в интенсификации процесса перевозок отводится средствам мониторинга, также отмечается важность повышения эксплуатационной надежности элементов инфраструктуры на основе новых методов диагностирования.

Продвижение поездопотока, в том числе, обеспечивают системы тягового электроснабжения и железнодорожной автоматики. Системы автоматики обеспечивают безопасность перевозочного процесса, а тягового электроснабжения осуществляют подвод электрической энергии к тяговому подвижному составу. Указанные системы используют один и тот же элемент инфраструктурного комплекса железных дорог – рельсовую линию:

- система тягового электроснабжения использует рельсовую линию как обратный проводник схемы электропитания электроподвижного состава;
- системы железнодорожной автоматики – для электропитания путевого приемника рельсовых цепей и как канал передачи телемеханической информации.

**Актуальность темы исследования.** Увеличение массы состава приводит к повышению тяговых усилий и увеличению значений токов в прямом и обратном проводниках системы электроснабжения. Возрастание значений обратного тягового тока обуславливает увеличенную тепловую нагрузку на элементы рельсовой цепи: дроссель-трансформаторы и соединители.

На этапе расчета наличной пропускной способности и допустимых межпоездных интервалов [2], рассчитываются коэффициенты использования нагрузочной способности элементов инфраструктуры и сравниваются с нормированными значениями (0.96 для двухпутных перегонов с электротягой). Лимитирующим элементом инфраструктуры признается тот элемент, у которого значение коэффициента использования больше нормированного значения. В расчет коэффициентов использования не включены дроссель-трансформаторы и соединители. Согласно инструкции [2], для них предусмотрена качественная оценка допустимости межпоездных интервалов попутного следования, определенных по условию снижения ненормативной нагрузки на лимитирующий элемент. Качественное оценивание производится на основании методики расчета эффективных токов в рельсовой линии [3]. Методика [3] дает приближенные оценки, основываясь на усредненных значениях уклона профиля пути и эффективных значениях обратного тягового тока, и не учитывает временную инерционность тепловых процессов.

Лимитирующими элементами системы тягового электроснабжения признается контактная сеть и/или оборудование тяговых подстанций. Указанные элементы проходят плановое усиление и модернизацию в ходе различных инвестиционных программ. Отсутствие точных оценок нагрузки на элементы рельсовой линии, при использовании приближенных методов анализа, не позволяет оценить готовность устройств автоматики с учетом измененных условий работы при движении поездов повышенной массы. Поэтому системная работа по усилению эле-

ментов рельсовой линии (дроссель-трансформаторов и соединителей) не проводится, что в будущем приведет к росту отказов рельсовых цепей из-за теплового разрушения элементов рельсовой линии. Чтобы избежать нарушения графика движения поездов, из-за отказов рельсовых цепей при вводе тяжеловесного движением, необходимо совершенствовать методы эксплуатации.

Одним из направлений совершенствования методов эксплуатации рельсовых цепей является переход к учету мгновенных значений обратного тягового тока и его теплового воздействия на дроссель-трансформатор с учетом временных параметров протекающих тепловых процессов.

Другим направлением, согласно стратегии [1], должно стать дальнейшее развитие средств мониторинга. Поэтому, необходима разработка диагностических параметров, отражающих текущее состояние рельсовой линии, способы расчета, а также методы и средства их автоматического контроля в условиях эксплуатации.

**Степень разработанности темы исследования.** Большой вклад в развитие теории рельсовых цепей, теоретические и экспериментальные исследования асимметрии тягового тока и ее влияния на устойчивость работы рельсовых цепей внесли: А.М.Брылеев, И.В.Беляков, В.М.Лисенков, В.И.Бушуев, В.И.Шаманов, Ю.А.Кравцов и другие.

Значительный вклад в исследование и расчет тепловых режимов работы трансформаторов, дросселей и дроссель-трансформаторов внесли: Н.Ф.Пенкин, В.В.Боднар, Л.Киш, П.М.Тихомиров, А.А.Наумов, А.В.Наумов, А.В. Котельников.

Исследованием эксплуатационной надежности устройств СЦБ занимались такие ученые как: А.И.Королев, В.И.Шаманов, Е.Н.Розенберг, Д.В.Гавзов, Р.Ш.Ягудин, В.А.Гапанович и другие.

Исследованием вопросов измерения, мониторинга и диагностирования устройств СЦБ занимались: И.Е.Дмитренко, Д.В.Дьяков, В.В.Сапожников, Вл.В.Сапожников, В.И.Бушуев, С.В.Бушуев и другие.

**Целью диссертационной работы** является разработка и научное обоснование методов обеспечения нормативных режимов работы дроссель-

трансформаторов рельсовых цепей в условиях регулярного 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 тепловых режимов работы и значений протекающего обратного тягового тока;

5) Разработать метод определения достаточности текущего уровня симметрии рельсовой линии для исключения отказов рельсовых цепей вследствие ненормативных значений тока асимметрии;

6) Усовершенствовать существующие средства мониторинга рельсовых цепей, дополнив их функционал средствами и методами контроля текущих режимов работы рельсовой линии.

**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 одномерная конечно–элементная модель токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов, позволяющая определять мгновенные значения тока и потенциала рельс–земля в точке с задан-

ными координатами;

2) Разработана аналитическая модель теплового баланса дроссель-трансформатора при нестационарном теплообмене. Дроссель-трансформатор представлен системой 4-х однородных тел: обмотка, масло, сердечник и корпус, учтен теплообмен между компонентами системы и все виды охлаждения корпуса: конвекцией, теплопередачей и излучением, а также нагрев корпуса солнечной радиацией;

3) Разработана методика определения текущего уровня симметрии рельсовой линии и оценки его достаточности для исключения отказов рельсовых цепей связанных с насыщением сердечника дроссель-трансформатора током асимметрии;

4) Разработана регрессионная модель определения интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом фактической токовой и тепловой нагрузки.

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

**Теоретическая значимость:**

1) С помощью имитационной модели токораспределения, была исследована работа рельсовой линии в аварийном режиме: при увеличении переходного сопротивления токопроводящего стыка, при обрыве приварного соединителя;

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

**Практическая значимость:**

1) Определены условия зажигания и поддержки горения дуги при аварийном режиме работы рельсовой линии – обрыве стыкового соединителя в ослабленном токопроводящем стыке;

2) Разработанный метод оценки достаточности симметрии рельсовой линии, позволил сформировать диагностический параметр «коэффициент готовности по асимметрии» обратного тягового тока и метод его численной оценки;

3) На основе разработанного метода оценки интенсивности отказов с уче-



том фактической нагрузки, был предложен диагностический параметр «обобщенный коэффициент нагрузки» дроссель-трансформатора и метод его расчета.

**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 длинны.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Конечно-элементная модель токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов позволяющая определять мгновенные значения тока и потенциала земля–рельс при любых размерах движения;
- 2) Математическая модель теплового расчета дроссель-трансформатора, позволяющая определять недопустимые перегревы масла, обусловленные транзитом обратного тягового тока больших значений, на основании этой информации могут планироваться работы по усилению перегруженных элементов;
- 3) Метод определения достаточности текущего уровня симметрии рельсовой линии для исключения ложной занятости рельсовых цепей;
- 4) Модель определения интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом фактических режимов работы, позволяющая получить численное выражение эффективности принятых мер по реконструкции рельсовой линии.

**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 тепловых режимов дроссель-трансформатора не превышает 20%. Разница в результатах объясняется ошибками измерений, упрощениями, принятыми в моделях и не пол-

ным совпадением исходных условий моделирования и эксперимента.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

- III Международной научно-практической конференция «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.)
- На семинаре аспирантов УрГУПС;
- Заседаниях кафедр «Автоматика телемеханика и связь на ж.д. транспорте» УрГУПС и «Автоматика 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.

# **1 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОБРАТНОГО ТЯГОВОГО ТОКА НА ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ**

## **1.1 Особенности работы рельсовых цепей на электрифицированных участках**

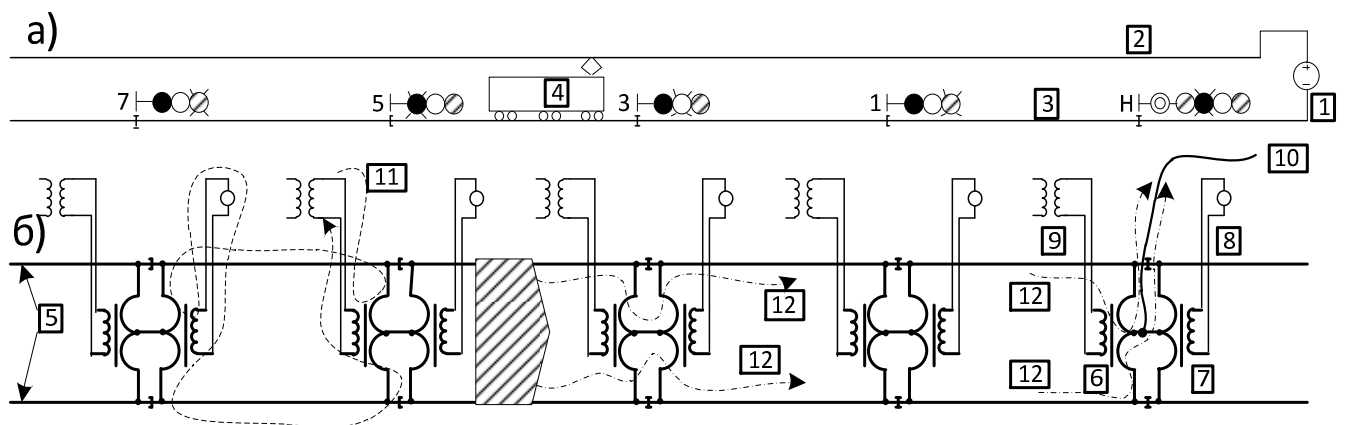
Системы обеспечения безопасности движения отечественных железных дорог построены на основе рельсовых цепей – технического устройства фиксирующего наличие подвижной единицы в пределах участка пути. Рельсовые цепи используют ходовые рельсы как проводники электрического тока. При вступлении подвижной единицы на рельсовую цепь, инвертируется состояние путевого приемника, показывая занятость участка пути. Наибольшее распространение получили рельсовые цепи с нормально включенным путевым реле – по ходовым рельсам протекает сигнальный ток, питающий путевой приемник. При занятии участка пути, колесные пары шунтируют приемник и путевое реле, выдержав замедление, выключается. Разделение смежных рельсовых цепей производят изолирующие стыки – элементы рельсовой линии, исключая гальваническую связь звеньев пути принадлежащим разным рельсовым цепям.

Система тягового электроснабжения использует рельсы в качестве проводника, обеспечивающие возврат тягового тока от электроподвижных единиц к тяговым подстанциям. Изолирующие стыки образуют препятствие на пути протекания обратного тягового тока, поэтому производится установка дроссель-трансформаторов – устройств, обеспечивающих протекание тягового тока в обход изолирующих стыков.

На рисунке 1.1.а, схематично показана схема тягового электроснабжения на участке, оборудованном трехзначной автоблокировкой. Обратный тяговый ток стекает в обратную тяговую сеть через контакт колеса с рельсом электро-

подвижной и возвращается к тяговой подстанции по ходовым рельсам. На рисунке 1.1.б показана схема обратной тяговой сети и путь протекания обратного тягового тока в обход изолирующих стыков через токовую (основную) обмотку дроссель-трансформатора.

В автоблокировке применены рельсовые цепи с нормально включенными путевыми реле. Для их функционирования сигнальный ток от питающей аппаратуры рельсовой цепи через магнитную связь дополнительной обмотки дроссель-трансформатора с основной трансформируется в рельсы. На релейном конце рельсовой цепи, происходит обратный процесс трансформации сигнального тока из токовой обмотки в сигнальную и удержание путевого реле во включенном состоянии, при отсутствии подвижного состава [4].



а – схема электропитания, б – схема обратной тяговой сети

1–фидер тяговой подстанции, 2–контактная сеть, 3–обратная тяговая сеть, 4–электроподвижная единица, 5–ходовые рельсы, 6,7–дроссель-трансформаторы питающего и релейного конца, соответственно, 8–путевое реле, 9–схема питания и кодирования рельсовой цепи, 10–отсос тяговой подстанции, 11–путь протекания сигнального тока, 12–путь протекания обратного тягового тока.

Рисунок 1.1 – Структурная схема обратной тяговой сети электрифицированного участка

Обратный тяговый ток протекает в одну сторону по рельсам блок–участка,

и встречно по токовым полуобмоткам дроссель-трансформатора. Сигнальный ток, протекая в разные стороны по ходовым рельсам, замыкается по токовой обмотке дроссель-трансформатора. Указанные направления протекания токов обуславливают следующие эффекты:

- при равенстве обратных тяговых токов в ходовых рельсах, вектора наведенного магнитного поля в сердечнике дроссель-трансформатора от токовых полуобмоток противоположно направлены и равны, поэтому итоговая напряженность магнитного поля от воздействия тягового тока равна нулю;

- вектора сигнального тока в токовых полуобмотках сонаправлены и поэтому происходит трансформация сигнального тока из токовой обмотки в сигнальную, обеспечивая работу рельсовых цепей электрифицированных участков.

Дроссель-трансформатор, являясь неотъемлемым элементом системы интервального регулирования – обеспечивает трансформацию сигнального тока и протекание обратного тягового тока в обход изолирующих стыков по направлению к тяговой подстанции. В данной работе анализируется работа дроссель-трансформаторов на участках, электрифицированных по системе 3,3кВ на постоянном токе. Система электрификации 3,3кВ характеризуется высокими значениями прямых и обратных тяговых токов. Высокие значения тока обуславливают повышенную тепловую нагрузку на элементы прямой и обратной тяговых сетей. Так, к примеру, протекание обратного тягового тока значением 2000А через средний вывод дроссель-трансформатора ДТ–0.6–1000, обуславливает тепловыделение порядка 1кВт. Использование приведенной в [5] тепловой модели обуславливает температуру перегрева масла над окружающей средой в 101,21 °С. При этом указанная тепловая модель не предполагает изменения параметров теплопередачи с изменением температуры масла, что не соответствует действительности.

Следует отметить, что значение обратного тягового тока, протекающего через дроссель-трансформатор непостоянно во времени. В исследованиях [6–9] показано, что допускаются кратковременное превышение значений протекающего тока относительно номинальных значений. Резервы тепловой устойчивости дроссель-трансформаторов обуславливаются инерционностью тепловых процессов.

Помимо тепловой устойчивости в работе [10] показана необходимость анализа механической устойчивости дроссель-трансформаторов, подвергающихся регулярному перегреву. Изменение геометрических размеров токовой обмотки, обусловленные циклами нагрева и охлаждения, разрушает межвитковую изоляцию. Разрушение изоляции приводит к межвитковому короткому замыканию при нагреве и расширении металла обмотки и самовосстановлению после охлаждения. Внешнее проявление межвиткового короткого замыкания – кратковременная ложная занятость рельсовой цепи; такие отказы были зафиксированы на Свердловской железной дороге.

Вопрос обеспечения устойчивой работы рельсовых цепей по условию асимметрии также имеет потенциал для исследования в рамках данной работы. Особенность работы рельсовой линии в условиях обращения тяжеловесных поездов в том, что при наличии нормативного коэффициента асимметрии из-за больших пиковых значений обратных тяговых токов возможно превышение максимально допустимого значения тока асимметрии дроссель-трансформатора, заложенного конструкцией, и фиксация ложной занятости. Также в работе [11] приводятся данные об асимметрии стекания обратного тягового тока с колесных пар электровоза в рельсы. Неравномерность стекания обусловлена попаданием песка в пятно контакта колесо-рельс, что придает процессу стекания тока стохастические свойства. Так в работе [11] показано, что в неблагоприятных условиях вклад асимметрии стекания в итоговое значение коэффициента асимметрии может достигать 50%.

Ситуация осложняется отсутствием непрерывного контроля за значением асимметрии обратного тягового тока современными системами мониторинга. Тем не менее, в источнике [12] указано на необходимость мониторинга состояний элементов обратной тяговой сети.

Выделим ключевые особенности работы рельсовых цепей обусловленных увеличением значений обратных тяговых токов на участках обращения тяжеловесных поездов:

- ухудшение тепловых режимов работы элементов рельсовой линии:

дрессель-трансформаторов и соединителей;

– возникновение неопределенности в достаточности текущего уровня симметрии рельсовой линии для исключения отказов связанных с насыщением магнитопровода дроссель-трансформатора.

## **1.2 Анализ исследований теплового воздействия обратного тягового тока на дроссель-трансформаторы**

### **Экспериментальные исследования.**

Наиболее масштабные исследования теплового воздействия обратного тягового тока на элементы рельсовой линии проводились на рубеже 80-х годов XX века во ВНИИЖТ [6,7,13]. Следующий этап исследований – начало XXI века [8,9,14]. Указанные исследования объединяет использование экспериментальных методов: используемые на транспорте дроссель-трансформаторы подвергались нагреву в лабораторных условиях до температур 100–120 °С.

Данные исследования позволили сформулировать методические рекомендации по расчету эффективных значений обратного тягового в рельсовой линии [3]. Положения указанной методики использованы в инструкции по расчету наличной пропускной способности [2], для качественной оценки допустимости графика движения поездов. Эффективный ток в рельсовой линии определяют из выражения:

$$I_{\text{эф}} = k_{\text{эф}} k_{\text{ср}} I_{\text{п}}, \quad (1.1)$$

где  $k_{\text{эф}}$  – коэффициент эффективного тока в рельсах;

$k_{\text{ср}}$  – коэффициент среднего тока в рельсах;

$I_{\text{п}}$  – суммарный ток электровозов в текущий момент.

Указанные коэффициенты определяются по следующим выражениям:

$$k_{\text{ср}} = k + \frac{1 - e^{-\gamma\alpha}}{\gamma\alpha}, \quad (1.2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент распространения рельсовой сети, 1/км;

$\alpha$  – интервал попутного следования поездов, км.

$$k_{\text{эф}} = \frac{\sqrt{k^2 + 2k \frac{1 - e^{-\gamma\alpha}}{\gamma\alpha} + \frac{1 - e^{-2\gamma\alpha}}{2\gamma\alpha}}}{k + \frac{1 - e^{-\gamma\alpha}}{\gamma\alpha}} \quad (1.3)$$

$$k = \mu n \frac{0.5L - x}{0.5L} \quad (1.4)$$

$$n = \frac{0.5L}{a}, \quad (1.5)$$

где  $\mu$  – параметр, определяющий связь контуров земля–рельс и земля–контактная сеть,

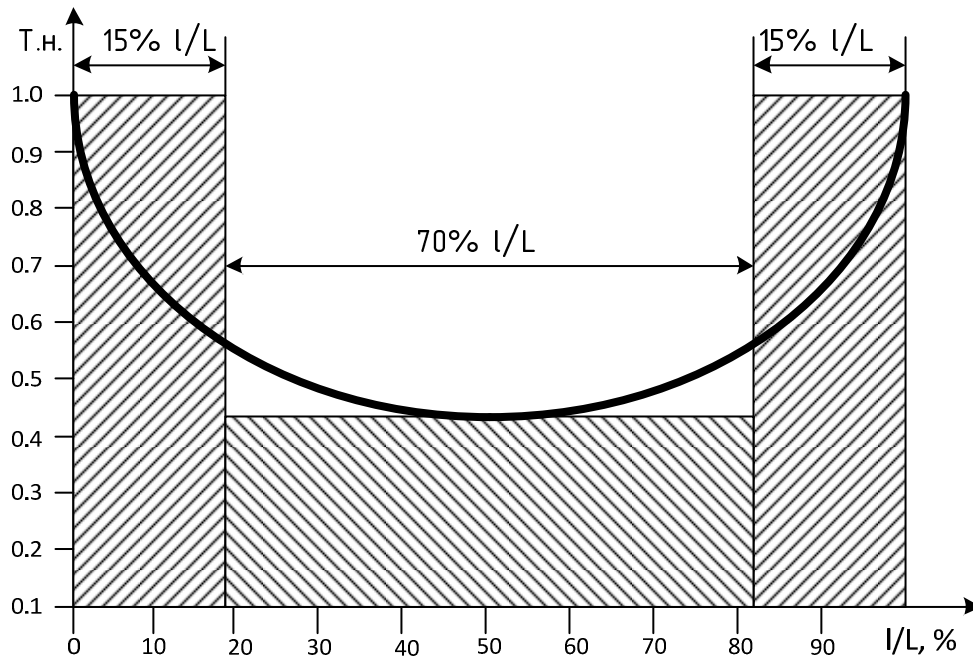
$n$  – число поездов в рассматриваемой зоне,

$L$  – расстояние между подстанциями,

$x$  – текущая координата вдоль пути.

На основании приведенной аналитической модели были рассчитаны параметры токораспределения в рельсовой линии. Наиболее нагруженными были признаны участки непосредственного примыкания рельсовой линии к пунктам отсоса тягового тока подстанций рисунок 1.2.





$l/L$  – удаление от тяговой подстанции, Т.н. – тепловая нагрузка в долях единицы, от максимальной

Рисунок 1.2 – Распределение тепловых нагрузок вдоль межподстанционных зон при электротяге постоянного тока

На приведенном рисунке выделяют две зоны: повышенных и пониженных тепловых нагрузок. Методика [3] рекомендует использование дроссель-трансформаторов и соединителей с большими допустимыми значениями тока, вблизи тяговых подстанций – в области повышенных токовых нагрузок. В зоне пониженных токовых нагрузок рекомендовано применение аппаратуры с меньшими допустимыми значениями тока.

Также в методике приведены длительно допустимые токовые нагрузки, таблица 1.1, по условию перегрева масла над окружающей средой  $+75^{\circ}\text{C}$ , при расчетной температуре окружающей среды  $+25^{\circ}\text{C}$  [6].

Таблица 1.1 – Длительно допустимые параметры токовой нагрузки на дроссель-трансформаторы и перемычки

Тип дроссель-трансформатора и перемычки	Длительно допустимая нагрузка, А	Сопротивление полуобмотки ДТ постоянному току, $10^{-3}$ Ом
ДТ–0.2–500	1800	0,5
ДТ–0.6–500	1500	0,9
ДТ–0.2–1000	2400	0.4
ДТ–0.6–1000	2200	0.65
Перемычка 2x50 мм <sup>2</sup>	470	–
Перемычка 2x70 мм <sup>2</sup>	680	–
Перемычка 4x50 мм <sup>2</sup>	1360	–
Перемычка 4x70 мм <sup>2</sup>	1830	–
Перемычка 4x95 мм <sup>2</sup>	1830	–
Перемычка 4x120 мм <sup>2</sup>	2340	–

Исходя из проведенных исследований был сделан вывод о достаточных тепловых резервах аппаратуры рельсовой линии. Нерешенным вопросом оставался вопрос обеспечения достаточной симметрии рельсовой линии для исключения отказов типа «ложная занятость» из-за насыщения сердечника дроссель-трансформаторов при увеличенных значениях обратного тягового тока.

Изначально нормативные значения максимально допустимого тока асимметрии совпадали с конструктивными значениями. Позже для создания необходимого резерва устойчивости работы рельсовых цепей по асимметрии нормативное значение тока было уменьшено вдвое [15]. Данная ситуация сохраняется до сих пор, нормативные значения тока асимметрии ниже конструктивных значений в два и более раз [16]. Что обеспечивает неиспользуемый в настоящее время запас устойчивости рельсовых цепей по параметру асимметрии обратного тягового тока. Использование запаса требует совершенствование средств мониторинга рельсовых цепей.

### Теоретические исследования.

Альтернативные исследования [5], дроссель-трансформатора ДТ–1000 показали, что использование медной шины обтекаемой со всех сторон трансформаторным маслом, обеспечивает хорошие условия по теплообмену обмотка-масло. что позволило ограничиться перегревом масла над окружающей средой и пренебречь перегревом токовой обмотки над маслом. В результате была получена численная оценка постоянной времени дроссель-трансформатора: 2.7, часа. Упрощение, принятое в тепловой модели дроссель-трансформатора, до однородного с тепловой точки зрения тела позволило определить коэффициент теплопередачи масло – окружающая среда:  $1.3, \text{Вт/см}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Также в исследовании было показано, что дроссель-трансформатор обладает запасом по тепловой устойчивости, и допускает пропуск тяговых токов превышающих номинальные значения.

В работах [17,18] и нормативной литературе [19] для анализа нагрева силовых масляных трансформаторов используют итерационную модель нагрева однородного тела:

$$T(t) = T_0 \cdot e^{-\frac{t}{t_{\text{пост}}}} + T_{\text{уст}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{\text{пост}}}}\right), \quad (1.6)$$

где  $T_0$ – начальное значение температуры на данном расчетном шаге,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_{\text{уст}}$ – установившаяся температура перегрева при известных тепловых потерях,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{\text{пост}}$ – тепловая постоянная времени для конкретного типа трансформатора.

Тепловая постоянная времени нагреваемого тела измеряется в секундах, и рассчитывается по следующей формуле:

$$t_{\text{пост}} = \frac{Gc}{hS}, \quad (1.7)$$

где  $G$  – масса тела, г;

$c$  – эквивалентная теплоемкость,  $\frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}$ ;

$h$  – эквивалентный коэффициент теплоотдачи,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ ;

$S$  – площадь охлаждаемой поверхности,  $\text{м}^2$ .

Установившуюся температуру перегрева над охлаждающей средой при известных тепловых потерях определяется из выражения:

$$T_{\text{уст}} = \frac{Q}{hS} = \frac{I^2 r}{hS}, \quad (1.8)$$

где  $Q$  – тепловыделение, Вт;

$I$  – ток обмотки, А;

$r$  – активное сопротивление обмотки, Ом.

Под итерационностью в модели понимается принцип расчета, при котором достигнутое превышение температуры на предыдущем шаге становится начальной температурой текущего.

Такая модель удобна для инженерных расчетов, так как тепловыделение силовых трансформаторов легко выражается через параметры потерь на холостом ходу и в режиме короткого замыкания, и эти параметры указаны в конструкторской документации.

Вместе с тем данная модель имеет ряд недостатков:

- трансформатор с тепловой точки зрения неоднородное тело, поэтому определение эквивалентной теплоемкости чаще всего затруднено;
- интенсивность охлаждения обусловлена константным значением коэффициента теплоотдачи, который зависит от установившейся температуры нелинейным образом, из-за комбинации различных типов теплоотдачи: конвекцией и излучением.
- игнорируется нагрев солнечной радиацией.

Частично данные проблемы решены литературе посвященной расчёту, синтезу и анализу нагрузочных способностей силовых масляных трансформаторов [20–24] и дроссель-трансформатора [25]:

- трансформаторы рассматриваются как система из трех-четырех однородных тел;
- учитывается отдельно охлаждение корпуса путем конвективного теплопереноса и излучением;
- в работе [23] учитывается неравномерность температурного поля в наборных обмотках, изменение потерь при изменении температуры обмотки;
- подробно исследуются вопросы неравномерности температурного поля внутри трансформатора;
- предоставляют экспериментально апробированные полуэмпирические формулы для приближенного определения коэффициентов теплопередачи в различных режимах работы и конструктивных исполнениях трансформаторов.

Проблема моделей [20–24] в том, что они индивидуальны для каждого типа трансформатора, так как оперируют фактическими геометрическими и физическими параметрами элементов трансформаторов.

Поэтому для анализа тепловых режимов работы дроссель-трансформатора необходим синтез модели аналогичной приведенным в работах [20–24], основанных на решении системы дифференциальных уравнений описывающих процессы теплопередачи в дроссель-трансформаторе. Исходными данными модели должны быть значения обратного тягового тока, протекающие через дроссель-трансформатор, массо-габаритные характеристики элементов конструкции и условия охлаждения. Значения тока в рельсовой линии зависят от тока локомотива и условий токораспределения в рельсовой линии участка железной дороги.

### **1.3 Анализ исследований растекания обратного тягового тока в рельсовой линии**

Вопрос токораспределения в электрических линиях исследован довольно

подробно [26-45]. Основным методом решения данной задачи являются аналитические модели, построенные на базе решения уравнения электрически длинной линии с распределенными параметрами. Модели на линиях с сосредоточенными параметрами характеризуются существенными погрешностями и не нашли широкого применения. Проблема практического применения аналитических моделей с распределенными параметрами лежит в плоскости сделанных допущений о неизменности параметров по всей длине, что не всегда соответствует реальности. При моделировании неоднородной электрической линии возрастает объем вычислений. Для снижения сложности вычислительной работы при проведении анализа, применяются различные пакеты программ, автоматизирующие процесс вычислений.

Для моделирования систем тягового энергоснабжения существует ряд программных продуктов. Наибольшее распространение получила система «Кортес», разработки ВНИИЖТ, применяемая в хозяйстве электрификации и энергоснабжения. Система представляет собой набор программ для тяговых, электрических и тепловых расчетов систем тягового электроснабжения 3, 25 и 2х25кВ. В ней реализован расчет пропускной способности системы электрификации 3.3кВ с пунктами повышения напряжения на межстанционных зонах. Результатами моделирования являются электрические и тепловые режимы работы оборудования тяговой подстанции, контактной сети и тягового подвижного состава.

Система «Энерго», разработанная под руководством Тэр-Оганова Э.В., применяется в учебном процессе в УрГУПС в курсе изучения систем тягового энергоснабжения. Набор функций аналогичен «Кортес», но система «Энерго» также позволяет решать и обратную задачу – подбирать график движения поездов под возможности текущей конфигурации системы тягового энергоснабжения [46].

В Иркутском университете путей сообщения была разработана собственная система моделирования [47–50], оптимизированная под задачи расчета системы электрификации на переменном токе. К отличительной особенности данной системы можно отнести расчет гармонических составляющих на шинах тяговой подстанции и анализ режимов работы системы внешнего энергоснабжения и вли-

яния не тяговых потребителей на качество энергоснабжения.

Приведенные программы моделирования системы тягового электроснабжения специализированы для анализа режимов работы тяговых подстанций, контактной сети, тягового электроподвижного состава и внешней системы электроснабжения. Моделирование обратной тяговой сети ограничено указанием среднего удельного сопротивления рельсовой линии, проводимости изоляции рельсов относительно земли и расчета тока отсасывающей линии тяговой подстанции. Расчет токораспределения в рельсовой линии не производится, что не позволяет производить анализ тепловых режимов работы дроссель-трансформаторов, перемычек и соединителей.

В Омском государственном университете путей сообщения под руководством Лунева С.А., была создана программа оценки готовности элементов обратной тяговой сети к пропуску тяжеловесных поездов по условиям термического воздействия, названная АПК-РОТТ [51]. В основу указанной программы легла методика [3]. Оценка термического состояния элемента рельсовой линии производится по значению эффективного тока. При превышении расчетного значения тока элемента рельсовой линии, над значениями из таблицы 1.1 фиксируется термический отказ.

### **Теоретические основы моделирования токораспределения в рельсовой линии.**

Как отмечается в [52,53] питание электроподвижных единиц осуществляется через контактную сеть и рельсовую линию. Поскольку рельсы надежно не изолированы от земли, то ток протекает по земле и рельсам, поэтому рассматривать рельсовую линию как линию с сосредоточенными параметрами некорректно. В [53] для определения тока в рельсах и потенциала земля рельс используется модель электрически длинной линии, описываемая системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{d\varphi(x)}{dx} = (R + j\omega L)i(x) \\ -\frac{di(x)}{dx} = (G + j\omega C)\varphi(x) \end{cases} \quad (1.9)$$

где  $i(x)$ ,  $\varphi(x)$  – значения тока и разности потенциалов земля–рельс в точке рельсовой линии с координатой  $x$ ;

$R, L$  – удельные значения активного сопротивления и индуктивности рельсов;

$G, C$  – удельные значения проводимости и емкости перехода рельс-земля.

При электротяге постоянного тока система дифференциальных уравнений упрощается и принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(x)}{dx} + R \cdot i(x) = 0 \\ \frac{di(x)}{dx} + G \cdot \varphi(x) = 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

Решение данной системы в символьном виде, относительно  $\varphi(x)$ ,  $i(x)$ , приводится в различных источниках [52,53] и выглядит:

$$\varphi(x) = C1e^{\sqrt{R \cdot G} \cdot x} + C2e^{-\sqrt{R \cdot G} \cdot x} \quad (1.11)$$

$$i(x) = -\sqrt{\frac{R}{G}} (C1e^{\sqrt{R \cdot G} \cdot x} - C2e^{-\sqrt{R \cdot G} \cdot x}) \quad (1.12)$$

Если обозначить радикал произведения:  $\sqrt{R \cdot G}$  как постоянную распределения линии  $\alpha$ , а радикал частного  $\sqrt{\frac{R}{G}}$  как волновое сопротивление  $R_B$ , тогда уравнения примут вид:

$$\varphi(x) = C1e^{\alpha \cdot x} + C2e^{-\alpha \cdot x} \quad (1.13)$$

$$i(x) = -\frac{1}{R_B} (C1e^{\alpha \cdot x} - C2e^{-\alpha \cdot x}) \quad (1.14)$$

Постоянные интегрирования  $C1$ , и  $C2$  могут быть определены из гранич-



ных условий, соответствующих мгновенному расположению нагрузок в рельсовой линии [52,53]:

$$\begin{cases} x = \infty \Rightarrow u(\infty) = 0 \Rightarrow 0 = (C1e^{\alpha \cdot x} - 0) \\ x = 0 \Rightarrow i(0) = \frac{I}{2} \Rightarrow \frac{I}{2} = \frac{C2}{R_B} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C1 = 0 \\ C2 = \frac{I \cdot R_B}{2} \end{cases} \quad (1.15)$$

Предложенные коэффициенты были получены исходя из положения неизменности первичных параметров распределенной линии по всей ее длине, что позволяет предположить равномерное растекание тока от места приложения токовой нагрузки в обе стороны.

Расчетные формулы для определения значений тока в рельсе и потенциала земля-рельс на расстоянии  $x$ , от места приложения токовой нагрузки  $I$ :

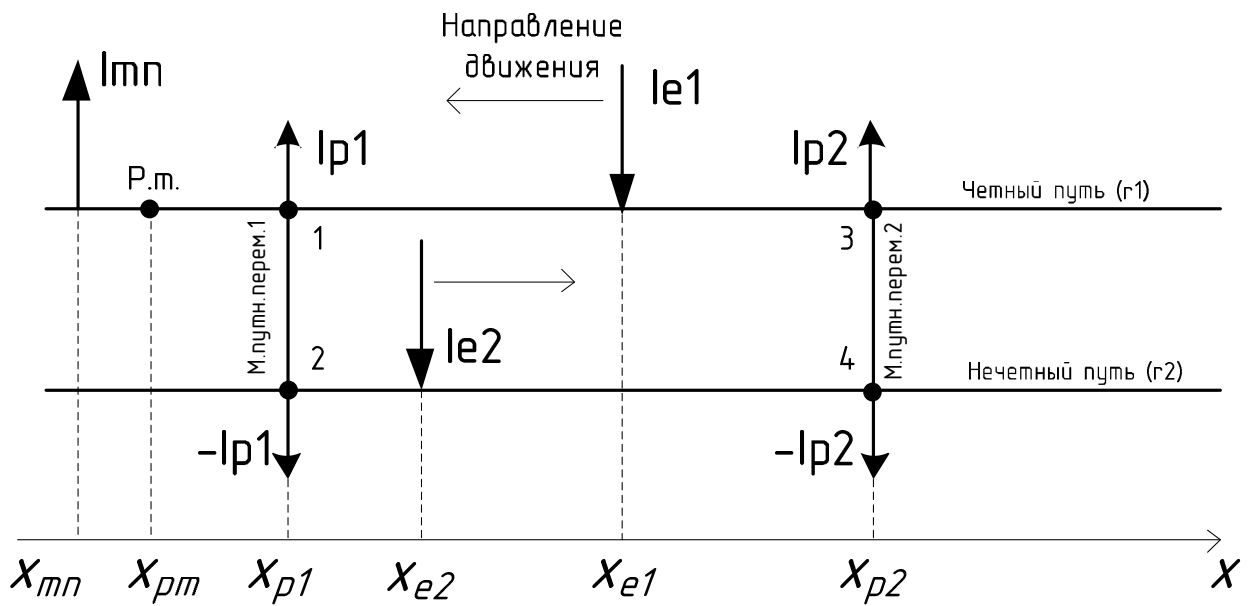
$$\begin{cases} i(x) = \frac{I}{2} e^{-\alpha \cdot x} \\ u(x) = \frac{R_B \cdot I}{2} e^{-\alpha x} \end{cases} \quad (1.16)$$

где  $I$  – ток втекающий в рельсы в точке с координатой  $x$ .

Результирующий ток (потенциал земля–рельс) в конкретной точке рельсовой линии определяют как алгебраическую сумму токов (потенциалов) от каждого источника тока находящего на расчетном участке, данный метод в литературе называют методом наложения (суперпозиции). Источниками тока в рельсовой линии являются: электровозы, отсосы тяговых подстанций, междупутные перемычки.

При решении задачи анализа токораспределения, необходимо производить расчеты токов в рельсовых линиях, многопутных перегонов, с междупутными перемычками. В литературе [52,53] приводятся примеры использования приведенной аналитической модели для моделирования однопутного участка с консольной схемой питания контактной сети и одним электровозом на фидерной зоне в статическом состоянии (мгновенное распределение токов и потенциалов рельс–земля).

Для иллюстрации проблем аналитического моделирования двухпутного участка в динамике (при движении электровозов) показанным методом, определим ток в точке рельсовой линии участка изображенного на рисунке 1.3. при движении поездов. Электровозы и тяговая подстанция схематично обозначены их токами, втекающими/вытекающими в/из рельсовой линии.



$I_{тп}$ ,  $I_{e1}$ ,  $I_{e2}$  – токи тяговой подстанции, и электровозов,  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$ , – токи мест подключения перемычек,  $P.т$  – расчетная точка,  $X_i$  – ординаты элементов.

Рисунок 1.3 – Расчетная схема мгновенного значения тока точке.

В приведенной схеме исходными данными являются ординаты всех объектов, токи электровозов, ток отсоса тяговой подстанции – определенный как сумма токов, потребляемых электровозами, на фидерной зоне. Тогда токи и потенциалы рельс–земля нечетного и четного пути в координате  $x$ , определим методом наложения:

$$I_{r1}(x) = I_{тп}(x) + I_{p2}(x) + I_{e2}(x) + I_{p4}(x) \quad (1.17)$$

$$\varphi_{r1}(x) = \varphi_{тп}(x) + \varphi_{p2}(x) + \varphi_{e2}(x) + \varphi_{p4}(x) \quad (1.18)$$

$$I_{r2}(x) = I_{p1}(x) + I_{e2}(x) + I_{p3}(x) \quad (1.19)$$

$$\varphi_{r2}(x) = \varphi_{p1}(x) + \varphi_{e1}(x) + \varphi_{p3}(x) \quad (1.20)$$

$$I_{tp} = I_{e1}(x) + I_{e2}(x), \quad (1.21)$$

где  $I_{r1}(x)$ ,  $I_{r2}(x)$  – функциональная зависимость тока в рельсах от текущей координаты в фиксированный момент времени, для четного и нечетного пути соответственно;

$\varphi_{r1}(x)$ ,  $\varphi_{r2}(x)$  – функциональная зависимость потенциала рельс-земля от текущей координаты в фиксированный момент времени, для четного и нечетного пути соответственно;

$I_{e1}(x)$ ,  $I_{e2}(x)$  – зависимость тока электроподвижной единицы в зависимости от текущей координаты;

$I_{tp}$  – ток отсоса тяговой подстанции;

$I_{p1}(x)$ ,  $I_{p2}(x)$  – ток первой междупутной перемычки в местах подключения ее к четному и нечетному пути соответственно;

$I_{p3}(x)$ ,  $I_{p4}(x)$  – ток второй междупутной перемычки в местах подключения ее к четному и нечетному пути соответственно.

В уравнениях (1.17–1.20) неизвестными являются токи междупутных перемычек. Пренебрегая стеканием тока с междупутных перемычек в землю, справедливо предположить равенство потенциалов рельс–земля, в местах соединения перемычек рельсами пути:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varphi_3 = \varphi_4 \end{cases}, \quad (1.22)$$

где  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – потенциалы рельс-земля в местах подключения первого междупутного соединителя к рельсам четного и нечетного пути;

$\varphi_3$ ,  $\varphi_4$  – потенциалы рельс-земля в местах подключения второго междупутного соединителя к рельсам четного и нечетного пути;

Дополним систему 1.22 уравнениями для потенциалов рельс–земля в точках подключения перемычек к рельсам, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varphi_3 = \varphi_4 \\ I_{tp} = I_{e1} + I_{e2} \\ \varphi_1 = \frac{R_B}{2} [I_{p1} + I_{tp} \cdot e^{-\alpha|x_{tp}-x_{p1}|} + I_{e1} \cdot e^{-\alpha|x_{e1}-x_{p1}|} + I_{p2} \cdot e^{-\alpha|x_{p2}-x_{p1}|}] \\ \varphi_2 = \frac{R_B}{2} [-I_{p2} + I_{e2} \cdot e^{-\alpha|x_{e2}-x_{p1}|} - I_{p2} \cdot e^{-\alpha|x_{p2}-x_{p1}|}] \\ \varphi_3 = \frac{R_B}{2} [I_{p2} + I_{e1} \cdot e^{-\alpha|x_{e1}-x_{p2}|} + I_{p1} \cdot e^{-\alpha|x_{p1}-x_{p2}|} + I_{tp} \cdot e^{-\alpha|x_{tp}-x_{p2}|}] \\ \varphi_4 = \frac{R_B}{2} [-I_{p2} + I_{e2} \cdot e^{-\alpha|x_{e2}-x_{p2}|} + I_{p1} \cdot e^{-\alpha|x_{p1}-x_{p2}|}] \end{array} \right. \quad (1.23)$$

Решим данную систему в символьном виде относительно  $I_{p1}, I_{p2}$ :

$$\begin{aligned} I_{p1} = & -\frac{1}{2e^{-2a|x_{p1}-x_{p2}|} - 2} \left( I_{e1} (e^{-a(|x_{p1}-x_{p2}|+|x_{e1}-x_{p2}|)} \right. \\ & - e^{-a(|x_{p1}-x_{p2}|+|x_{p2}-x_{tp}|)} + e^{-a|x_{p1}-x_{tp}|} - e^{-a|x_{e1}-x_{p1}|}) \\ & + I_{e2} (e^{-a(|x_{p1}-x_{p2}|+|x_{p2}-x_{tp}|)} - e^{-a(|x_{p1}-x_{p2}|+|x_{e2}-x_{p2}|)} \\ & \left. + e^{-a|x_{p1}-x_{tp}|} + e^{-a|x_{e2}-x_{p2}|}) \right) \end{aligned} \quad (1.24)$$

$$\begin{aligned} I_{p2} = & -\frac{1}{2e^{-2a|x_{p1}-x_{p2}|} - 2} \left( I_{e1} (e^{-a(|x_{p1}-x_{p2}|+|x_{p1}-x_{tp}|)} \right. \\ & - e^{-a(|x_{p1}-x_{p2}|+|x_{e1}-x_{p1}|)} + e^{-a|x_{e1}-x_{p2}|} - e^{-a|x_{p2}-x_{tp}|}) \\ & + I_{e2} (e^{-a(|x_{p1}-x_{p2}|+|x_{e2}-x_{p1}|)} - e^{-a(|x_{p1}-x_{p2}|+|x_{p1}-x_{tp}|)} \\ & \left. + e^{-a|x_{p2}-x_{tp}|} + e^{-a|x_{e2}-x_{p1}|}) \right) \end{aligned} \quad (1.25)$$

Определим аналитическое выражение для расчета тока в рельсах четного пути:

$$I_{r1}(x) = (I_{e1} + I_{e2})e^{-\alpha|x_{tp}-x|} + I_{p1}e^{-\alpha|x_{p1}-x|} + I_{p2}e^{-\alpha|x_{p2}-x|} + I_{e1}(x) \quad (1.26)$$

Особенностью аналитической модели растекания тока по рельсовой линии является необходимость смены знака у тока электровоза при проходе точки с координатой  $x$  – это обусловлено изменением направления протекания тока элек-

трово́за после прохода контрольной точки. Следовательно, в выражении (1.26) ток первого электро́воза будет представлен кусочно–заданной функцией.

$$I_{e1}(x) = \begin{cases} \frac{I_{e1}}{2} e^{-\alpha|x_{e1}-x_{пт}|}, & x_{e1} \geq x \\ -\frac{I_{e1}}{2} e^{-\alpha|x_{e1}-x_{пт}|}, & x_{e1} < x \end{cases} \quad (1.27)$$

Данная особенность усложняет процесс моделирования.

Также к недостаткам аналитического метода, основанного на системе алгебраических уравнений можно отнести:

1) Изменение количества электро́возов на участке потребует повторного вывода уравнений аналогичных 1.24, 1.25;

2) Изменение конфигурации участка (добавление/удаление междупутных перемычек), потребует повторного решения системы 1.23 с другим числом уравнений;

3) Постоянные интегрирования для уравнений 1.13, 1.14 были получены исходя из предположения неизменности первичных параметров линии по всей длине участка.

Принятие факта однородности рельсовой линии, это серьезное упрощение физической сущности. В условиях эксплуатации первичные параметры линии представляют собой функцию координаты. Поэтому моделирование участков железной дороги на основе аналитической модели сопряжено с большим объемом вычислений. Использование средств вычислительной техники позволит снизить вычислительную сложность моделирования, а использование систем конечно-элементного моделирования решить задачу повторного использования моделей для других участков железной дороги.

#### 1.4 Анализ способов контроля асимметрии обратного тягового тока

В [5,10,11,12,55,56] показано, что от качества содержания рельсовой линии зависит устойчивость работы рельсовых цепей. Нормативная затяжка и отсутствие ржавчины в токопроводящих стыках, исправное состояние искровых промежутков в схемах заземления контактной сети обеспечивают устойчивую работу рельсовых цепей вследствие обеспечения нормативной асимметрии обратного тягового тока.

Причины появления тока асимметрии, превосходящие допустимые значения, хорошо изучены: это различные сопротивления рельсовых нитей, обусловлены различными переходными сопротивлениями рельсовых соединителей или различной проводимостью рельс–земля. Данные различия приводят к появлению продольной и/или поперечной асимметрии соответственно. Использование песка для увеличения коэффициента сцепления колесных пар локомотива с поверхностью катания рельсов обуславливает стохастические характеристики стекания тока с колесных пар в рельсы через запесоченное пятно контакта колесо-рельс. В работе [11] показано, что данный процесс обуславливает еще один вид асимметрии – асимметрию стекания обратного тягового тока.

В работах [8,9,57] показана необходимость контроля параметра асимметрии обратного тягового тока в условиях эксплуатации. В [58] приводятся технические требования к измерению асимметрии обратного тягового тока. Измерения производятся в свободное от движения поездов время. Для измерения тока асимметрии применяется прибор ИПС–01/1, оснащенный датчиками Холла, надеваемый на дроссельные переключки, с пределом измерений 500А. Также в [58] отмечается допустимость оценки коэффициента асимметрии обратного тягового тока прибором В7–63. Для этого производится одновременное измерение падения напряжения на токовых полуобмотках дроссель-трансформатора двумя приборами В7–63 в селективном режиме с подавлением сигнального тока.

Автоматизированный контроль асимметрии обратного тягового тока не

предусмотрен текущей нормативной документацией, и соответствующие технические средства измерения отсутствуют в современных системах мониторинга.

В диссертационном исследовании необходимо проработать вопрос расширения функций современных систем мониторинга: добавив контроль состояния рельсовой линии, сформировать перечень параметров, которые необходимо контролировать.

### **1.5 Анализ методов построения систем мониторинга и формирования диагностических параметров**

В [59] подробно исследуется вопрос построения систем мониторинга. Выделено два способа диагностирования устройств: тестовый и функциональный диагноз.

Тестовое диагностирование предполагает выключение оборудования из работы и его проверку на специальных стендах, формирующие тестовые воздействия, аналогичные рабочим в режиме эксплуатации и фиксацию откликов. Данный способ применяется для проверки аппаратуры систем автоматики в условиях ремонтно–технологических участков дистанций сигнализации централизации и блокировки.

Функциональное диагностирование фиксирует рабочие воздействия и отклики оборудования в условиях эксплуатации и сравнивает их с эталонными моделями. Данный метод нашел свое применение в современных системах мониторинга и диагностики, контролирующей работу систем автоматики в целом.

Также в источнике [59], указаны задачи систем диагностики и мониторинга: генез, диагноз, прогноз. Задача генеза предполагает определения прошлых состояний устройства и решается в современных системах ведением архива. В архиве фиксируются прошлые диагностические ситуации [60] возникшие на объекте диагноза и значения контролируемых числовых параметров. Задача диагноза заклю-

чается в определении текущего состояния объекта и решается в системах мониторинга хранением текущих диагностических ситуаций и контролем допустимых значений числовых параметров. Задача прогноза – прогнозирование будущих состояний объекта диагноза, требует экстраполяции трендов изменения контролируемых числовых параметров, и на текущий момент не реализована в системах мониторинга систем железнодорожной автоматики.

В технических решениях по унификации информационного обмена систем мониторинга [60], используется понятие диагностической ситуации – события нештатной работы контролируемой системы железнодорожной автоматики. Возникновение диагностической ситуации является следствием выхода значения диагностического параметра за установленные границы. Для тональных рельсовых цепей выделяют следующие диагностические параметры: напряжения на путевом реле, приемнике, фильтре и генераторе. Для аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации: значения тока кодирования под приемными катушками локомотива и временные параметры кодового цикла.

Важнейшими критериями диагностических параметров является информативность, однозначность и точность оценки. Под информативностью в данном случае понимают достаточность выбранного минимального набора параметров для выполнения задач технической диагностики. Под однозначностью понимается отсутствие неточностей в трактовке результатов диагноза. Точность оценки показывает степень доверия результатам тестирования.

Для рельсовой линии, как элемента инфраструктурного комплекса железных дорог, на текущий момент не сформирован перечень диагностических параметров. В технологии содержания рельсовых цепей и справочнике на аппаратуру железнодорожной автоматики [16] указаны требования к значениям тока асимметрии и коэффициента асимметрии. На их основе, в ходе диссертационного исследования, необходимо сформировать диагностические параметры рельсовой линии позволяющие контролировать ее состояние. Сформированные диагностические параметры рельсовой линии должны отвечать заявленным ранее критериям.



## Выводы и постановка задачи исследования

Обеспечение устойчивой работы рельсовых цепей при организации тяжеловесного движения, является необходимым условием для использования наличной пропускной способности. Как было показано ранее, на текущий момент отсутствуют расчетные методы, позволяющий учитывать и оценивать негативное влияние возросшей токовой нагрузки на дроссель-трансформаторы. Поэтому совершенствование методов обеспечения устойчивой работы рельсовых цепей на участках с тяжеловесным движением должно происходить по двум направлениям:

- разработка методов позволяющих учитывать токовые и тепловые режимы работы дроссель-трансформаторов при определении минимально-допустимого межпоездного интервала следования;
- дополнение систем мониторинга функциями контроля технического состояния рельсовой линии, измерением значений обратного тягового тока и тока асимметрии, созданием новых диагностических параметров для развития средств мониторинга рельсовых цепей.

Данные направления позволяют сформулировать следующие задачи исследования:

- 1) Усовершенствовать метод расчета растекания обратного тягового тока в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов;
- 2) Усовершенствовать метод теплового расчета дроссель-трансформатора, путем рассмотрения дроссель-трансформатора как композиции простых с тепловой точки зрения тел (корпуса, масла, обмотки и сердечника) и анализа процессов теплопередачи между ними и окружающей средой;
- 3) Разработать метод определения интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом тепловых режимов работы и значений обратного тягового тока;
- 4) Разработать метод определения достаточности текущего уровня симметрии рельсовой линии для исключения ложной занятости рельсовой цепи из-за

насыщения магнитопровода дроссель-трансформатора током асимметрии;

5) Усовершенствовать существующие средства мониторинга рельсовых цепей, дополнив их функционал средствами контроля значений обратных тяговых токов и алгоритмом оценки текущей эксплуатационной готовности на основе предложенных диагностических параметров и методов расчета.

## 2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ДРОССЕЛЬ-ТРАНСФОРМАТОРА

### 2.1 Разработка модели токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов

#### Синтез модели токораспределения в неоднородной линии.

В п.п. 1.3 показано, что моделирование в неоднородной линии требует задания первичных параметров линии как функций координаты. Применение аналитической модели основанной на символьном решении уравнений длинной линии в этом случае сопряжено с большим объемом вычислений и имеет определенные проблемы связанные с повторным использованием разработанной модели. С другой стороны дискретизация всего участка, подлежащего моделированию, на элементы малой длины позволит признать линию однородной в пределах этого участка. В практике моделирования подобный подход используется довольно часто [61-65] и получил название конечно-элементного моделирования. В конечно-элементных моделях применяются численные методы решения дифференциальных уравнений и систем. Поэтому для снижения вычислительной сложности моделирования используются специализированные программные комплексы.

Рассматриваемая в данной работе модель построена в программе моделирования мультифизических процессов *Comsol Multyphysics*. Используется стандартный для данного класса программных сред, подход к созданию конечно-элементных моделей:

- производится выбор размерности модели;
- формирование расчетной области – построение геометрии модели;
- задание набора дифференциальных уравнений, описывающих физические свойства модели;
- задание граничных и начальных условий.

Последовательно опишем все этапы построения модели и моделирования в данной программе.

Отличие процесса растекания тока в многопутных перегонах, от однопутных – это неизвестные токи междупутных перемычек. Определить которые можно исходя из условия выравнивания потенциала рельс–земля в точках подключения соединителя к рельсам (междроссельным перемычкам). Отсутствие необходимости анализа асимметрии тягового тока, на данном этапе, позволяет упростить геометрию модели: представить путь перегона одной прямой линией. Междупутные перемычки в геометрии представлены отрезками соединяющие пути перегона в соответствующих местах. Следовательно, модель будет иметь двумерную геометрию, состоящую из прямых линий (путей перегона) и отрезков – междупутных соединителей, масштаб геометрии модели в редакторе среды моделирования 1:1, т.е. в натуральную величину, рисунок 2.1.

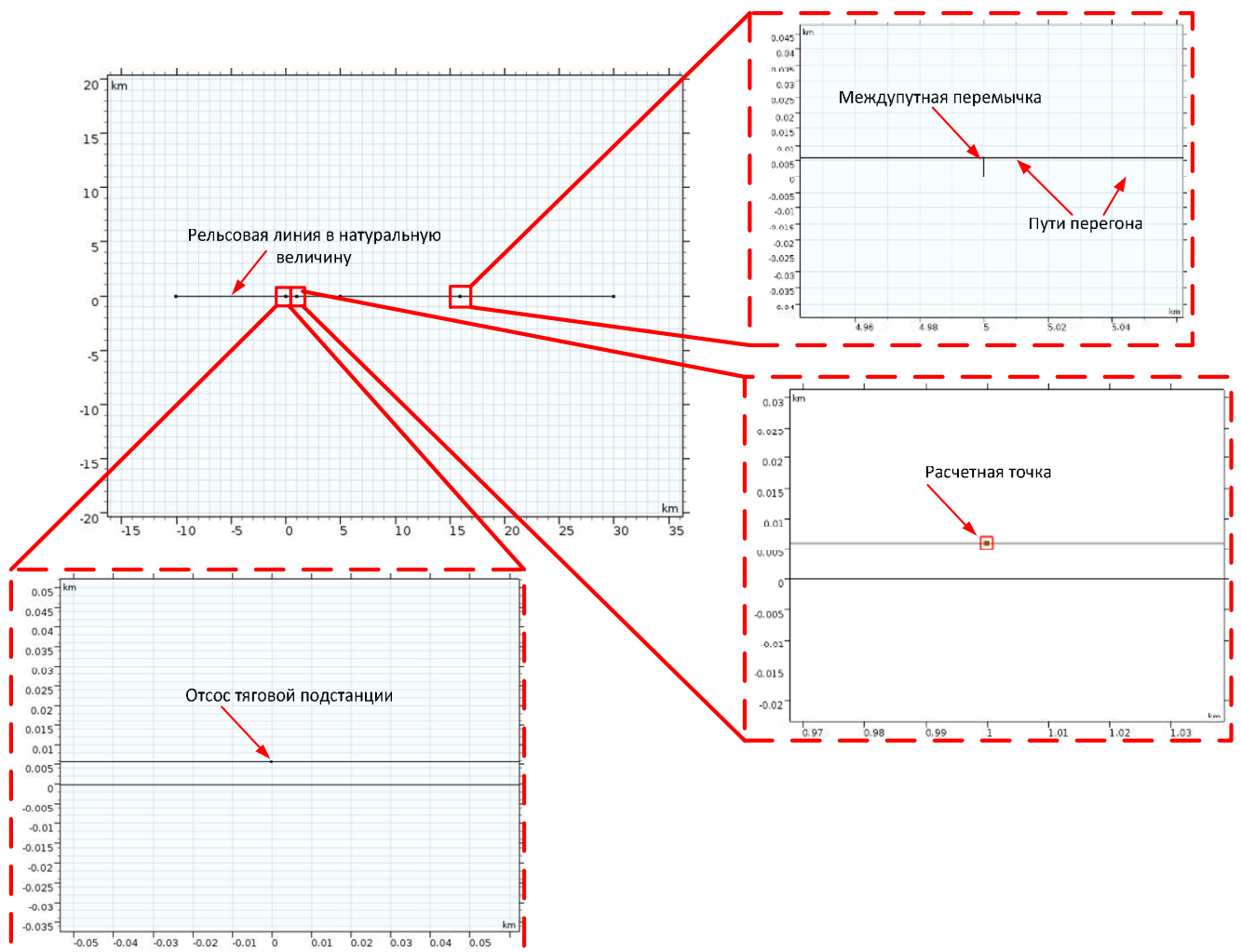


Рис 2.1 – Геометрия конечно–элементной модели токораспределения.

Расчетная область в системах конечно–элементного моделирования представлена расчетной сеткой. Секта характеризуется минимальной размером ячейки, внутри которой коэффициенты решаемых дифференциальных уравнений и систем неизменны. Так как в рассматриваемой модели не анализируются электрические поля вне проводников, то расчетная область – это пути перегона и междупутные перемычки. Поэтому по двумерной геометрии модели построена одномерная расчетная сетка с минимальным размером элемента в 1 погонный метр.

Моделирование токораспределения основано на решении системы дифференциальных уравнений (1.10), с коэффициентами (первичными параметрами линии) заданными в виде функций координаты. Для задания систем уравнений в *Comsol Multyphysics* используется решатель дифференциальных уравнений в частных производных, коэффициенты которого задаются пользователем: Coefficient Form Boundary PDE. Поэтому для задания системы (1.10) в среде моделирования *Comsol Multyphysics* необходимо решить ее относительно тока или потенциала. Решение относительно потенциала более перспективно, так как позволяет задать граничное условие: равенство потенциалов рельс–земля в местах подключения междупутной перемычки:

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} - a^2\varphi(x) = I(x), \quad (2.1)$$

где  $I(x)$  – ток, втекающий/вытекающий в/из рельсовой линии в точке с координатой  $x$ , или 0 если ток отсутствует.

Приведя выражение (2.1), в виду в частных производных в одномерном пространстве получим следующее выражение, готовое к заданию в среде моделирования:

$$-\frac{1}{r} \cdot \Delta V + g \cdot V = f, \quad (2.2)$$

где  $f$  – линейная плотность тока втекающего в элемент сетки, А/м;

$g$  – удельная проводимость изоляции, Сил/м;

$r$  – удельное сопротивление рельсов, Ом/м;

$V$  – потенциал рельс–земля, В.

При известном значении потенциала рельс–земля, значение тока в рельсе определяется из выражения:

$$i(x) = \frac{1}{R} \frac{d\varphi(x)}{dx} \quad (2.3)$$

Пятно контакта колеса электровоза с рельсом, в котором происходит стекание тока в рельсы мало, по сравнению с линейными размерами моделируемого участка. Поэтому сделано упрощение – принято, что ток стекает в рельсовую линию равномерно по всей длине локомотива, рисунок 2.2.

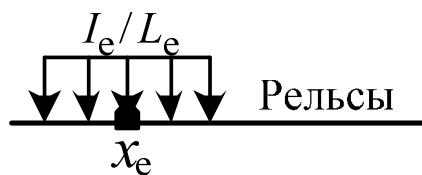


Рисунок 2.2 – Схема замещения электровоза

В начальный момент времени потенциал земля–рельс и его первая производная равны нулю, что задает начальное условие для численного решения уравнения (2.2). Граничные условия задаются в местах подключения минусовой шины тяговой подстанции, – стационарные источники тока, и текущего положения мобильных источников тока – электроподвижных единиц (электровозов).

### **Верификация разработанной модели токораспределения.**

Верификация предложенной имитационной модели растекания тока проводилась в два этапа:

- 1) Сравнение с аналитической моделью, построенной для того же участка, что и конечно–элементная модель, результаты приведены далее по тексту;
- 2) Сравнение с измеренными значениями тока, протекающего через дрос-

сель-трансформатор, при проходе состава массой 9000 тонн, результаты верификации приведены в 4-й главе данного исследования.

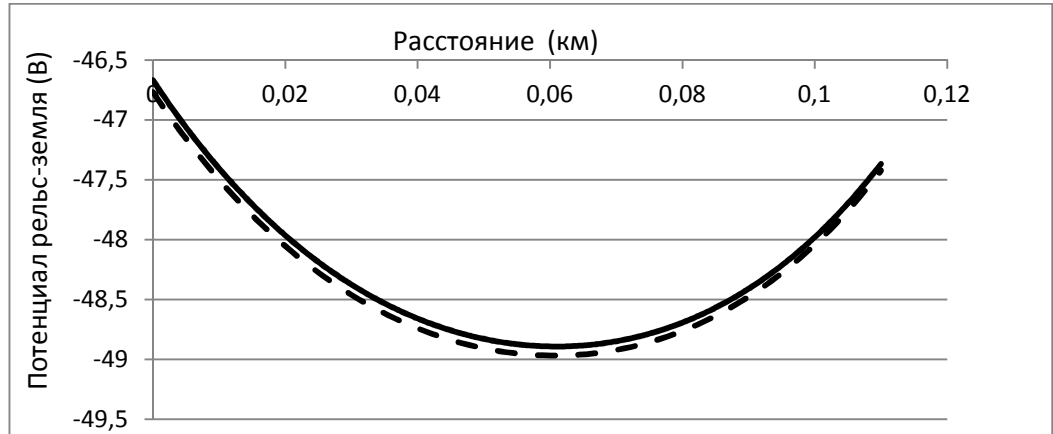
В первой главе для участка с рисунка 1.3 была построена аналитическая модель, позволяющая определить зависимости тока и потенциала рельс–земля при движении локомотивов. В целях верификации для того же участка была построена конечно-элементная модель токораспределения. Так как в аналитической модели рельсовая линия однородна, то и в конечно–элементной модели для всех элементов расчетной области были заданы одинаковые первичные параметры. Обеспечив тем самым идентичность моделируемых участков. Условия моделирования приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – общие условия моделирования участка для верификации конечно–элементной модели

Параметр	Условное обозначение	Значение
Постоянная распространения рельсовой линии	$a$	0.3323, км <sup>-1</sup>
Координата отсоса тяговой подстанции	$X_{тп}$	0, км
Координата расчетной точки	$X_{рт}$	0.9, км
Координата 1-го междупутного соединителя	$X_{p1}$	5.0, км
Координата 2-го междупутного соединителя	$X_{p2}$	16.0, км
Уравнение движения 1-го поезда	$X_{e1}(t)$	15 – 80 · t, км
Уравнение движения 2-го поезда	$X_{e2}(t)$	6 + 70 · t, км
Ток 1-го поезда	$I_{e1}(t)$	1000, А
Ток 2-го поезда	$I_{e2}(t)$	1200, А

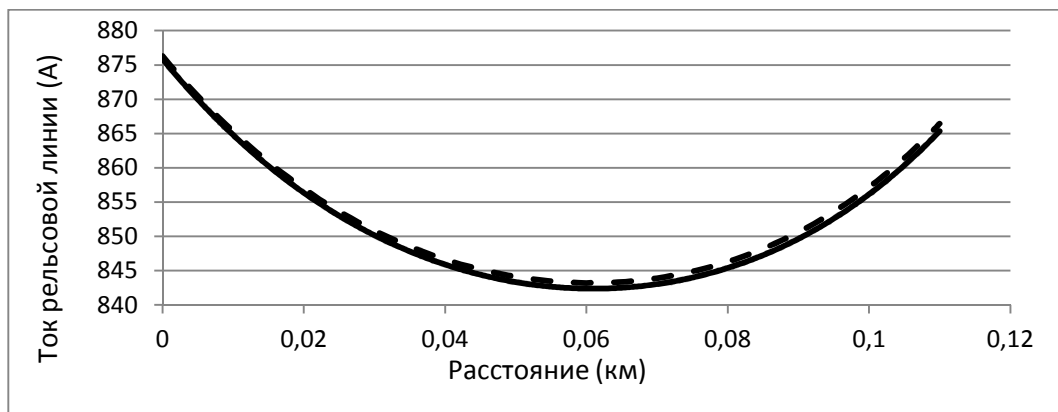
Ошибка моделирования конечно–элементной модели, относительно эталонной аналитической составила 1.5% для потенциала рельс–земля и 1.0% тока в рельсовой линии соответственно. Алгоритм расчета ошибки, аналогичен расчету средней ошибки аппроксимации. Моделирование проводилось для времени

нахождения поездов между координатами  $X_{p1}$  и  $X_{p2}$ . Качественно, степень совпадения результатов моделирования, предлагается оценить по графикам, приведенных на рисунках 2.3 и 2.4.



пунктирная линия – конечно-элементная модель,  
сплошная – аналитическая

Рис. 2.3 – Графики напряжений рельс-земля в расчетной точке



пунктирная линия – конечно-элементная модель,  
сплошная – аналитическая

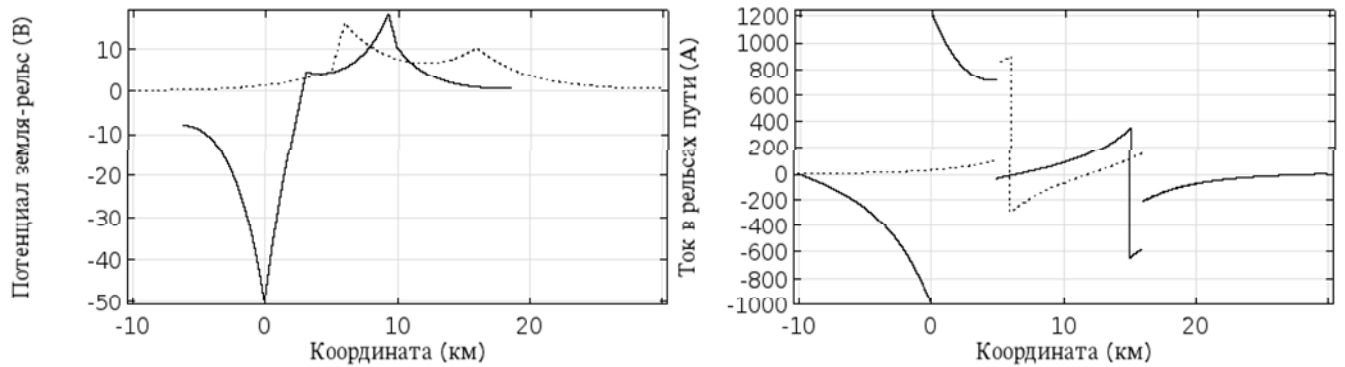
Рис.2.4 – Графики тока в расчетной точке

Настолько точное совпадение результатов моделирования можно объяснить идентичными исходными данными и корректностью применяемых методов.

Использование программной среды *Comsol Multyphysics* открывает большие возможности для пост-обработке результатов моделирования. К примеру: позволяет получить распределение токов и потенциалов рельс-земля в графическом и табличном в любой точке за любой интервал времени. На рисунке 2.5 показаны



графики мгновенных значений потенциала рельс–земля и тока рельсовой линии рассматриваемого участка в начальный момент времени, для других моментов времени данные приведены в приложении А.



сплошная линия – четный путь, пунктирная – нечетный

Рис. 2.5 – Распределение потенциала земля–рельс и тока в рельсах в начальный момент времени

### Моделирование неоднородных рельсовых линий.

Использование программных средств имитационного моделирования, позволяет исследовать поведение смоделированного устройства в различных условиях и режимах работы. Проведение аналогичного натурального эксперимента зачастую невозможно в силу различных объективных причин. Использование имитационного моделирования рельсовой линии позволяет вносить в модель повреждения, изменяющие условия растекания тока в ней.

При ослабленном прижатии накладок токопроводящего стыка, повышается переходное сопротивление накладка–рельс, что обуславливает протекание большей части тока через стыковой приварной соединитель. Максимальное значение тока приварного соединителя ограничено значением в 1000 А [16]. В условиях движения поездов повышенной массы, обратные тяговые токи достигают значений в 4-5 тыс. А, что приводит к быстрому перегоранию соединителя токопроводящего стыка с ослабленным прижатием накладок. Отказы подобного рода приводят к значительной разности потенциалов между смежными рельсами стыка [66].

Внесение в модель подобных отказов, основано на изменении функции удельного сопротивления рельсовой линии от координаты. В точке с координатой отказавшего стыка, значение функции сопротивления рельсовой линии велико, по сравнению с окрестными значениями. Примем для задачи исследования, что переходное сопротивление неисправного токопроводящего стыка составляет 0.1 Ом, что эквивалентно 4.52 км рельса Р75. На рисунке 2.6 показано место внесенной неисправности: в точке с координатой 1 км. На рисунке 2.7, показаны графики тока и потенциала рельс–земля рельсовой линии с отказом, в момент времени 1 секунда от начала процесса моделирования.

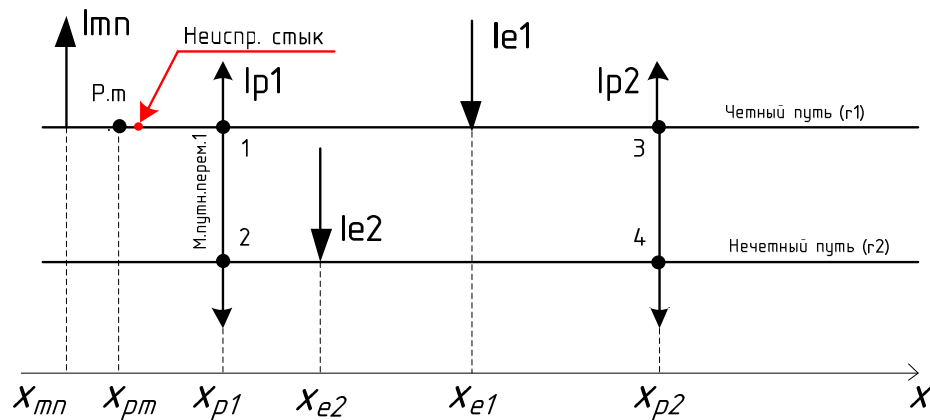
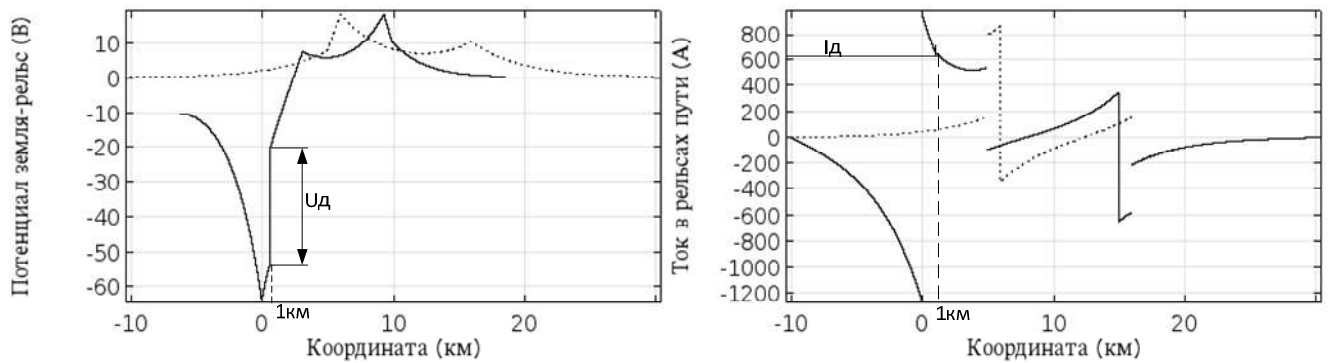


Рисунок 2.6 – Схема рельсовой линии с излома рельса

При повышении сопротивления токопроводящего стыка до 0.1 Ом разность потенциалов между смежными рельсами достигает значения порядка 35 В. В литературе по электросварке [67], указано, что ток в 50 А и напряжение в 80–90 В, создают условия для зажигания электрической дуги, при снижении напряжения до 30–40 В, наблюдается устойчивое горение. Разность потенциалов между смежными рельсами зависит от величины сопротивления токопроводящего стыка и перехода земля-рельс. Поэтому чтобы оценить возможность зажигания электрической дуги с внесенной неисправностью, проведем моделирование на ряде различных переходных сопротивлений стыка и земля-рельс, таблица 2.2. Значения токов, протекающих через неисправный токопроводящий стык, будут рассчитаны ходе моделирования, по исходным данным из таблицы 2.1.

Полученные минимальные значения потенциала в месте отказа приведены в таблице 2.2. Минимальные значения тока, протекающего через место повреждения, сведены в таблицу 2.3. В таблицах 2.2 и 2.3 использованы следующие обозначения:  $\Gamma_{p-z}$  – переходное сопротивление рельс-земля,  $\Gamma_{стык}$  – сопротивление неисправного токопроводящего стыка. Графики, полученные в ходе моделирования аварийного режима работы рельсовой линии, приведены в приложении Б.



$U_d$  – падение напряжения в токопроводящем стыке,

$I_d$  – ток, протекающий через токопроводящий стык

Рисунок 2.7 – Распределение потенциала рельс–земля и тока в неисправной рельсовой линии

Таблица 2.2 – Разность потенциалов в неисправном стыке

$\Gamma_{стык} \backslash \Gamma_{p-z}$	0.1, Ом·км	0.5, Ом·км	1, Ом·км	2, Ом·км
0.01, Ом	-24.9	-54.1	-70.1	-87.2
0.05, Ом	-25.1	-55.7	-73.7	-93.4
0.1, Ом	-25.9	-59.4	-79.8	-103.2
0.3, Ом	-26.2	-63.2	-89.3	-123.1

Таблица 2.3 – Ток протекающий, через неисправный стык

$\Gamma_{стык} \backslash \Gamma_{p-z}$	0.1, Ом·км	0.5, Ом·км	1, Ом·км	2, Ом·км
0.01, Ом	787	1221	1450	1680
0.05, Ом	620	1077	1326	1582
0.1, Ом	504	882	1195	1452
0.3, Ом	214	684	952	1194

Из приведенных в таблицах 2.2 и 2.3 данных следует, что при нормативном сопротивлении изоляции рельсовой линии, равным 1 Ом·км, и сопротивлении неисправного токопроводящего стыка 0.1 Ом создаются условия для зажигания электрической дуги.

## **2.2 Разработка модели теплового расчета дроссель-трансформатора при нестационарном теплообмене**

### **Постановка задачи.**

Тепловые модели трансформаторов, построенные на основе решения уравнения теплового баланса однородного тела, обладают рядом недостатков:

1) Выделение тепла происходит в обмотке трансформатора, далее тепло через масло и стенки корпуса отдается в окружающую среду. Упрощение трансформатора до однородного тела требует расчета эквивалентного коэффициента теплопередачи от масла в окружающую среду, что затруднено в силу нелинейной природы коэффициента теплоотдачи из-за комбинации теплоотдачи конвекцией и излучением, которые пропорциональны различным степеням температуры;

2) Используемый эквивалентный константный коэффициент теплоотдачи в окружающую среду затрудняет корректный учет отданного тепла посредством конвекции и излучения;

Коэффициенты теплоотдачи для масляных трансформаторов определяют в ходе заводских тепловых испытаний, что позволяет в дальнейшем использовать модель однородного тела в инженерных расчетах. Для дроссель-трансформатора такие испытания не проводились и требуемые коэффициенты теплоотдачи в справочной литературе отсутствуют. Особенностью теплового режима работы дроссель-трансформатора является нестационарный характер теплообмена, обусловленный большим динамическим диапазоном значений обратного тягового тока. Постоянные изменения значений тока, обуславливают изменение устано-

вившейся температуры перегрева, выражение (1.8) – каждому значению обратного тягового тока соответствует своя температура перегрева. Если учесть непостоянство значений обратного тягового тока при проходе поезда в конкретной точке рельсовой линии, то в итерационную модель будет внесена еще ошибка усреднения значений обратного тока на временном диапазоне, также требующая численной оценки. Поэтому решение задачи исследования требуют синтез модели теплового баланса дроссель-трансформатора без упрощения последнего до однородного тела и проведение расчета температур элементов его конструкции на основе мгновенных значений обратного тягового тока.

Сформируем требования к модели теплового баланса дроссель-трансформатора:

- рассмотреть процесс нестационарного теплообмена между элементами конструкции дроссель-трансформатора: токовой обмотки, сердечника, масла, корпуса;

- анализ процесса охлаждения корпуса должен включать все виды теплообмена: кондукция, конвекция, излучение;

- учесть нагрев корпуса солнечной радиацией;

- учесть зависимость коэффициентов теплопередачи от температуры охлаждающей среды и разности температур тел.

### **Синтез модели теплового баланса дроссель-трансформатора.**

Тепловой баланс однородного тела в общем виде описывается уравнением [68-70]:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \cdot \nabla T) + \rho \cdot c \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q, \quad (2.4)$$

где  $T$  – средняя температуры тела, °К;

$T$  – поле температуры тела, °К;

$t$  – время нагрева/охлаждения, сек;

$c$  – удельная теплоемкость тел, Дж/(кг·°К);

$\rho$  – плотность тела, кг/м<sup>3</sup>;

$Q$  – объемная плотность мощности источника тепла, Вт/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности Вт/(м·°К).

$\mathbf{u}$  – поле скорости, м/с

$\nabla$  – оператор градиента;

$\nabla \cdot$  – оператор дивергенции.

Первое слагаемое уравнения 2.4 показывает изменение средней температуры однородного тела, второе отражает неравномерность температурного поля, а третье учитывает затраченную тепловую мощность на измерение поля скорости подвижной среды (масла).

Дроссель-трансформатор, с точки зрения теплового расчета, представляет собой систему однородных тел: сердечник, токовая обмотка, сигнальная обмотка, масло, корпус. Соответственно, тепловой баланс такой системы при нестационарном теплообмене описывается системой однородных дифференциальных уравнений аналогичных (2.4), с учетом индивидуальных особенностей тел. К примеру: в твердых телах: корпусе, сердечнике и обмотке теплопередача осуществляется путем кондуктивного теплопереноса, что позволяет не учитывать изменение поле скорости среды, третье слагаемое в выражении (2.4).

Анализ полей температуры и скорости в масле дроссель-трансформатора требует совместного решения уравнений газодинамики и теплопередачи, что выходит за рамки данного исследования. Поэтому в рамках данной работы модель теплового баланса дроссель-трансформатора при нестационарном теплообмене была построена относительно средних температур, система (2.5). Для удобства уравнения были записаны относительно фактических мощностей и масс элементов конструкции.

Отказ от расчета полей температуры и поля скорости масла, приводит к погрешности модели выраженной в отсутствии временной задержки между моментами изменения тепловыделения в токовой обмотке и изменению средней температуры масла. Данное упрощение приводит к снижению инерционности моделируемых тепловых процессов и уменьшению времени достижения установившейся

температуры нагрева при константных тепловых потерях. Следовательно, применение данной модели для определения длительности тепловых процессов даст заниженные результаты времени нагрева – т.е. оставит резерв по тепловой устойчивости дроссель-трансформаторов. При этом учтенные теплообменные процессы, обуславливают достоверность получаемых в ходе моделирования средних значений температур элементов дроссель-трансформатора: корпуса, масла, обмотки, сердечника, с учетом сделанного упрощения физической природы теплового процесса.

$$\begin{cases} \frac{dT_o}{dt} c_o m_o = Q_o^{Дж} - Q_{o-м}^{конв} - Q_{o-м}^{изл} \\ \frac{dT_M}{dt} c_M m_M = Q_{o-м}^{конв} + Q_{o-м}^{изл} - Q_{M-к}^{конв} - Q_{M-с}^{конв} \\ \frac{dT_K}{dt} c_K m_K = Q_{M-к}^{конв} + Q_{сл}^{изл} - Q_{K-в}^{конв} - Q_{K-в}^{изл} - Q_{K-з}^{конд} \\ \frac{dT_c}{dt} c_c m_c = Q_{M-с}^{конв} \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $Q_o^{Дж}$  – нагрев основной обмотки обратным тяговым током, Вт;

$Q_{o-м}^{конв}$  – конвективная теплопередача от токовой обмотки к маслу, Вт;

$Q_{M-к}^{конв}$  – конвективная теплопередача от масла корпусу, Вт;

$Q_{M-с}^{конв}$  – конвективная теплопередача от масла сердечнику, Вт;

$Q_{K-в}^{конв}$  – конвективная теплопередача от корпуса в воздушную среду, Вт;

$Q_{K-з}^{конд}$  – кондуктивная теплопередача от корпуса в грунт, Вт;

$Q_{K-в}^{изл}$  – передача тепла от корпуса в окружающую среду излучением, Вт;

$Q_{o-м}^{изл}$  – передача тепла от токовой обмотки в масло излучением, Вт;

$Q_{сл}^{изл}$  – нагрев корпуса солнечной радиацией;

$m$  – масса конструктивного элемента, кг.

В данной системе не учтен ряд параметров в силу их ничтожного влияния на тепловые режимы работы дроссель-трансформатора:

– нагрев дополнительной (сигнальной) обмотки сигнальным током, так как по технологии заправки дроссель-трансформатора маслом она не погружается в масло и не участвует в рассматриваемых процессах теплопередачи;

– не учтены тепловые потери на вихревые токи в сердечнике трансформатора, так как исследуются дроссель-трансформаторы постоянного тока.

Рассмотрим аналитические выражения для определения выделившихся и поглощенных тепловых мощностей.

Величина  $Q_o^{Дж}$ , указывает на резистивный нагрев основной обмотки обратным тяговым током, и определяется из следующего выражения [68]:

$$Q_o^{Дж} = \frac{r_0}{S} I_{т.т.}^2 L (1 + \alpha_R (293 - T_o)), \quad (2.6)$$

где  $r_0$  – удельное электрическое сопротивление материала обмотки, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$S$  – площадь поперечного сечения обмотки, мм<sup>2</sup>;

$L$  – длина обмотки, м;

$I_{т.т.}$  – значение обратного тягового тока, А;

$\alpha_R$  – температурный коэффициент изменения электрического сопротивления материала обмотки, К<sup>-1</sup>;

$T_o$  – фактическая температура обмотки, К;

Величина  $Q_{сл}^{изл}$ , определяет мощность потока солнечного излучения, приходящуюся на освещенную сторону корпуса дроссель-трансформатора:

$$Q_{сл}^{изл} = \varepsilon \cdot d \cdot Q_{сл}^{гл} \quad (2.7)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент серости поверхности дроссель-трансформатора;

$d$  – площадь освещаемой поверхности, м<sup>2</sup>;

$Q_{сл}^{гл}$  – удельный поток солнечной радиации на поверхность, Вт/м<sup>2</sup>.

Величина  $Q_{сл}^{гл}$  зависит от географической широты и погодных условий, определяется опытным путем на основе метеорологических наблюдений. В источнике [71] приводятся данные по величине  $Q_{сл}^{гл}$ , в зависимости от широты при безоблачном небе. Практика использования солнечных батарей [72] показывает, что при облачности в 50%,  $Q_{сл}^{гл}$  – уменьшается примерно на 25–30%, а при облач-



ности 100% – примерно, на 70–75%.

Величина  $Q_{0-м}^{конв}$  – определяет тепловую мощность, переданную от обмотки маслу путем конвективного теплопереноса,  $Q_{м-к}^{конв}$  – определяет передачу мощности от масла к корпусу,  $Q_{м-с}^{конв}$  – определяет перенос теплоты от масла сердечнику. Данные величины определяются из выражений общего вида:

$$Q^{конв} = h \cdot S(T_1 - T_2), \quad (2.8)$$

где  $h$  – удельный конвективный коэффициент теплоотдачи от масла твердому телу, Вт/(м<sup>2</sup>·°К);

$S$  – площадь поверхности, участвующая в конвективном теплопереносе, м<sup>2</sup>;

$T_1, T_2$  – текущие средние температуры твердого тела и масла °К.

Определим удельный конвективный коэффициент теплоотдачи от масла твердому телу из соотношения для критерия Нюссельта [71]:

$$h = Nu \cdot \lambda/d, \quad (2.9)$$

где  $Nu$  – критерий Нюссельта (критерий теплоотдачи);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности масла при заданной температуре, Вт/(м·°К);

$d$  – характеристический размер обмотки, м<sup>2</sup>.

Для определения критерия Нюссельта воспользуемся общей формулой М.А.Михеева для тел любой формы погруженных в капельные жидкости [73, ф. (13–16)]:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \quad (2.10)$$

где  $Gr$  – критерий Грасгофа;

$Pr$  – критерий Прандтля;

$C$  и  $n$  – константные значения, приведенные в [73], таблица 13-1.

Процедура расчета заключается в вычислении произведения критериев Грасгофа и Прандтля, по известным в теплотехнике формулам и определения числа Нюссельта. Данные расчета приведены в таблице 2.4, значения констант  $C$  и  $n$  равны 0,135 и 1/3 соответственно. Физические параметры трансформаторного масла взяты из общедоступных справочников и не приводятся в данной работе.

Таблица 2.2 – Расчет коэффициента теплопередачи между маслом и металлическими частями дроссель-трансформатора

<b>T (°C)</b>	<b>Pr</b>	<b>Gr</b>	<b>PrGr</b>	<b>Nu</b>	<b>h (Вт/м<sup>2</sup>*К)</b>
0	866	7509256103	6,50302E+12	2519,83	219,02
20	298	25706698413	7,6606E+12	2661,26	227,81
40	146,5	61264235109	8,97521E+12	2805,53	236,69
60	87,8	1,18306E+11	1,03873E+13	2945,56	244,40
80	59,3	2,02054E+11	1,19818E+13	3089,17	252,49
100	43,9	3,09967E+11	1,36076E+13	3223	258,94

Табличные значения не удобны для автоматизированного расчета температур, поэтому проведем аппроксимацию значений коэффициента теплоотдачи. В среде Excel было получено следующее уравнение, устанавливающее соответствие между абсолютной температурой масла и искомым коэффициентом теплопередачи от масла твердому телу ( $R=0.9974$ ):

$$h = 0.4019 \cdot T_m + 110.09, \quad (2.11)$$

где  $T_m$  – абсолютная температура масла, К.

Исследование ошибки аппроксимации показало пренебрежительно малое значение: 0,01%. Применение данного уравнения допускается в диапазоне абсолютных температур от 273К, до 408К. Нижняя граница обусловлена отсутствием данных по кинематической вязкости масла при отрицательных температурах (по шкале Цельсия) и невозможности численного определения критерия Грасгофа. Верхнее значение ограничено началом процесса кипения масла, что вносит не учитываемое в данной модели увеличение теплоотдачи при фазовом превращении

жидкости с границы раздела сред масло–воздух.

Величина  $Q_{\text{к-в}}^{\text{конв}}$  – определяет тепловые потери с корпуса дроссель-трансформатора путем конвективного теплопереноса в воздушную среду и находится из выражения 2.12:

$$Q_{\text{к-в}}^{\text{конв}} = h_{\text{к}} \cdot S_{\text{охл}} (T_{\text{корп}} - T_{\infty}), \quad (2.12)$$

где  $h_{\text{к}}$  – удельный конвективный коэффициент теплоотдачи от корпуса к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·°К);,

$S_{\text{охл}}$  – площадь поверхности корпуса, участвующая в конвективном теплопереносе, м<sup>2</sup>;

$T_{\text{корп}}$  – температура корпуса, К;

$T_{\infty}$  – температура удаленного воздуха, К;.

Сложность определения коэффициента конвективной теплоотдачи в данном случае определяется различными условиями охлаждения, зависящими от свойств воздушной среды и рассматриваемой поверхности охлаждения. Для данной модели будем учитывать средний коэффициент теплоотдачи, зависящий от разности температур корпуса дроссель-трансформатора и скорости ветра, определяемый исходя из зависимостей, приведенных в [73]. Так для режима свободной конвекции, при отсутствии ветра, коэффициент конвективной теплоотдачи определим из выражения [73, ф. 9–19]:

$$h^{\text{своб}} = 2,5 \cdot \tau^{0,25} \left( \frac{293}{T_{\text{к}}} \right)^{0,25} P_{\text{атм}}^{0,5} \quad (2.13)$$

где  $\tau$  – превышение температуры корпуса над температурой воздуха, К;

$T_{\text{к}}$  – абсолютная температура корпуса, К;

$P_{\text{атм}}$  – барометрическое давление в долях единицы, причем за единицу принято давление в 760мм рт.ст.

При наличии ветра охлаждение происходит в режиме вынужденной конвекции, изменение коэффициента теплоотдачи в этом случае описывается следую-

щей формулой [73, ф. 9–246]:

$$h = h^{\text{своб}} + 4.2v, \quad (2.14)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с.

Величина  $Q_{\text{к-в}}^{\text{изл}}$  характеризует потерю тепла корпусом путем излучения и определяется:

$$Q_{\text{к-в}}^{\text{изл}} = \varepsilon \cdot S \cdot C_{sb} (T_{\text{корп}}^4 - T_{\infty}^4), \quad (2.15)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент серости поверхности корпуса дроссель-трансформатора;

$S$  – площадь поверхности излучения, м<sup>2</sup>;

$C_{sb}$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $C_{sb} = 5.670367 \cdot 10^{-8}$  Вт · м<sup>-2</sup> · К<sup>-4</sup>.

В землю передача тепла осуществляется путем теплопроводности и зависит от степени шероховатости поверхностей, коэффициента теплопроводности подстилающей поверхности и определяется по закону Фурье:

$$Q_{\text{к-з}}^{\text{конд}} = -\lambda \cdot S_3 \cdot \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (2.16)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·К);

$S_3$  – общая площадь погруженной в землю части дроссель-трансформатора, м<sup>2</sup>;

$n$  – нормаль к поверхности нагрева;

$\frac{\partial t}{\partial n}$  – градиент температуры среды у поверхности нагрева.

В [73,74] показано, что температурный градиент у поверхности стенки можно приблизительно выразить уравнением  $\frac{\partial t}{\partial n} = -\frac{\Delta t}{\delta_T}$ ,  $\Delta t$  – это изменение температуры в слое толщиной  $\delta_T$ , поэтому:

$$Q_{\text{к-з}}^{\text{конд}} = \lambda \cdot S_3 \cdot \frac{(T_{\text{к}} - T_3^{\delta})}{\delta}, \quad (2.17)$$

где  $T_3^\delta$  – температура земли на расстоянии  $\delta$  от стенки корпуса дроссель-трансформатора.

В рассматриваемом случае удобно оперировать расстоянием, на котором можно пренебречь нагревом грунта дроссель-трансформатором и считать его температуру постоянной. Для численной оценки этого расстояния в практике оперируют понятием термического сопротивления, полученным экспериментальным путем для разных типов грунтов. В [73] указано, что термическое сопротивление определяется отношением толщины стенки к теплопроводности материала  $\left(\frac{\delta}{\lambda}\right)$ . Следовательно, тепловая мощность, отданная заглубленной частью дроссель-трансформатора, может быть определена из выражения:

$$Q_{\text{к-з}}^{\text{конд}} = \frac{1}{R_{\text{г}}^{\text{T}}} \cdot S_{\text{з}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{г}}), \quad (2.18)$$

где  $R_{\text{г}}^{\text{T}}$  – значение термического сопротивления грунта, К/Вт;

$T_{\text{г}}$  – температура поверхности удаленного грунта.

Рассмотренная аналитическая модель (2.5), представленная системой дифференциальных уравнений, не имеет символьного решения, применимого на практике. Поэтому для решения данной системы предлагается использовать численный метод, Рунге–Кутты 4–5 порядка с динамическим шагом и контролем ошибки, реализованный во множестве математических пакетов (*Maple, Mathlab, Mathematica*). При практическом использовании предлагаемой модели в системах мониторинга, реализация данного метода решения также не вызовет трудностей у программистов.

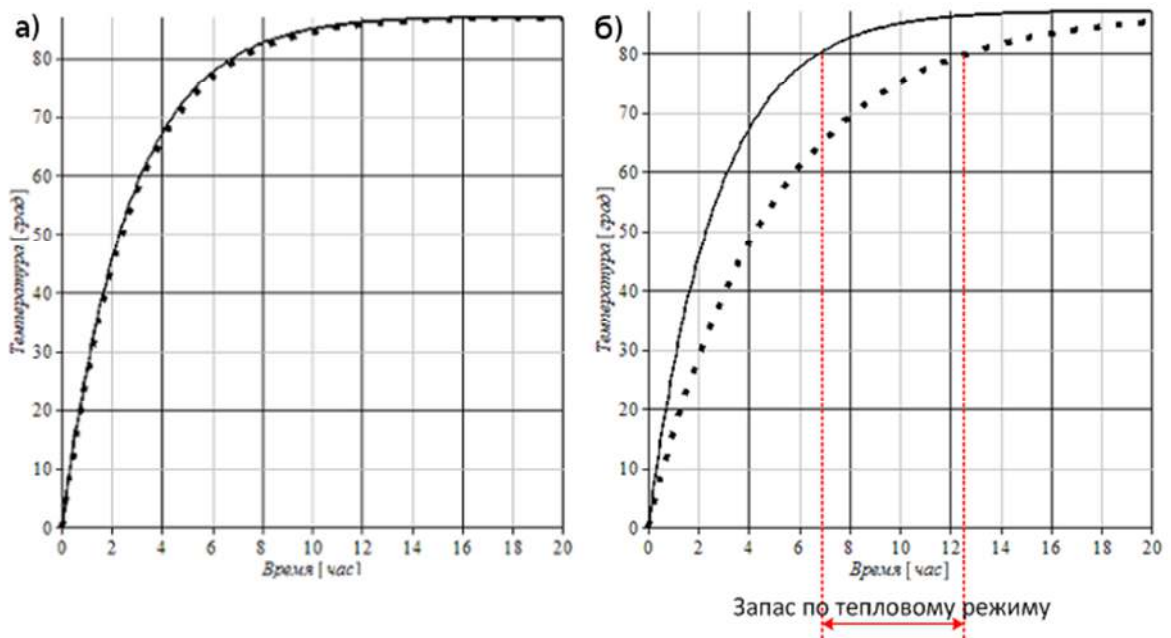
### **Верификация модели теплового баланса.**

Верификация модели теплового баланса дроссель-трансформатора включала два этапа:

- 1) Сравнение с аналитической моделью, приведенной в исследовании [5] при аналогичных настройках, результаты приведены далее по тексту;
- 2) Сравнение с измеренными значениями температуры верхних и нижних

слоев масла, проведенные на дроссель-трансформаторе при проходе состава массой 6200 тонн, результаты приведены в 4-й главе диссертации.

Для сравнения с аналитической моделью приведенной ранее, в п.п. 1.2, необходимо провести настройку разработанной модели. В эталонной модели опосредованно учитывается влияние сердечника дроссель-трансформатора на длительность тепловых процессов с коэффициентом 0.1, поэтому массу сердечника установим в 10% от фактической. Эталонная модель не учитывает нагрев корпуса солнечной радиацией и излучение с корпуса, поэтому установим нулевой коэффициент серости поверхности дроссель-трансформатора, что обнулит указанные тепловые мощности. Остальные параметры модели возьмем из описания, приведенного в [5]. На рисунке 2.8.а приведены результаты моделирования нагрева дроссель-трансформатора, при тепловыделении 840 Вт в токовой обмотке, эталонной и разработанной моделью. Разработанная модель позволяет полностью учесть влияние сердечника дроссель-трансформатора на длительность теплового процесса, рисунок 2.8 б.



а) – настройка разработанной модели соответствует эталонной,

б) – учтено влияние сердечника на длительность теплового процесса

Рисунок 2.8 – результаты верификации модели теплового баланса

Совпадение графиков с рисунка 2.8.а объясняется идентичностью исходных данных, и позволяет сделать вывод о корректности разработанной модели.

Разработанная модель теплового баланса позволила исследовать влияние на установившуюся температуру перегрева масла внешних факторов, определить эквивалентные коэффициенты теплоотдачи с корпуса, для дальнейшего использования их в итерационных моделях, аналогичной (1.6). Результаты исследования приведены в приложении В.

### **Определение неоднородности поля температур.**

Разработанная аналитическая модель позволяет определять средние значения температуры конструктивных элементов дроссель-трансформатора. Тепловая мощность, выделяемая в токовой обмотке согласно выражению 2.6, является функцией температуры обмотки. Поэтому учет средней температуры обмотки внес в модель погрешность расчета тепловыделения, требующую численной оценки.

Токовая обмотка дроссель-трансформаторов ДТ–0.2–1000, ДТ–0.6–1000, ДТ–0.2–1500, ДТ–0.4–1500 набрана из слоев медной ленты, теплопередача между которыми осуществляется теплопереносом через пики шероховатости, которыми слои контактируют между собой. Поэтому считать температурное поле обмотки однородным некорректно и необходимо исследование влияние неоднородности на тепловыделение.

Для исследования указанного вопроса была построена, двухмерная конечно–элементная модель охлаждения сечений витка обмотки в масле. Разработка модели охлаждения сечения обмотки выполнена в программе *Comsol Multyphysics*. Геометрия модели с расчетной сеткой представлена на рисунке 2.9.

Задана система уравнений Навье–Стокса в нестационарной форме [68,74] и уравнения неразрывности потока (2.20).

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} p \cdot (u \cdot \nabla) u - \nabla \cdot [-p \cdot E + \eta(\nabla u + (\nabla u)^t)] = F_{\text{внш}}; \\ \nabla \cdot u = 0 \end{cases}, \quad (2.20)$$

где  $u$  – вектор скорости, м/с;

$p$  – скаляр давления, Па;

$\eta$  – скаляр динамической вязкости масла, Па·с;

$\rho$  – скаляр плотности, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – время моделирования, с;

$F_{\text{внш}}$  – вектор внешней объемной силы, Н/м<sup>3</sup>;

$E$  – единичная матрица;

$\nabla$  – оператор градиента;

$\nabla \cdot$  – оператор дивергенции.

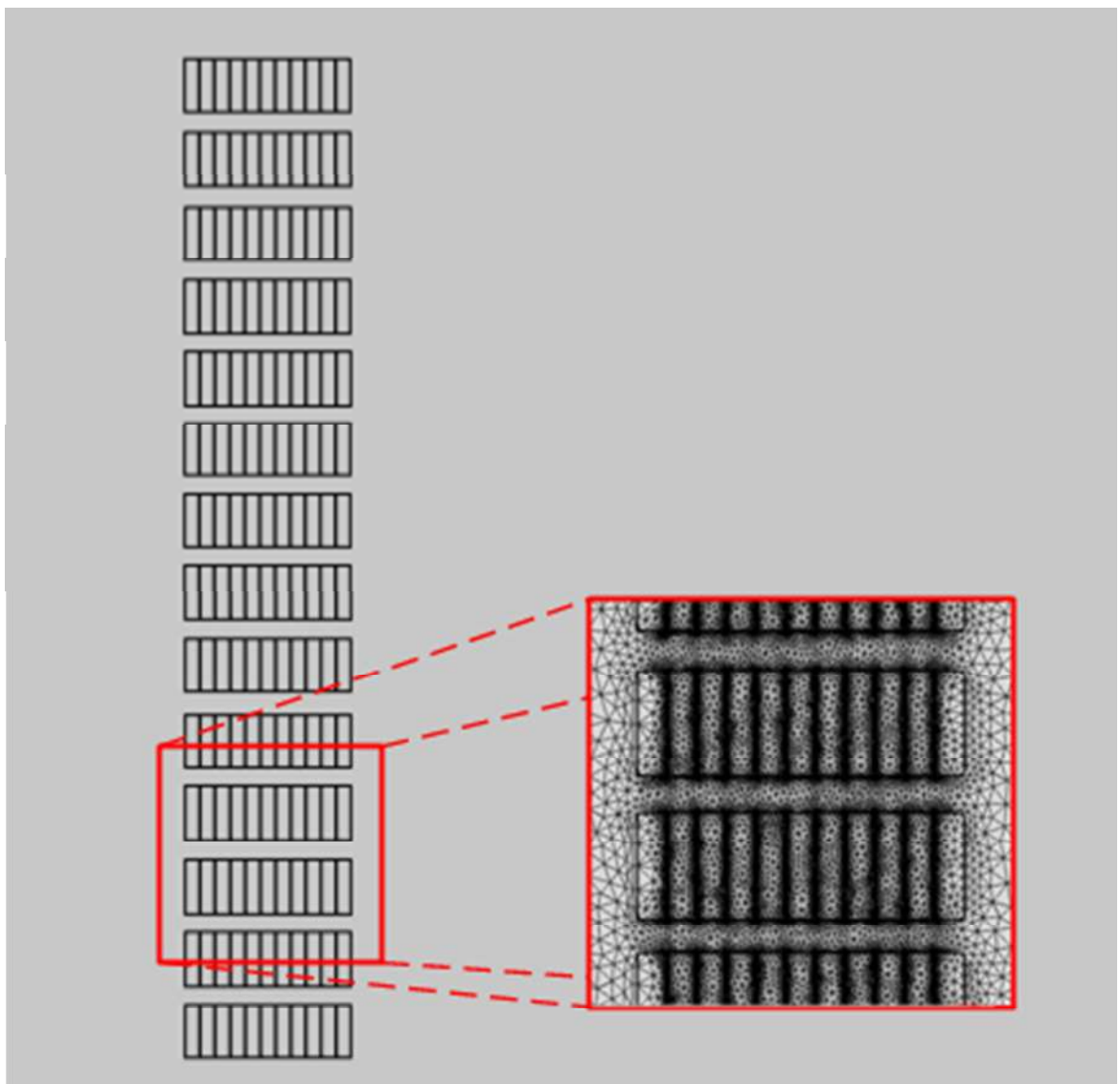


Рисунок 2.9 – Геометрия двухмерной модели охлаждения сечения токовой обмотки дроссель-трансформатора



Источником тепла в модели является обмотка, нагреваемая протекающим током. Поэтому температура обмотки больше температуры окружающего масла. Соприкасаясь с обмоткой, масло нагревается, поэтому температура масла в различных местах расчетной области различно. В результате чего физические свойства масла, входящие в уравнение гидродинамики, в местах нагрева меняются: плотность и динамическая вязкость падает с ростом температуры.

Поля плотности и динамической вязкости зависят от поля температуры масла, поэтому необходимо решить задачу охлаждения обмотки маслом. Решение данной задачи основывается на решении уравнения нестационарного теплообмена, учитывая конвективный и кондуктивный теплоперенос (2.21).

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \cdot \nabla T) + \rho \cdot c \cdot u \cdot \nabla T = Q, \quad (2.21)$$

где  $Q$  – объемная плотность мощности источника тепла, Вт/м<sup>3</sup>.

Для масла объемная мощность источника тока будет равна 0, т.к. масло не является источником тепла, а для обмотки будет определяться пропорционально протекающему току (2.6).

Нагретое масло вследствие меньшей плотности поднимается вверх, для учета этого факта определим, вертикальную составляющую внешней действующей силы, в системе (2.20) равной объемному весу масла:

$$F_{\text{внш}} = -g_c \cdot \rho, \quad (2.22)$$

где  $g_c$  – ускорение свободного падения,  $g_c = 9.81 \text{ м/с}^2$ .

В выражении нестационарного теплообмена 2.21 входит вектор скорости потока масла  $\mathbf{u}$ , что означает зависимость поля температуры от поля скорости и давления. Поэтому задача охлаждения обмотки маслом связывает два физических процесса: гидродинамики и теплопередачи. Поэтому решение возможно только в нестационарной форме, с нахождением в каждый момент времени всех связанных полей: скорости  $\mathbf{u}$ , давления  $\mathbf{p}$  и температуры  $T$ . Для этого требуется совместное

решение уравнений (2.20), (2.21), (2.22).

Граничные условия для совместного решения указанных уравнений задаются на всю расчетную область. По границам примыкания масла к телу обмотки задано граничное условие «без скольжения», указывающее полную остановку потока масла. По границам расчетной области масла задано граничное условия для режима теплопередачи – температура неизменна и равна температуре окружающей среды и задано условие расчета потока тепла через границу – «без тепловой изоляции».

В начальный момент времени температура всех элементов геометрии модели одинакова и равна температуре окружающей среды, что позволяет задать начальные условия для совместного решения уравнений (2.20), (2.21), (2.22).

#### **Неоднородность температурного поля сечения витка обмотки.**

Слои медной ленты, из которых набрана токовая обмотка, не всегда плотно прилегают друг к другу. На изгибах обмотки расстояние между слоями ленты 1-4 мм, заполненное трансформаторным маслом. Поэтому был рассмотрен наихудший случай – когда между слоями ленты находится масло. Толщина вязкого подслоя в масле составляет по разным оценкам 2-5 мм, поэтому между слоями ленты теплопередача через масло будет осуществляться теплопроводностью, рисунок 2.10.

Исследование процесса нагрева витка обмотки проходило при следующих условиях:

- Начальная температура масла и всей обмотки 25°C;
- Ток, протекающий через обмотку 1000А.

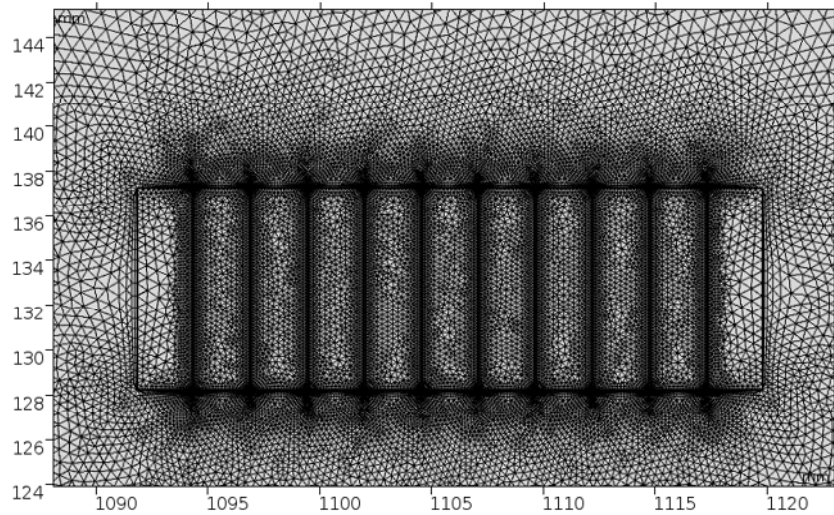


Рис. 2.10 – Двумерная модель сечения витка обмотки с расчетной сеткой

На рисунке 2.11 представлен график зависимости средней температуры сечения от времени эксперимента.

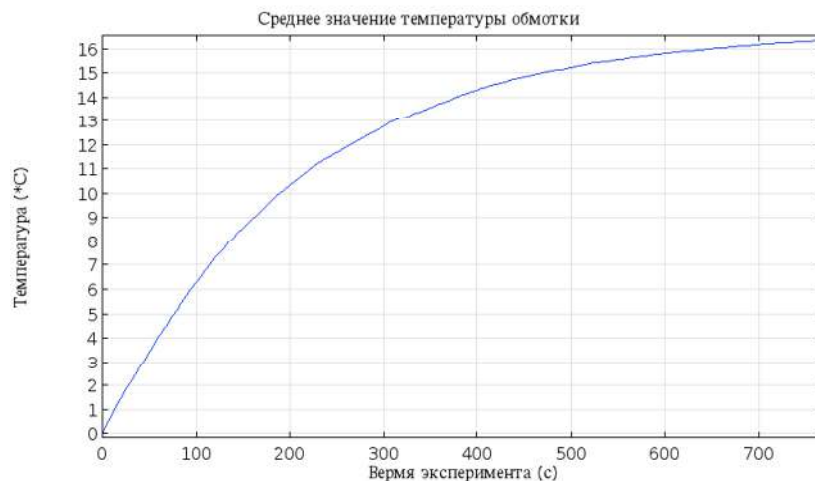


Рис. 2.11 – Значение средней температуры витка обмотки

К моменту времени 12 минут от начала эксперимента, достигается установившейся тепловой режим, прекращается рост температуры витка обмотки при неизменной температуре масла. На рисунке 2.12 белыми стрелками показано направления поля температуры в обмотке, а малиновыми поле скорости масла на 12-й минуте эксперимента. На рисунке 2.13 показан график температуры слоев медной ленты. Разница в температурах внутреннего и наружных слоев ленты составила  $3.6^{\circ}\text{C}$ .

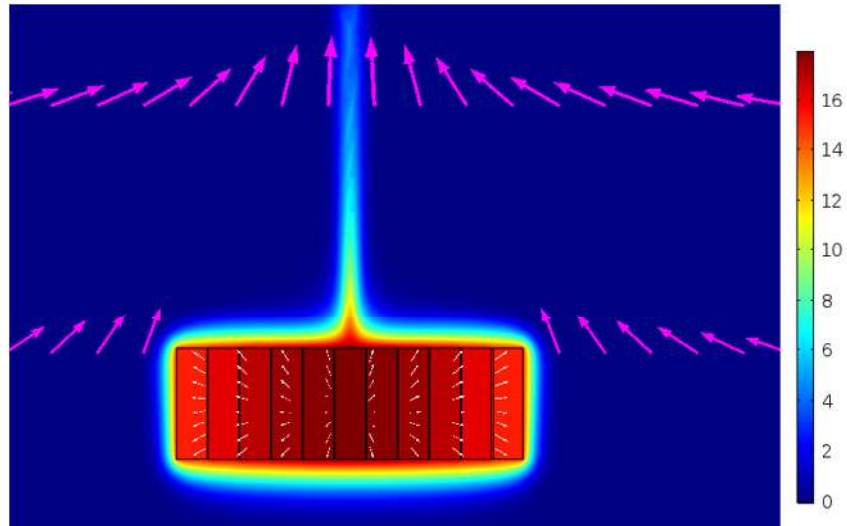


Рис. 2.12 – Температурное поле витка обмотки

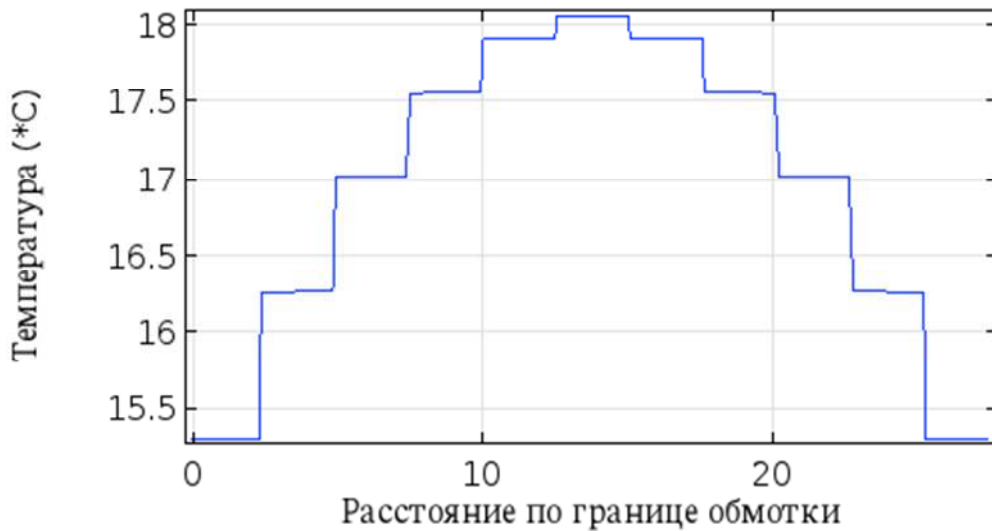


Рис. 2.13 – Неравномерность температурного сечения поля витка обмотки.

### **Неоднородность температурного поля в вертикальном сечении обмотки.**

Температура слоев масла по высоте неодинакова, поэтому условия охлаждения верхних и нижних витков токовой обмотки различны. Для численной оценки разницы была построена модель аналогичная приведенной ранее, в системе моделирования *ComsolMultyphysics*. Отличается только геометрия модели, решаемые уравнения, начальные и граничные условия аналогичны моделированию охлаждения сечения витка обмотки. Направление и скорость движения масла и температура сечения обмотки показана на рисунке 2.14, график неравномерности

поля температуры приведен на рисунке 2.15.

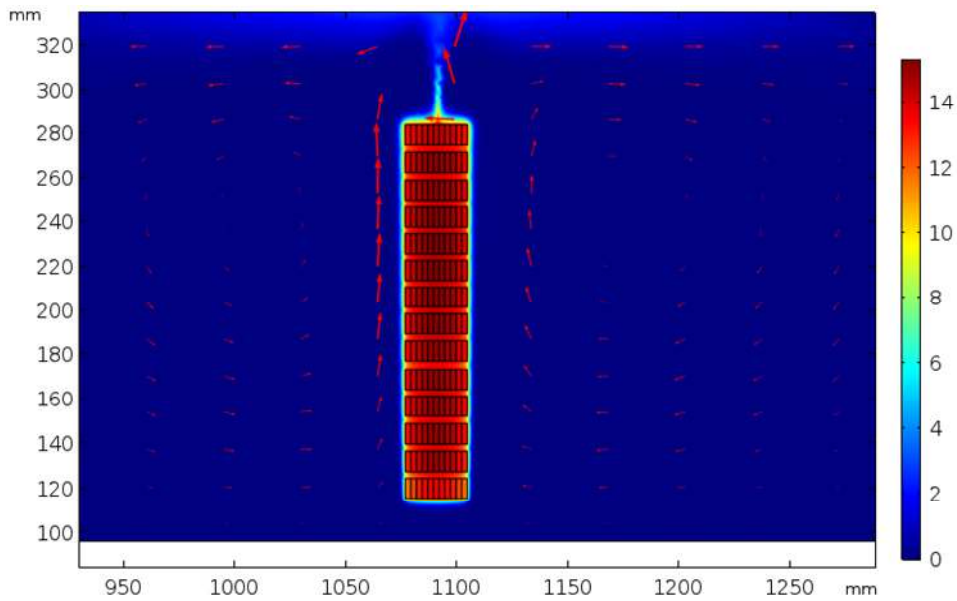


Рис 2.14 – Нагрев сечения обмотки

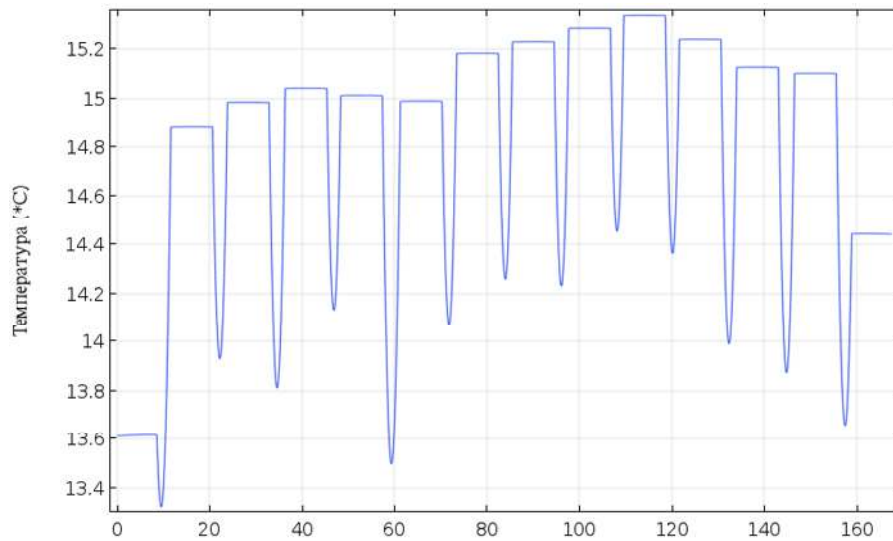


Рис 2.15 – Неравномерность поля сечения обмотки

В вертикальном сечении, неравномерность температурного поля составила  $2^{\circ}\text{C}$ . Полученные неравномерности температурного поля обмотки обуславливают незначительную ошибку определения тепловыделения, что позволяет ограничиться в модели теплового баланса дроссель-трансформатора (2.5) средним значением температуры обмотки и учетом температурного коэффициента изменения электрического сопротивления материала токовой обмотки.

## Выводы

В данной главе были решены следующие задачи исследования:

1. Разработана и верифицирована модель расчета токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов с применением метода конечных элементов, позволившим дискретизировать уравнения длинной линии по пространству и задать первичные параметры линии как функцию координаты;
2. Разработана и верифицирована модель теплового баланса дроссель-трансформатора при нестационарном теплообмене. Разработанная модель позволяет определять средние значения температур конструктивных элементов дроссель-трансформатора, учитывает процессы передачи тепловой мощности между конструктивными элементами дроссель-трансформатора и охлаждающей средой.

### **3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСОВАНИЯ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ**

#### **3.1 Формирование списка диагностических параметров рельсовой линии**

Вопросу повышения эксплуатационной надёжности и влиянию отказов средств автоматики на эффективность перевозочного процесса посвящено множество научных работ и нормативных документов [75-97]. Концептуально, решение вопроса снижения негативного эффекта от отказов лежит в двух плоскостях: совершенствование аппаратуры автоматики и совершенствование методов эксплуатации. Развитие методов эксплуатации, в настоящее время, идет по пути увеличения роли систем, контролирующих режимы работы инфраструктурного комплекса. Данная концепция закреплена в стратегии развития ОАО «РЖД» [1], где прямо ставится задача дальнейшего совершенствования систем мониторинга.

Согласно [59] для диагноза технической системы необходим набор диагностических параметров, отражающий ее фактическое состояние. В работе [98] указывается, что формирование набора диагностических параметров осуществляется в соответствии с режимами диагностирования. Выделяют несколько режимов диагностирования, которым соответствуют различные совокупности диагностических параметров:

- контроль правильности функционирования системы;
- контроль работоспособности системы;
- поиск места отказа системы;
- прогнозирование состояния системы.

Для рельсовой линии, как части инфраструктурного комплекса, от работоспособности которого зависит устойчивая работа средств интервального регулирования и тягового электроснабжения, наиболее логичным видится реализация контроля работоспособного состояния.

Работоспособным считаем такое состояние рельсовой линии при котором:

- обеспечиваются нормативные тепловые режимы работы дроссель-трансформаторов;
- исключаются отказы рельсовых цепей связанные с насыщением магнитопровода дроссель-трансформатора током асимметрии;
- коэффициент готовности инфраструктурного комплекса не ниже допустимого минимального значения, равного 0.96 для двухпутных электрифицированных участков [2].

Каждый диагностический параметр из совокупности обладает рядом свойств:

- чувствительность – определяет возможность приращения диагностического параметра при изменении структурного элемента;
- однозначность – каждое изменение структурного параметра должно вызывать измерение диагностического;
- стабильность – дисперсия диагностического параметра при константном структурном;
- информативность – мера снижения исходной энтропии состояния объекта после измерения диагностического параметра

Совокупность диагностических параметров характеризуется полнотой контроля состояния объекта диагноза. В совокупность включают основные технические требования к узлу или системе.

Критерии работоспособности позволяет сформировать совокупность диагностических параметров, для контроля состояния рельсовой линии исходя из нормативных требований к показателям устойчивой работы рельсовой цепи, таблица 3.1



Таблица 3.1 – Совокупность диагностических параметров рельсовой линии

Параметр	Алгоритм расчета
Коэффициент токовой нагрузки	Отношение максимального значения обратного тягового тока к усредненному
Максимальная температура масла дроссель-трансформатора	Выбор наибольшего значения из совокупности
Средняя температура масла	Среднегармоническое взвешенное значение
Средний коэффициент асимметрии	Среднегармоническое взвешенное значение
Обобщённый коэффициент нагрузки на дроссель-трансформатор	п.п. 3.2 данной рукописи
Коэффициент готовности рельсовой линии по асимметрии обратного тягового тока	п.п. 3.3 данной рукописи

Коэффициент токовой нагрузки показывает отношение максимального значения обратного тягового тока к усредненному значению.

Обобщённый коэффициент нагрузки показывает насколько фактическая нагрузка отличается от номинальной. Численно, данный параметр равен поправочному коэффициенту к интенсивности отказов, поэтому его определение произведено с использованием положений теории надежности.

Коэффициент готовности рельсовой линии по параметру асимметрии отражает достаточность текущего уровня симметрии рельсовой линии для пропуска токовой нагрузки с исключением отказов рельсовых цепей из-за насыщения магнитопровода дроссель-трансформатора.

Предложенные в данной главе методы являются основой для расчета коэффициента использования нагрузочной способности рельсовой линии. Данный коэффициент согласно [2], не рассчитывается на текущий момент.

### 3.2 Определение интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом токовой и тепловой нагрузки

#### Теоретические основы учета нагрузки при расчете параметров надежности.

Проблема влияния фактической нагрузки в условиях эксплуатации на характеристики надежности электротехнических систем, нашла широкое отражение в научных исследованиях [99-104]. В классической литературе по теории надежности приводится наиболее общий способ – определение поправочного коэффициента к параметру потока отказов. Данный коэффициент показывает как изменяется значение параметра потока отказов при нагрузке узла отличающейся от номинальной [102,103].

В условиях нормальной эксплуатации систем железнодорожной автоматики поток отказов принято считать простейшим [92,95], поэтому параметр потока отказов численно равен интенсивности отказов, что существенно упрощает определение характеристик надежности. Модель учета влияния нагрузки на узлы систем железнодорожной автоматики можно записать как:

$$\lambda_{э} = \alpha \cdot \lambda_{н}, \quad (3.1)$$

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

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

$\alpha$  – поправочный коэффициент.

Нормальными условиями эксплуатации считают, эксплуатацию изделия при нормальных климатических условиях [105] и при номинальной нагрузке. Для разных элементов систем, критичными считаются различные параметры нагрузки, так для резисторов, трансформаторов, полупроводниковой техники это значения протекающего тока [102,104].

Дроссель-трансформатор представляет собой точное изделие, к которым

также относятся трансформаторы и дроссели, ненормативные значения протекающего тока и повышенная температура масла обуславливают их ускоренное старение, т.е. уменьшается время наработки до отказа и повышается интенсивность отказов. Поэтому, поправочный коэффициент к интенсивности отказов определим как функцию тока (коэффициента нагрузки) [102] и температуры дроссель-трансформатора:

$$\alpha = f(T, K), \quad (3.2)$$

где  $T$  – температура, °С;

$K$  – коэффициент нагрузки, вычисляемый из выражения:

$$K = \frac{I_э}{I_n}, \quad (3.3)$$

где  $I_э$  – значение тока в режиме эксплуатации, А;

$I_n$  – номинальное значение тока, А.

Согласно [102,103] значения поправочных коэффициентов представляют собой дискретное пространство величин, полученных на основе анализа параметров надежности большого числа однотипных изделий, работающих в сходных условиях. В справочной литературе [103,106] значения поправочных коэффициентов представлены в виде набора графиков, либо в виде таблиц значений, таблица 3.2.

Оперирование дискретными множествами в аналитических моделях, затруднено [107,108], поэтому необходимо в рамках данного исследования получить аналитическую зависимость поправочного коэффициента от температуры и токовой нагрузки, аппроксимировав данные из справочной литературы.

Таблица 3.2 – Значения поправочного коэффициента к интенсивности отказов  
для мотоцикльных изделий

Температура, °С	Коэффициент нагрузки, К						
	К=0,4	К=0,5	К=0,6	К=0,7	К=0,8	К=0,9	К=1,0
20	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,0
25	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	1,3
30	0,1	0,2	0,3	0,6	1,0	1,4	1,6
35	0,1	0,2	0,4	0,9	1,3	1,9	2,5
40	0,2	0,2	0,5	1,2	1,8	2,4	3,0
45	0,2	0,3	0,6	1,4	2,3	3,2	4,2
50	0,2	0,3	0,8	1,8	2,8	4,0	5,2
55	0,2	0,3	1,0	2,2	3,5	5,2	6,9
60	0,3	0,4	1,2	2,5	4,1	6,4	8,6
65	0,3	0,5	1,6	3,4	5,7	8,5	11,5
70	0,4	0,6	2,0	4,2	7,2	10,7	14,0

### **Регрессионная модель определения интенсивности отказов дроссель-трансформатора.**

Задача аппроксимации данных из таблицы 3.2, для получения аналитической зависимости, может быть решена с применением методов регрессионного анализа данных. Получение модели наиболее полно приближенной к исходным данным происходит в несколько этапов. На первом этапе получают ряд уравнений различного вида, отличающихся количеством слагаемых, степенями аргументов и т.д. На втором этапе по заданным критериям адекватности происходит селекция наиболее подходящего варианта [109,110].

В литературе по теории надежности [102] указано, что искомая зависимость носит экспоненциальный характер, что конкретизирует вид уравнения регрессии. Оценивать качество уравнений регрессионных моделей принято оценивать по средней ошибке аппроксимации и определять значимость коэффициентов уравнений по критерию Фишера. Средняя относительная ошибка аппроксимации

показывает: насколько полученная модель точно предсказывает искомые значения и представляет собой интегральный критерий качества модели. Аналитически записывается как:

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} * \frac{100\%}{n}, \quad (3.4)$$

где  $y_i$  – экспериментальное значение зависимой переменной регрессии;

$\hat{y}_j$  – расчетное значение зависимой переменной регрессии;

$n$  – количество наблюдений.

Если средняя ошибка аппроксимации превысит значение в 10%, то данное уравнение регрессии не удовлетворяет поставленным условиям и будет отброшено. Если же ошибка будет менее 10%, то для данной модели необходимо проверить значимость коэффициентов модели на основании критерия Фишера.

Критерий Фишера, определяет следующее неравенство:

$$F = \frac{R^2/(k-1)}{(1-R^2)/(n-k)} \geq F(\alpha, (k-1), (n-k)), \quad (3.5)$$

где  $R^2$  – коэффициент детерминации,

$k$  – количество независимых переменных,

$n$  – количество наблюдений,

$\alpha$  – уровень значимости коэффициентов модели.

Коэффициент детерминации показывает степень влияния независимых переменных модели на получаемое значение, чем его значение ближе к единице, тем лучше данное уравнение регрессии описывает анализируемую выборку. Расчет коэффициента детерминации производится по следующим выражениям:

$$R^2 = 1 - \frac{ESS}{TSS} \quad (3.6)$$

$$ESS = \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2, \quad (3.7)$$

где  $ESS$  – необъясненная сумма дисперсий,

$TSS$  – общая сумма дисперсий,

$y_t$  – фактическое значение зависимой переменной из таблицы 3.2

$\hat{y}_t$  – расчётное значение зависимой переменной, полученное по регрессионной модели.

$$TSS = \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2 \quad (3.8)$$

$$\bar{y}_t = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t \quad (3.9)$$

где  $\bar{y}_t$  – среднее значение зависимой переменной

В ходе исследования, был рассмотрен ряд уравнений регрессии, представленные в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Коэффициенты регрессионной модели

Внешний вид уравнения регрессии	Значения коэффициентов уравнения		
	a	b	c
$w_1 = a + bt + ck$	-8,412	0,096	9,844
$w_2 = a + bt + ck^3$	-6,888	0,096	1,07945
$w_3 = a + be^t + ce^k$	-7.409	$1.48 \cdot 10^{-30}$	4.515
$w_4 = ae^{btk}$	0.21546	0.06115	–
$w_5 = ae^{bt} e^{ck}$	0.006655	0.049535	4.2489
$w_6 = ake^{bt} e^{ck}$	0.02347	0.049533	2.981295
$w_7 = ake^{btk}$	0.411848	0.051605	–

Таблица 3.4 – Анализ моделей

Уравнение регрессии	Средняя ошибка аппроксимации, %	Коэффициент детерминации	Значение критерия Фишера	Критическое значение критерия Фишера
$w_1 = a + bt + ck$	75,4	0,657	71,96	4,8998
$w_2 = a + bt + ck^3$	69,25	0,711	92,46	4,8998
$w_3 = a + be^t + ce^k$	85,9	0,556	46,95	4,8998
$w_4 = ae^{btk}$	23,9	0,965	1049	4,8998
$w_5 = ae^{bt}e^{ck}$	18,2	0,98	1842	4,8998
$w_6 = ake^{bt}e^{ck}$	15,91	0,985	2423	4,8998
$w_7 = ake^{btk}$	17,94	0,981	1897	4,8998

Приведенные в таблице 3.4 уравнения не удовлетворяют требованию к средней ошибке аппроксимации; его значение более 10%. Данный результат говорит о невозможности описания исходной совокупности экспериментальных данных одним уравнением. В профильной литературе [109], предлагают разбить исходную выборку на части и для каждой части построить собственную модель. Данный метод носит название дерево регрессий и применяется достаточно широко. Главная сложность метода, – это выбор оптимального правила разбиения (решающего правила) исходного множества значений на подмножества.

#### **Дерево регрессий.**

Решающее правило должно выделить подмножества независимых переменных, позволяющие построить уравнения регрессии с требуемыми показателями качества, а также быть просто в расчете и минимизировать количество получаемых ветвей дерева. Экспериментальным путем было выбрано следующее правило:

$$T \cdot K < 30 \quad (3.10)$$

Выбранное правило разделило исходное множество значений температуры масла и конфиденга нагрузки на два подмножества, по каждому из которых будут

построен ряд регрессионных моделей. Полученные модели будут проверены на по ранее указанным критериям, результаты проверки приведены в таблицах 3.5, 3.6. Истинное значение неравенства 3.1 выделит множество значений, условно названных областью «малых нагрузок», а при ложном неравенстве получим область «больших нагрузок».

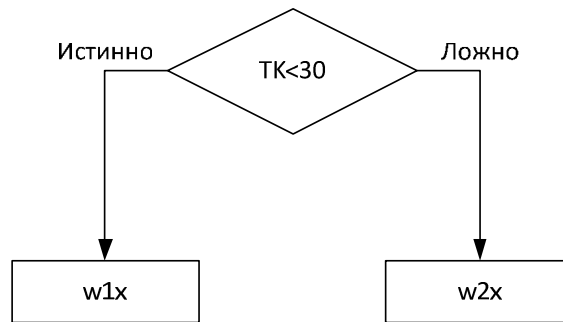


Рисунок 3.2 – Дерево регрессий

Таблица 3.5 – Модели регрессии

Уравнения регрессии		Коэффициенты уравнения регрессии		
		a	b	c
Малые нагрузки	$w_{11} = a + bt + ck$	-1.31305	0.01035	2.41983
	$w_{12} = ake^{bt}e^{ck}$	0,06	0,0258	2,5948
Большие нагрузки	$w_{21} = ae^{bt}e^{ck}$	0.008434	0.048281	4.08637
	$w_{22} = ake^{bt}e^{ck}$	0.02833	0.4836	2.86407

Таблица 3.6 – Анализ моделей

Уравнение регрессии	Средняя ошибка аппроксимации %	Коэффициент детерминации	Значение критерия Фишера	Критическое значение критерия Фишера
$w_{11} = a + bt + ck$	9,83	0,89	154	5,2112
$w_{12} = ake^{bt}e^{ck}$	18,65	0,47	16,847	5,2112
$w_{21} = ae^{bt}e^{ck}$	8,843	0,977	733	5,2679
$w_{22} = ake^{bt}e^{ck}$	11,252	0,959	404	5,2679



Из данных, приведенных в таблице 3.6 следует, что модели  $w_{12}$  и  $w_{22}$  не удовлетворяют требованиям, – ошибка аппроксимации более 10%. Остальные модели имеют приемлемую ошибку аппроксимации и значение коэффициента детерминации, а коэффициенты уравнения значимы по критерию Фишера. Поэтому искомая аналитическая зависимость для определения поправочного коэффициента представлена в следующем виде, выражение 3.11.

$$\hat{\alpha} = \begin{cases} -1.31 + 0.01 \cdot t + 2.42 \cdot k, & \text{при } t \cdot k < 30 \\ 0.0084 \cdot e^{0.048 \cdot t} e^{4.086 \cdot k}, & \text{при } t \cdot k \geq 30 \\ \hat{\alpha} = 0.1, & \text{при } \hat{\alpha} < 0.1 \end{cases} \quad (3.11)$$

Данная модель, помимо решения задачи интерполяции данных, может решать задачи экстраполяции значений поправочного коэффициента, численные оценки точности экстраполяции и допустимые диапазоны представлены в работе [111].

Тогда интенсивность потока отказов дроссель-трансформатора, при известном номинальном значении определим из выражения:

$$\lambda_{\alpha} = \lambda_{н} \cdot \begin{cases} -1.31 + 0.01 \cdot t + 2.42 \cdot k, & \text{при } t \cdot k < 30 \\ 0.0084 \cdot e^{0.048 \cdot t} e^{4.086 \cdot k}, & \text{при } t \cdot k \geq 30 \\ 0.1, & \text{при } \hat{\alpha} < 0.1 \end{cases} \quad (3.12)$$

Получаемое по регрессионной модели значение поправочного коэффициента к интенсивности отказов комплексно показывает как фактическая нагрузка на дроссель-трансформатор отличается от номинальной. Поэтому на его основе сформирован диагностический параметр «обобщенный коэффициент нагрузки» дроссель-трансформатора, численное значение которого вычисляется по выражению (3.11).

### **Верификация полученной модели.**

Линейные регрессионные многомерные модели, построенные с примени-

ем метода наименьших квадратов, предъявляют жесткие требования к остаткам при исследовании на адекватность. Остатки должны быть случайными величинами с нулевым средним значением, независимы от предсказанных моделей и иметь однородную дисперсию.

Выявление указанных характеристик носит название: анализ регрессионных остатков. Анализ проводится с применением различных статистических тестов (критериев), ключевым понятием которых является вероятность совершения ошибки первого рода – неверно отвергнуть истинную гипотезу. Применение статистических тестов требует, чтобы в ходе исследования была численно определена вероятность совершения ошибки первого рода. В данном исследовании принято минимальное численное значение данной вероятности в 10%.

**Проверка гипотезы нормального распределения остатков.** Использование теста Шапиро-Уилка, для проверки данной гипотезы показало, что с вероятностями 0.86 и 0.81 соответственно остатки моделей  $w_{11}$  и  $w_{21}$  имеют нормальное распределение. В таблице 3.7 показаны параметры нормального распределения остатков указанных моделей. Нормальность распределения можно также проверить графически на квантильных графиках, рисунок 3.2. Экспериментальные и теоритические квантили практически совпали – что подтверждает гипотезу нормального распределения.

Таблица 3.7 – Параметры распределения остатков модели

Модель	Среднее (M)	Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	Вероятность ошибки 1-го рода
$w_{11}$	0,0	0,135	0,8672
$w_{21}$	-0,04303	0,5	0,812

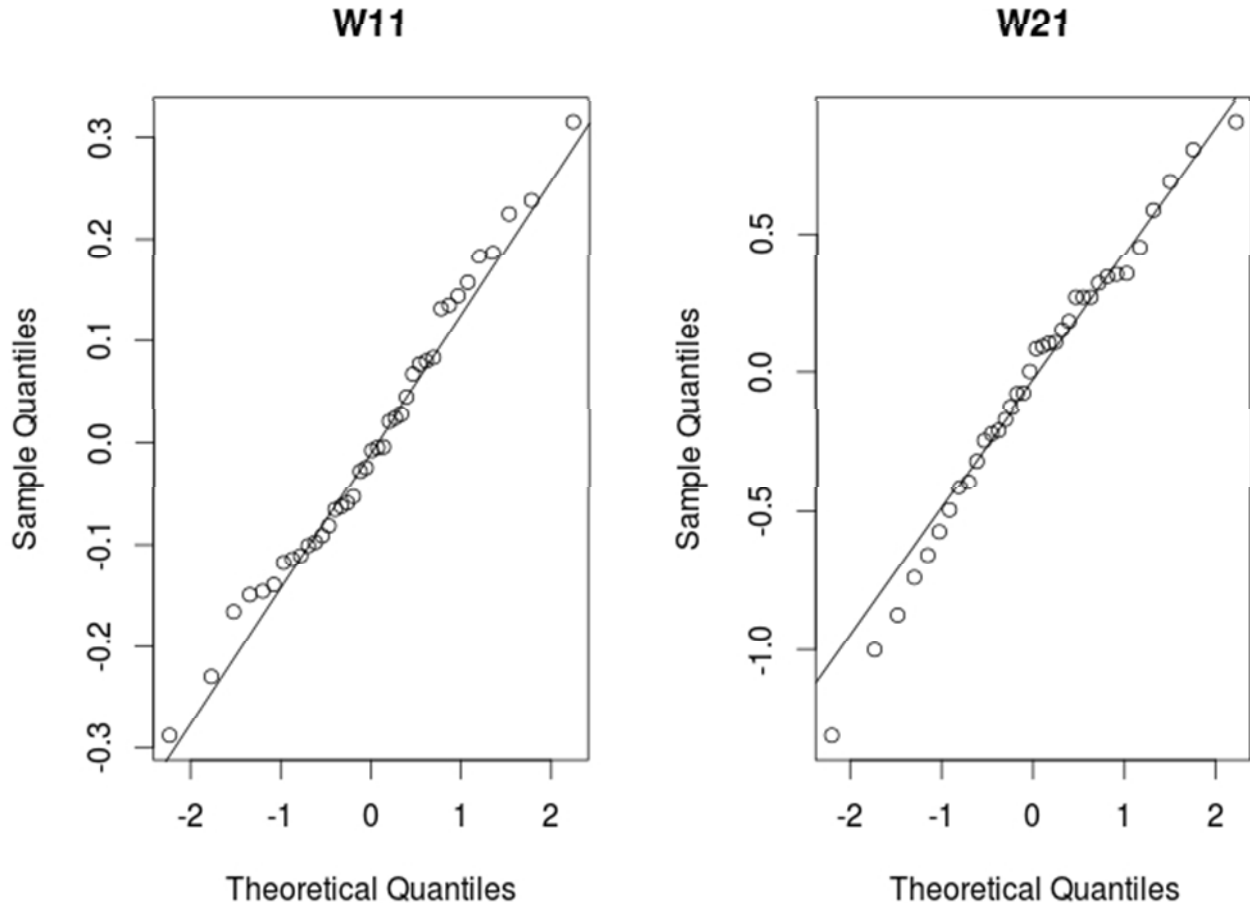


Рисунок 3.3 – Соотношение экспериментальных и теоретических квантилей

**Проверка гипотезы независимости значений остатков модели от полученных значений.** Если коэффициент корреляции множества остатков модели относительно множества значений близок или равен нулю – то остатки признаются независимыми. Проверка данной гипотезы проводилась по критерию Спирмена, так как совокупность значений модели распределена не нормально, в отличие, от совокупности остатков. В таблице 3.8 приведены результаты указанного теста.

Коэффициент корреляции не равен, но достаточно близок к нулю, тем не менее, вероятность совершения ошибки первого рода, т.е. ложно отбросить гипотезу о независимости остатков, выше принятого критерия значности в 10%. Поэтому гипотеза о независимости остатков модели должна быть принята по условиям проводимого исследования. Отличный от нуля коэффициент корреляции объясняется в данном случае малым размером анализируемой выборки.

Таблица 3.8 – Проверка отсутствия корреляции между остатками модели и предсказанными значениями

Модель	Коэффициент корреляции	Вероятность ошибки первого рода
W <sub>11</sub>	-0,156	0,3427
W <sub>21</sub>	0,196	0,2499

**Проверка однородности дисперсии остатков.** Проверка условия однородности остатков проводится графическим образом, путем построения графика зависимости остатков от предсказанных значений. Точки на таком графике должны располагаться случайным образом не образуя четкого шаблона. Необходимые графики приведены на рисунке 3.4, для каждой модели из дерева регрессий. На данных графиках нет четко прослеживаемых зависимостей, которые не объяснились бы недостаточным объемом изначальной выборки. Для подтверждения данного предположения построим диаграммы размахов, рисунок 3.5. Данные диаграммы не имеют выбросов, что позволяет судить об однородности дисперсий остатков.

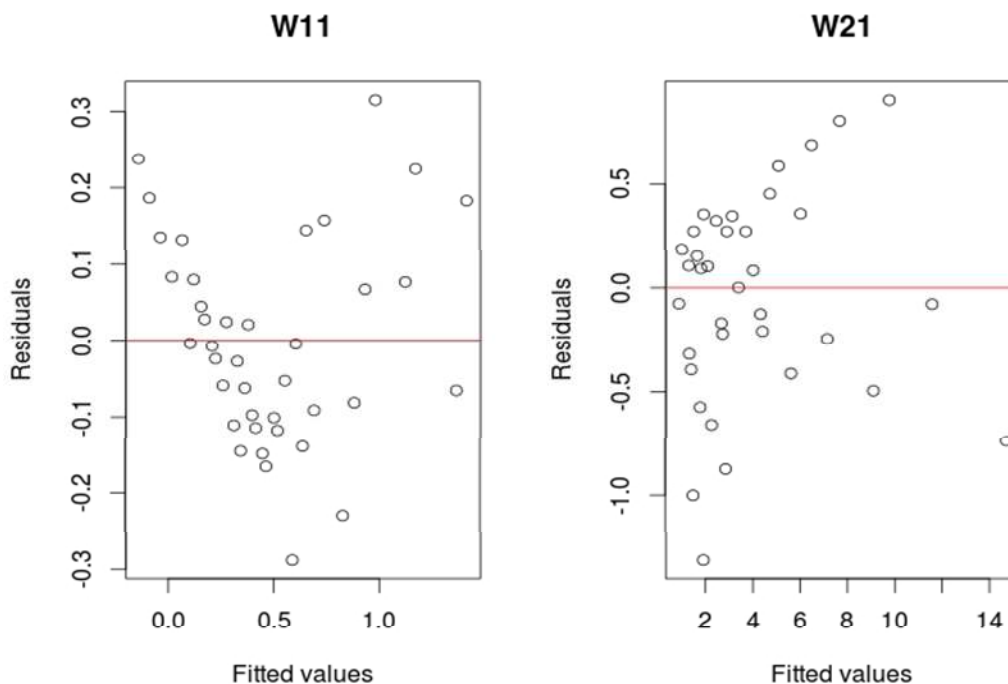


Рисунок 3.4 – Зависимость значений остатков от предсказанных значений

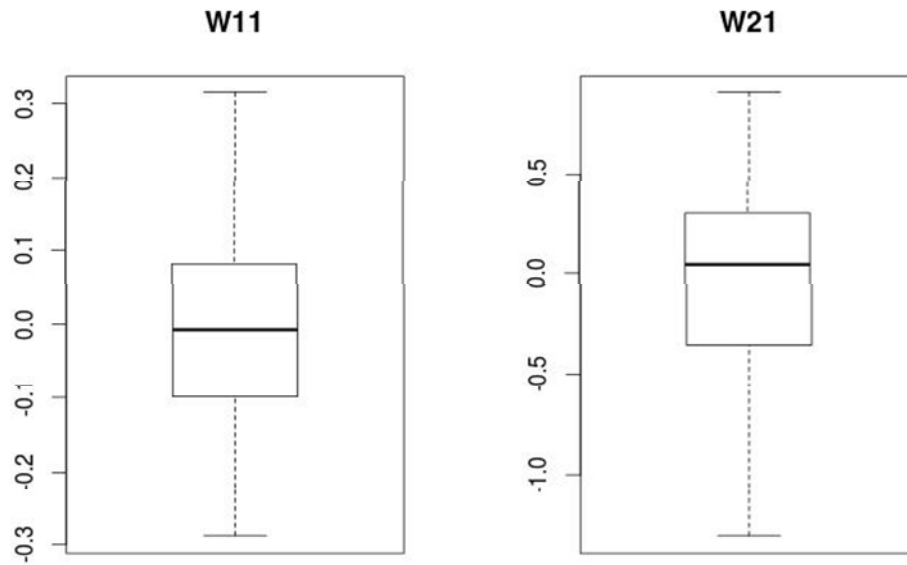


Рисунок 3.5 – Диаграммы размахов остатков моделей

Анализ регрессионных остатков показал, что остатки моделей распределены нормально с параметрами  $N(0, 0.135)$  и  $N(0, 0.5)$ , не коррелируют с предсказанными значениями, имеют однородную дисперсию. Данный факт позволяет признать полученную регрессионную модель (3.11) адекватной.

### 3.3 Определение достаточности уровня симметрии рельсовой линии для исключения отказов «ложная занятость» при движении тяжеловесных поездов

Асимметрия тягового тока, термин описывающий разницу тягового тока протекающего по разным рельсовым нитям одного блок–участка, значение которого рассчитывается по формуле (3.13). Для относительной оценки асимметрии, введено понятие коэффициента асимметрии, выражение (3.14).

$$I_{\text{асимметрии}} = I_1 - I_2, \quad (3.13)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – ток в левой и правой рельсовой нитке блок–участка.

$$K_{\text{асимметрии}} = \frac{|I_1 - I_2|}{I_1 + I_2} \quad (3.14)$$

Традиционно выделяют продольную и поперечную асимметрию обратного тягового тока. Продольный ток асимметрии обусловлен различным сопротивлением рельсовых нитей, вследствие разницы переходных сопротивлений токопроводящих стыков, а также различными длинами дроссельных перемычек [56,57]. Причина поперечной асимметрии – различная проводимость рельс–земля в разных местах рельсовой линии, объясняется неисправными искровыми промежутками в схемах заземления на внешний ходовой рельс [4].

На участках обращения тяжеловесных поездов со сложным профилем пути, применения песка для повышения сцепления колес локомотива с рельсом, обуславливает различные переходные сопротивления в пятне контакта колесо-рельс. Поэтому в работе [11] выделяют еще один тип асимметрии: асимметрию стекания тока в рельсы, обладающую свойствами вероятностной величины.

Обеспечение нулевого тока асимметрии задача технически сложно выполняемая, поэтому конструктивно в дроссель-трансформаторы заложена возможность обеспечивать приемлемые условия трансформации сигнального тока при некотором подмагничивании сердечника. В справочнике по аппаратуре систем автоматики [16] приводятся данные по допустимым конструктивным значениям тока асимметрии, таблица 3.9. В технических требованиях по нормам содержания рельсовых цепей [112] приводятся нормативные требования к току и коэффициенту асимметрии, таблица 3.9.

Из указанной таблицы, следует, что конструктивный ток асимметрии в два и более раз выше нормативного. Причина данного явления объяснена в работах [6,15].

Для устойчивого функционирования рельсовой цепи необходимо чтобы ток асимметрии не превышал максимально допустимое конструктивное значение с учетом заводского разброса параметров дроссель-трансформаторов, оцениваемого в  $\pm 10\%$ . Максимальные конструктивные и номинальные значения тока асимметрии определяют граничные значения категорий риска появления ложной занято-

сти рельсовой цепи вследствие насыщения магнитопровода дроссель-трансформатора.

Таблица 3.9 – Конструкционные и нормативные параметры дроссель-трансформаторов по асимметрии обратного тягового тока

Марка / год	Номинальный ток ДТ, А	Конструктивный максимальный ток асимметрии, А	Максимальный Касимметрии, при номинальном токе, %	Нормативный ток асимметрии, А	Нормативный Касимметрии, при номинальном токе, %
ДТ-0,2-1000 / до 1995	2000	240	12	120	6
ДТ-0,6-1000 / до 1995	2000	240	12	120	6
ДТ-0,6-1000X / до 1995	2000	300	15	120	6
ДТ-0,6-1000MX / до 1995	2000	320	16	120	6
ДТ-0,2-1000 / после 1995	2000	320	16	120	6
ДТ-0,6-1000 / после 1995	2000	320	16	120	6
ДТ-0,2-1500 / после 1995	3000	400	13,(3)	180	6
ДТ-0,2-1500 / после 1995	3000	400	13,(3)	180	6

Численная оценка достаточности текущей симметрии рельсовой линии для исключения отказов рельсовой цепи по причине насыщения сердечника дроссель-трансформатора может быть получена с использованием элементов теории риск-менеджмента.

Под термином риск будем понимать вероятность события, а не сумму вероятностных потерь, это допустимо нормативной документации [113] и позволит применять устоявшуюся терминологию.

Оценка достаточности текущей симметрии рельсовой линии основана на элементах теории вероятностей и математической статистики. Исходными данными являются массив измеренных значений и статистические законы распреде-

ления обратного тягового тока и коэффициента асимметрии зафиксированные в конкретном дроссель-трансформаторе. Диапазон значений оценки лежит в интервале от 0 до 1, где 0 – гарантированное отсутствие отказов из-за асимметрии, 1 – гарантированная ложная занятость. Мету достаточности текущего уровня симметрии рельсовой линии назовем: «коэффициентом готовности по асимметрии», что позволить отразить семантический смысл данного параметра. Подробно предложенный метод описан в [114], пример использования приведен в 4-й главе.

Для получения численной оценки используется матрица вероятностей, таблица 3.11. Процедура построения матрицы вероятностей аналогична, построению матрицы рисков, приведенной [113], с той лишь разницей, что уровни частот событий и тяжести последствий – заменены на вероятности появления определенных значений обратного тягового тока и коэффициента асимметрии. Для построения матрицы необходимо провести градацию возможных исходов по тяжести последствий. Согласно [113] выделяют 4 группы исходов, характеризующиеся качественным значением категории риска. Для решаемой задачи категории риска и правила расчета граничных значений тока асимметрии приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Категории вероятности появления ложной занятости рельсовой цепи из-за асимметрии обратного тягового тока

Категория риска	Описание категории, граничные значения тока асимметрии, А
Недопустимый	Ток асимметрии: больше максимального конструктивного тока асимметрии. $I_{\text{фактический асимметрии}} > I_{\text{конструктивный асимметрии}}$
Нежелательный	Ток асимметрии: больше 90% от максимального конструктивного тока асимметрии, но меньше максимального конструктивного. $I_{\text{конструктивный асимметрии}} > I_{\text{фактический асимметрии}} > 0,9 \cdot I_{\text{конструктивный асимметрии}}$
Допустимый	Ток асимметрии больше максимального нормативного но менее 90% от максимального конструктивного $0,9 \cdot I_{\text{конструктивный асимметрии}} > I_{\text{фактический асимметрии}} > I_{\text{нормативный асимметрии}}$
Незначительный	Ток асимметрии меньше максимального нормативного значения $I_{\text{нормативный асимметрии}} > I_{\text{фактический асимметрии}}$



Для определения уровней вероятностей все множество наблюдаемых значений тока и коэффициента асимметрии должно быть разбито на равные интервалы:

- множество значений тока от  $I_0$  (А) до  $I_m$  (А), разбито на  $m$  интервалов с шагом  $I_s$  (А);
- множество значений коэффициента асимметрии от  $k_0$  до  $k_n$ , разбито на  $n$  интервалов с шагом  $k_s$ .

Определяем вероятность попадания мгновенных значений тока  $P_{I(m)}$  и коэффициента асимметрии  $P_{k(n)}$  в сформированные интервалы, по статистическим законам распределения обратного тягового тока и коэффициента асимметрии. Ячейки матрицы вероятностей заполнены обыкновенными дробями, где в числителе указаны произведения правых границ интервалов тока и коэффициента асимметрии. В знаменателе – произведение вероятностей попадания значений тока и коэффициента асимметрии в эти интервалы, таблица 3.11.

Таблица 3.11 – Матрица вероятностей

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

Запись в форме обыкновенной дроби не предполагает определение частного от деления, а используется как форма записи, позволяющая компактно отобразить

данные. Значение в числителе дроби показывает максимально возможный ток асимметрии при конкретном сочетании обратного тягового тока и коэффициента асимметрии. Подстановка значения максимального тока асимметрии в неравенства из таблицы 3.10, позволяет определить категорию риска отказа рельсовой цепи для данной ячейки матрицы – определить цвет ячейки. Значение в знаменателе дроби показывает вероятность появления тока асимметрии, указанного в числителе.

Численное значение коэффициента готовности по асимметрии определено как сумма знаменателей дробей во всех ячейках матрицы вероятностей с незначительной и допустимой категорией риска. Проведя подобные расчеты для каждого дроссель-трансформатора участка, определим коэффициент готовности рельсовой линии участка, как произведение индивидуальных коэффициентов готовности дроссель-трансформаторов.

## Выводы

В данной главе были решены следующие задачи исследования:

1. Разработан метод определения интенсивности потока отказов дроссель-трансформатора с учетом токовой и тепловой нагрузки в условиях эксплуатации, сформирован диагностический параметр: обобщенный коэффициент нагрузки дроссель-трансформатора, численно равный значению поправочного коэффициента к интенсивности отказов;

2. Разработан метод определения достаточности текущего уровня симметрии рельсовой линии для исключения отказов рельсовых цепей вследствие асимметрии обратного тягового тока, сформирован диагностический параметр: коэффициент готовности рельсовой линии по асимметрии обратного тягового тока, численно равный вероятности отсутствия ложной занятости рельсовой цепи из-за асимметрии тягового тока.

## **4 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ УЧАСТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ**

### **4.1 Оптимизация режимов работы рельсовой линии по графику движения поездов**

Анализ необходимой мощности системы тягового электроснабжения производится расчетом по прогнозируемому графику движения поездов, в программных комплексах «Кортес», разработки ВНИИЖТа или аналогичных.

Усиление прямой нитки энергоснабжения производится путем увеличения номинальных токов фидеров тяговой подстанции и усилением передающей способности контактной сети. Усиление обратной тяговой нитки производится путем увеличения эквивалентного сечения дроссельных перемычек и установки более мощных дроссель-трансформаторов. Отличием работ по усилению обратной тяговой нитки является потенциальная возможность не проводить сплошную замену дроссель-трансформаторов, в силу особенностей токораспределения в рельсовой линии, что позволяет снизить требуемые финансовые вложения. Также немаловажным является возможность реализации концепции потребного развития, обеспечивать именно ту пропускную способность участка, которая нужна на текущий момент [115,116].

Предложенные ранее методики позволяют определить необходимую емкость системы обратного тягового энергоснабжения, и дают возможность сравнить различные варианты достижения требуемой емкости. Необходимая токовая емкость обратной тяговой сети обуславливается планируемым графиком движения поездов.

### Постановка задачи, исходные данные для определения необходимой мощности обратной тяговой сети.

Так как задача обратной тяговой сети замкнуть линию электропитания локомотива, то ее пропускная способность должна быть достаточная для возврата тока к тяговой подстанции с учетом растекания. Поэтому исходными данными для расчета токораспределения в рельсовой линии являются:

- нормативный (прогнозный) график движения поездов по данному участку;
- расчетные или фактические графики токов локомотивов при движении по рассматриваемому участку, полученные с системы моделирования «Кортес» или бортовых регистраторов локомотивов после пробных поездок;
- данные о конфигурации обратной тяговой сети, – источником служат путевые планы перегонов, схематические планы станций;

Для иллюстрации работы с предложенной методикой, предположим, что прогнозный график движения поездов, это движения пакета поездов массой 6.3тыс.тонн – 9 тыс.тонн – 6.3 тыс.тонн, с предполагаемыми интервалами попутного следования 6, 8, 10, 12 минут. После прохода пакета сохраняется интервал без движения поездов по участку равный времени хода пакета по участку и далее снова следует пакет, рисунок 4.1. Поезда с номерами 2020, 2018, 2022, 2024, 2016, 2028 имеют массу 6300 тонн, 2048, 2058, 2064 имеют массу 9000 тонн.

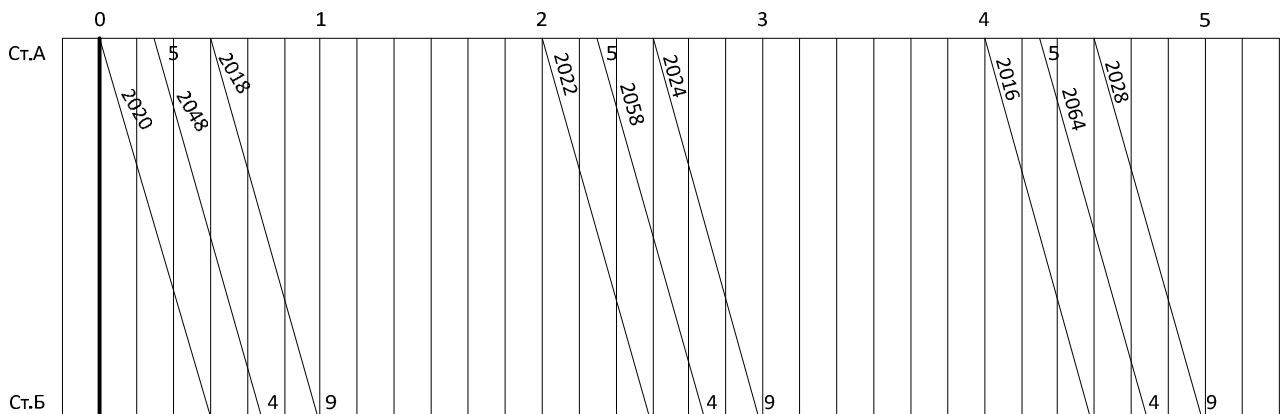


Рисунок 4.1 – Прогнозный график движения поездов

При движении по перегону между станциями «А» и «Б», локомотивы поездов в зависимости от момента времени потребляют различные тяговые токи, приведенные на рисунках 4.2, 4.3.

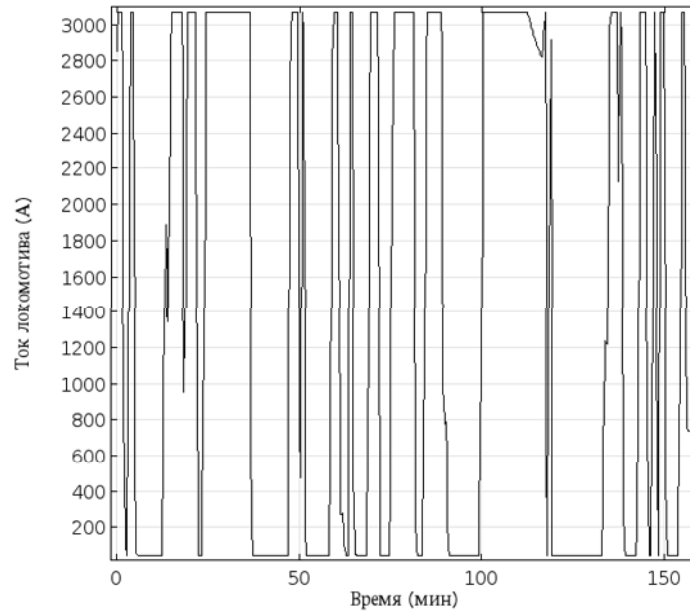


Рисунок 4.2 – Ток локомотива состава массой 6300 тонн

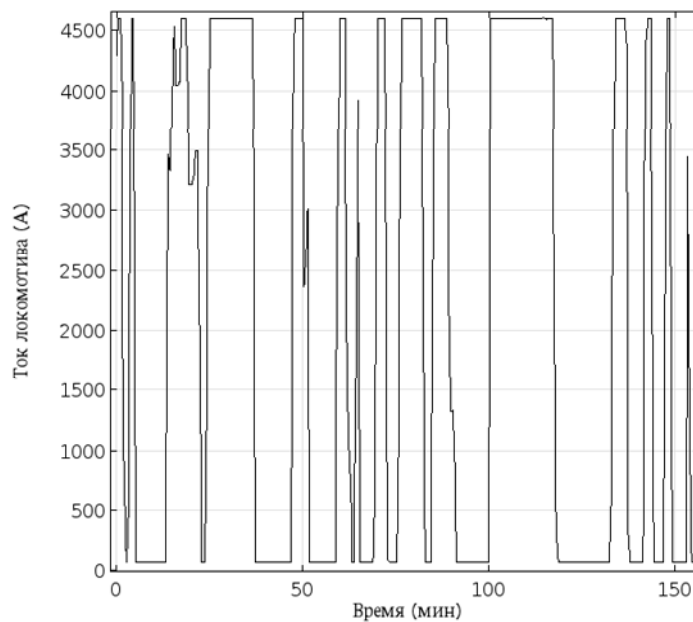


Рисунок 4.3 – Ток локомотива состава массой 9000 тонн

Конфигурация обратной тяговой сети была взята с фактического участка Свердловской железной дороги со сложным профилем и регулярным движением

поездов повышенной массы и длинны.

### Моделирование токораспределения на участке железной дороги.

Для моделирования токораспределения на выбранном участке были собраны исходные данные: протяженность, ординаты отсасывающих фидеров, междупутных перемычек и дроссель-трансформаторов.

На построенной, в среде *Comsol Multyphisicis*, модели токораспределения для рассматриваемого участка были получены действующие значения токов в рельсовой линии путей перегона, за время движения одного пакета с различными интервалами попутного следования, рисунок 4.4.

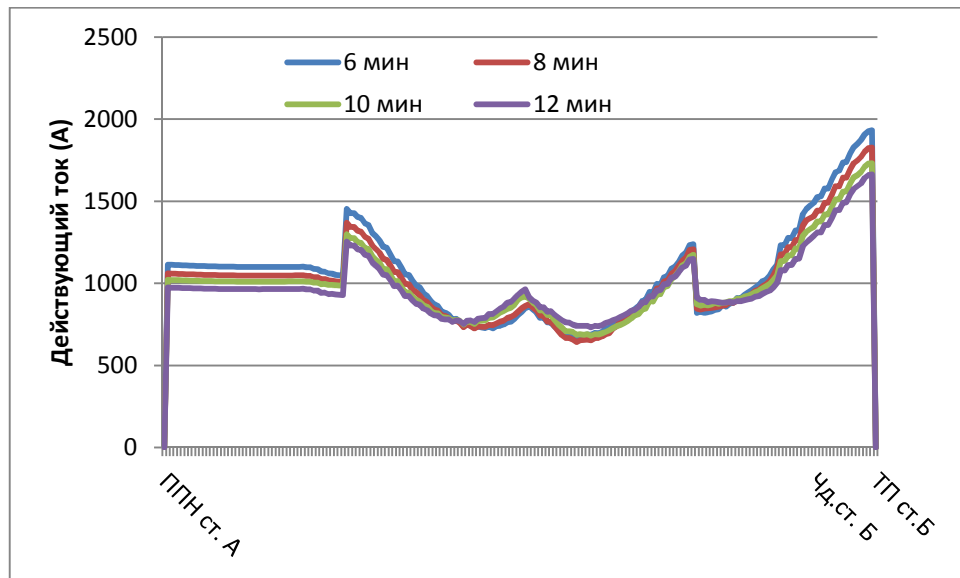


Рисунок 4.4 – Действующий ток в рельсовой линии при движении пакета поездов массами 6300–9000–6300 тонн, с различными межпоездными интервалами

Данный график показывает, что наибольшую токовую нагрузку имеет дроссель-трансформатор у входного светофора станции «Б» стоящий в начале затяжного подъема, метка «Чд. ст.Б» на оси ординат рисунка 4.4. Локальные максимумы на графиках обусловлены рельефом участка. На рисунке 4.5 показаны графики значений мгновенного тока через дроссель-трансформатор при указанных интервалах попутного следования.

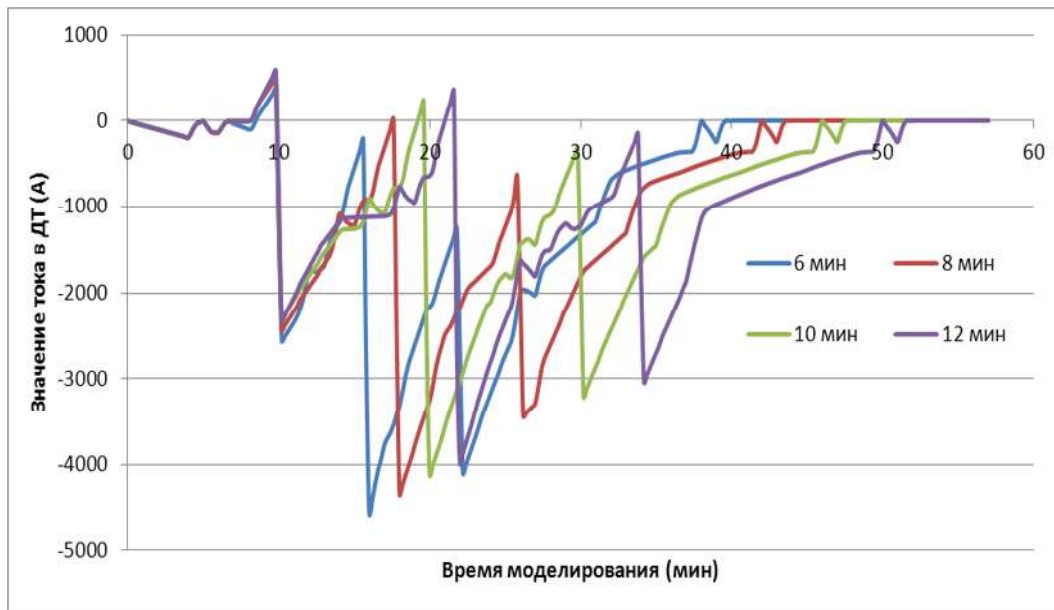


Рисунок 4.5 – Мгновенные значения тока в дроссель-трансформаторе при движении пакета поездов массой 6300-9000-6300 тонн, с различными межпоездными интервалами

Действующие значения тока в дроссель-трансформаторе за время движения пакета приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Данные моделирования токораспределения при различных режимах движения

Режимы движения	Масса, тыс. тонн	Действующие значение тока, А	Время хода, усреднения, мин
Пакет: 3 поезда, интервал 6 мин	6,3-9-6,3	1535	57
Пакет: 3 поезда, интервал 8 мин	6,3-9-6,3	1429	57
Пакет: 3 поезда, интервал 10 мин	6,3-9-6,3	1359	57
Пакет: 3 поезда, интервал 12 мин	6,3-9-6,3	1294	57

### **Анализ тепловых режимов дроссель-трансформатора.**

Разработанная в данном диссертационном исследовании модель теплового баланса дроссель-трансформатора, позволяет провести расчет превышения температуры масла дроссель-трансформатора над окружающей средой, как при использовании действующего, так и мгновенных токов и сравнить полученные ре-

зультаты.

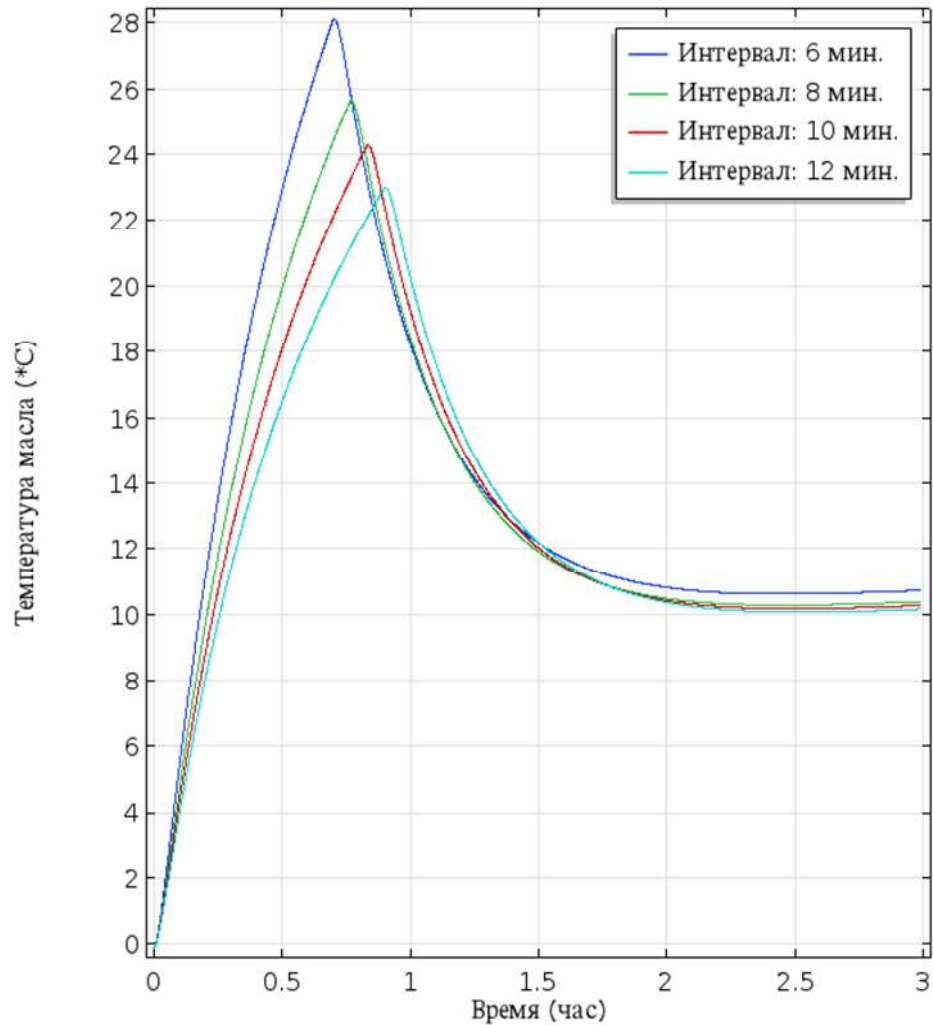


Рисунок 4.6 – Температура перегрева масла дроссель-трансформатора при проходе пакета поездов и расчете на действующие значения тока

Графики с рисунка 4.6, построены по результатам расчета превышения температура масла, с использованием действующего значения тока, для различных межпоездных интервалов. При одиночном проходе пакета поездов с 6-ти минутным интервалом, максимальный ожидаемый перегрев масла над окружающей средой составляет 28 °C, что не превышает максимального нормативного значения в 75 °C. Также после прохода пакета поездов не возвращается к первоначальному значению, что объясняется нагревом солнечной радиацией.

Использование в тепловой модели мгновенных токов дроссель-трансформатора, дает отличные температуры перегрева масла, рисунок 4.7. При



одиноким проходе пакета поездов с интервалом 6 минут, максимальная температура перегрева составляет порядка 55 °С.

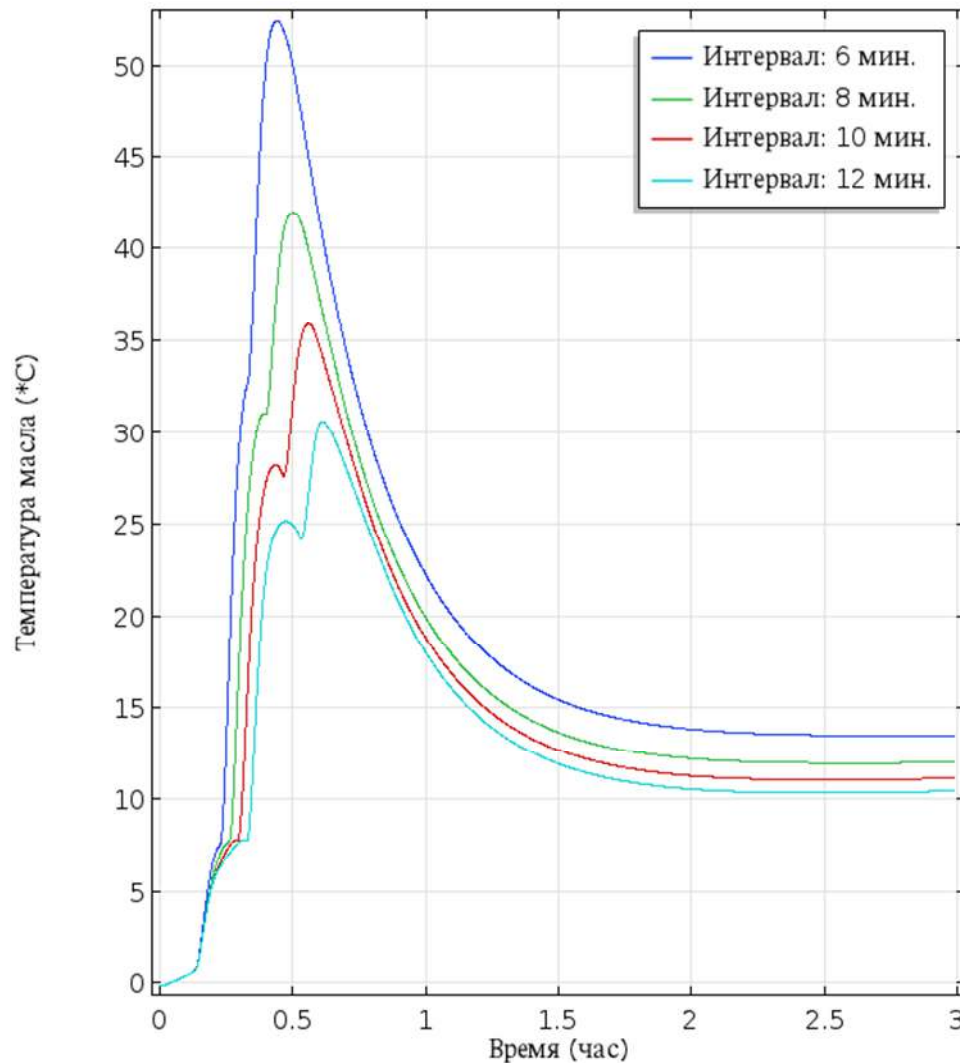


Рисунок 4.7 – Температура перегрева масла дроссель-трансформатора при проходе пакета поездов и расчете на мгновенные значения тока

Анализируя графики с рисунков 4.6 и 4.7, можно сделать вывод, что использование в расчете действующих значений тока, протекающего через дроссель-трансформатора занижает получаемые значения температуры перегрева масла. Объяснением данного факта служит нелинейность тепловых процессов и необходимость учета не только значения выделенной тепловой мощности, но и распределения тепловыделения по оси времени. При использовании действующего значения тока рассчитанного за время хода поезда по участку распределение

тепловыделения равномерно по оси времени, что не соответствует действительности. Поэтому в дальнейшем, расчет на действующее значение обратного тягового тока производится не будет, весь анализ будет основан на мгновенных значениях действующего тока.

Результаты моделирования прохода одного пакета поездов не позволяют сделать вывод о максимальном перегреве масла дроссель-трансформатора при реализации графика движения поездов с рисунка 4.1. Результаты моделирования теплового баланса дроссель-трансформатора, при регулярном движения пакета поездов с разными интервалами попутного следования приведены на рисунке 4.8. При всех интервалах попутного следования присутствует периодический ненормативный перегрев масла, свыше  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что говорит о недостаточной емкости обратной тяговой сети для реализации предложенного графика.

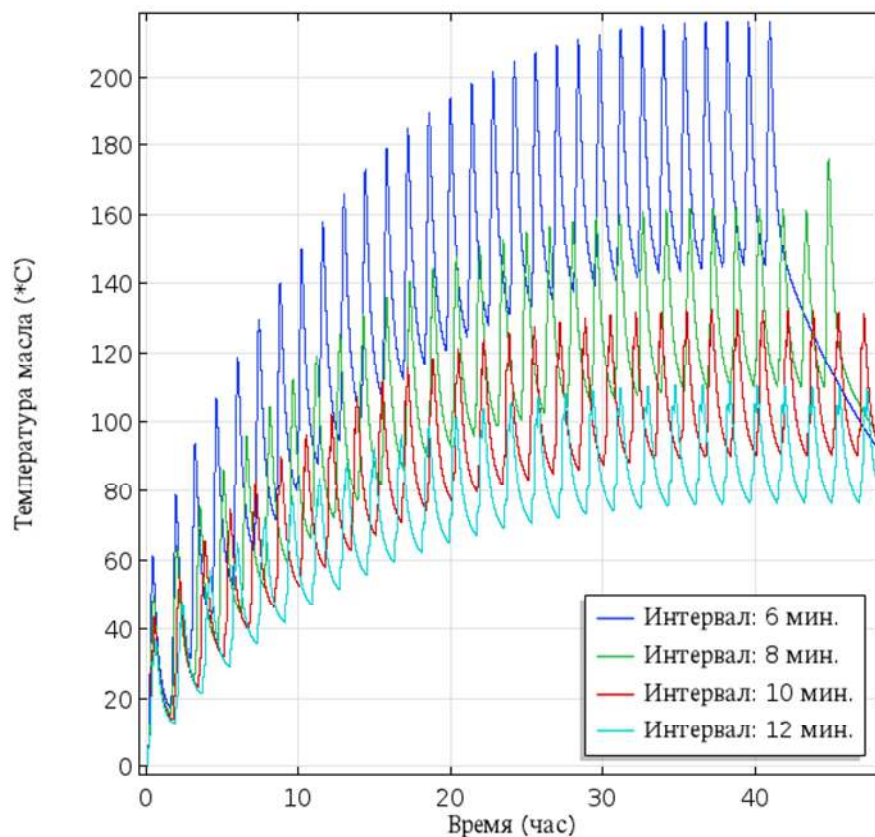


Рисунок 4.8 – Температуры перегрева масла дроссель-трансформатора при периодическом движении пакета поездов с различными интервалами попутного следования

Исследование влияния величины межпоездного интервала на температуру перегрева масла показали, что при межпоездном интервале в пакете в 18 минут, и интервале между пакетами в 66 минут, обеспечивается нормативный тепловой режим с максимальным перегревом масла над окружающей средой в  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рисунок 4.9.

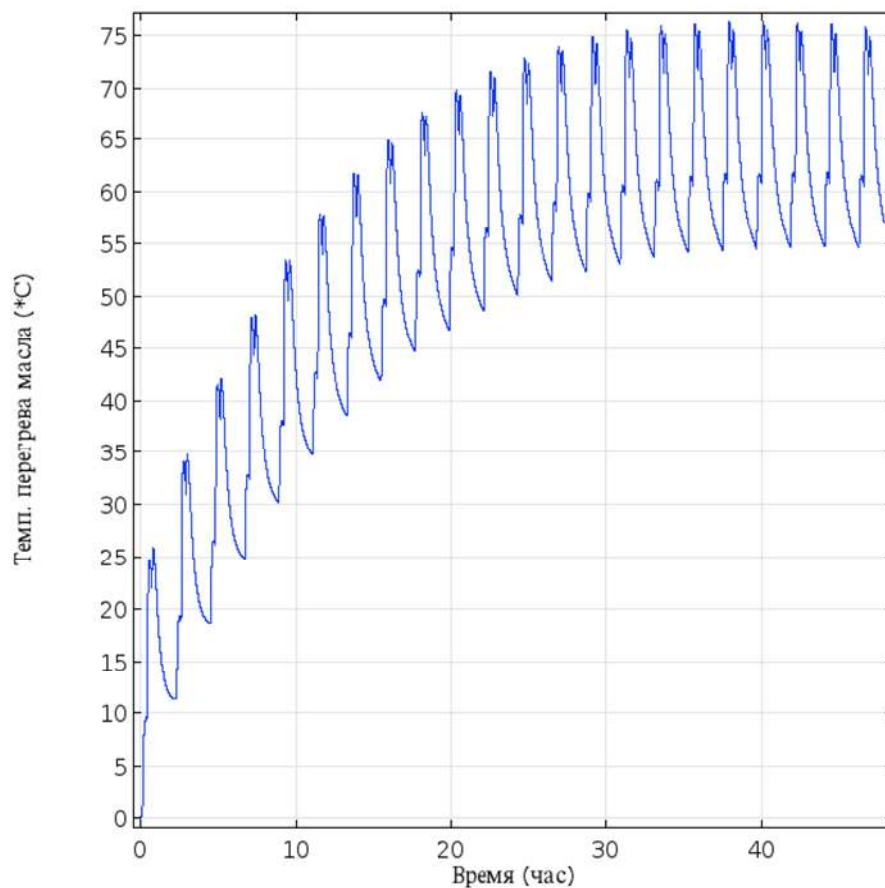


Рисунок 4.9 – График перегрева масла дроссель-трансформатора, при регулярном движении пакета поездов с межпоездным интервалом 18 минут

Таким образом, проведенное моделирование позволило выделить самый теплонагруженный дроссель-трансформатор данного участка. Обосновать график движения поездов, который позволит без замены оборудования обеспечить нормативные тепловые режимы работы дроссель-трансформаторов участка. При этом требуется корректировка графика движения поездов. Если требуемая корректировка невозможна, то необходима смена типа дроссель-трансформатора, и изменение номиналов элементов рельсовой цепи.

## Влияние усиления дроссель-трансформатора на изменение тепловых режимов.

Ранее был определен, дроссель-трансформатор требующий замены на более мощный для реализации требуемого графика движения поездов.

На текущий момент установлен ДТ–0.6–1000, и его возможная замена это ДТ–0.4–1500. В силу увеличенного объема масла и массы металлических частей, ДТ–0.4–1500 обладает большей тепловой постоянной времени. В [2] указано, что ДТ–0.4–1500 допускает длительное протекание тока в 3200 А, против 2200 А у ДТ–0.6–1000.

Проведем анализ тепловых режимов ДТ–0.4–1500 при реализации нормативного графика движения с рисунка 4.1. Используя данные токораспределения, полученные ранее, и прогнозного графика движения поездов, с рисунка 4.1, определим температуры перегрева масла над окружающей средой. На рисунке 4.10 приведены искомые графики для различных интервалах попутного следования.

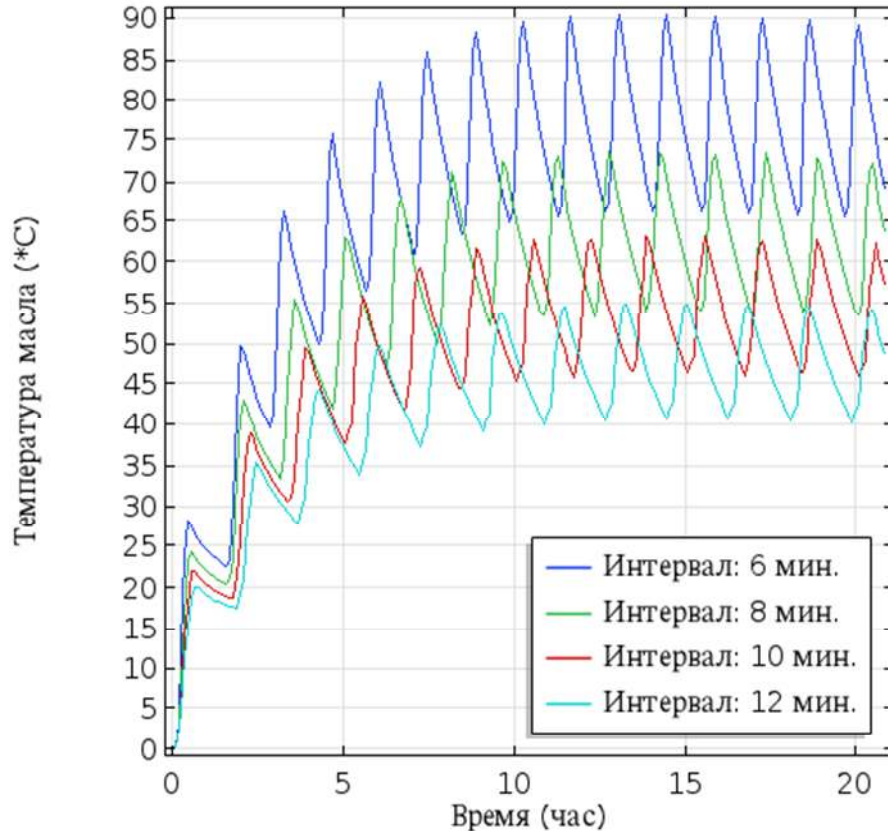


Рисунок 4.10 Температура перегрева масла ДТ–0.4–1500 при различных интервалах попутного следования

Из приведенного графика видно, что после замены типа дроссель-трансформатора, становится возможным исполнение графика движения поездов (рисунок 4.1) с интервалом попутного следования 8 минут. Данный вывод сделан на основании того, перегрев масла над окружающей средой не превышает  $75^{\circ}\text{C}$ , что говорит об выполнении нормативных требований к максимально-допустимым перегревам масла дроссель-трансформатора, приведенным в [16].

## 4.2 Развитие средств мониторинга рельсовой линии

### **Совершенствование функциональных возможностей современных средств мониторинга.**

Оптимизация накладных расходов, проводимая в дирекциях инфраструктуры, приводит, в том числе, к падению квалификации технического персонала. В этих условиях поддержание требуемых параметров готовности устройств автоматики невозможно без использования интеллектуальных систем мониторинга инфраструктуры [117] и требует изменения концепции содержания устройств. При этом системы мониторинга должны гармонично вписываться в существующую технологию обслуживания, автоматизируя ряд операций по сбору и обработке данных о текущем состоянии элементов инфраструктуры.

Основой системы мониторинга является подсистема телеизмерений, производящая измерение первичных числовых параметров. Как показано в третьей главе, критичными параметрами для рельсовой линии является значение обратного тягового тока и температура ее элементов: дроссель-трансформаторов и соединителей (в данной работе температурные режимы соединителей не рассматриваются). На основании этого сформулирует требования к подсистеме телеизмерений:

- измерение абсолютных мгновенных значений обратного тягового тока;
- измерение мгновенных значений асимметрии обратного тягового тока;
- измерение температуры масла дроссель-трансформатора.

К решаемым задачам систем диагностики относятся задача генеза и диагноза [59]. Задача генеза, традиционно решается путем сохранения измеренных значений и результатов работы диагностических алгоритмов в архив, с возможностью последующего просмотра в удобной форме. Задача диагноза решается сравнением диагностических параметров с граничными значениями и формирование диагностических ситуаций при нарушении граничных значений. Более продвинутые диагностические алгоритмы в состоянии анализировать тренды изменения диагностических параметров и прогнозировать время пересечения линией тренда граничного значения, при сохранении существующей динамики. Так в работах [118-120] приводятся методы контроля состояния токопроводящих стыков и прогнозирования их влияния на сопротивление рельсовых линий и устойчивость работы рельсовой цепи.

На сегодняшний день на сети ОАО «РЖД» сформирована структура дорожных центров мониторинга, обрабатывающая всю собираемую диагностическую информацию по режимам работы систем автоматики и телемеханики. Безусловным требованием для вновь разрабатываемых систем мониторинга является передача данных в дорожные центры мониторинга по универсальному протоколу обмена [60]. Поэтому результаты мониторинга рельсовой линии также должны передаваться в дорожные центры мониторинга.

Применяемая в текущее время на ОАО «РЖД» система мониторинга СТД–МПК, в своем составе имеет контроллер мониторинга сигнальной установки (КМСТ–МПК). В задачи контроллера входит мониторинг электрических параметров децентрализованной автоблокировки, соответственно он размещается в релейном шкафу и передает данные на опорную станцию по линиям ДК/ОДК (ДСН/ОДСН). Данные со станционной системы мониторинга по универсальному протоколу передаются в дорожный центр мониторинга. В проведенной работе проработан вопрос расширения функционала КМСТ–МПК для контроля параметров функционирования дроссель-трансформатора: добавление функций измерения обратных тяговых токов и тока асимметрии [121].

Контроллер мониторинга сигнальной установки имеет модульную структуру

(рисунок 4.11), которая позволяет изменять количество и тип контролируемых параметров по желанию заказчика. Базовая комплектация включает в себя:

- устройство дискретного мультиплексированного ввода, УМВ–32;
- аналоговый коммутатор, АК–6д2;
- устройство нормирования сигналов, УНС–4и;
- программно–технический комплекс управления системой телеизмерений, ПТК–ТИ;
- модем физической линии связи, МФЛ–МПК.

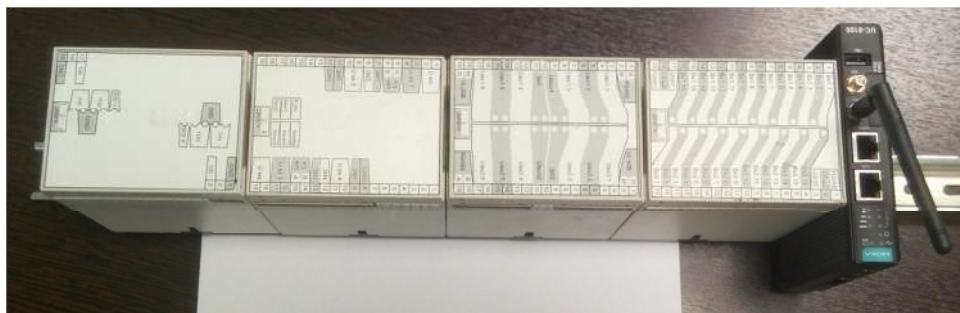
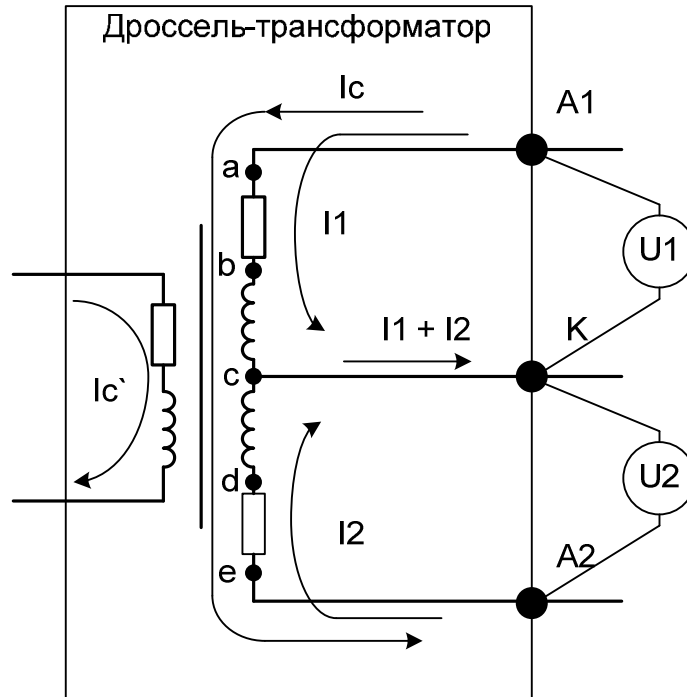


Рисунок 4.11 – Внешний вид КМСТ–МПК

Измерение аналоговых величин осуществляется устройством нормирования сигналов, представляющим собой селективный измеритель на четыре изолированных канала. В текущей задаче контроля аналоговых величин в релейном шкафу децентрализованной автоблокировки используются два изолированных измерительных канала, которые через аналоговый коммутатор периодически подключаются ко всем необходимым точкам измерения, два изолированных канала остаются незадействованными в текущей реализации.

Измерение текущих значений обратного тягового тока и асимметрии производится косвенным методом [121]. Определение тока в полуобмотках дроссель-трансформатора основано на законе Ома для участка цепи без ЭДС. Суммарное значение обратного тягового тока определяется как сумма токов полуобмоток, а ток асимметрии – как разность. При стабильности активного сопротивления токовой обмотки в  $\pm 0,1$  мОм, систематическая погрешность данного метода измерений тока составит 10%.

На рисунке 4.12 графически показан предложенный принцип измерения, а выражения (4.1) отражают необходимый объем измерений для определения значений обратного тягового тока и тока асимметрии.



точки A1, K, A2 – выводы токовой обмотки дроссель-трансформатора;  $I_1, I_2$  – тяговый ток протекающий по полуобмоткам дроссель-трансформатора;  $I_c, I_c'$  – сигнальный ток в токовой и сигнальной обмотках, соответственно;  $U_1, U_2$  – измеренные падения напряжения на полуобмотках дроссель-трансформатора

Рисунок 4.12 – Схема измерения обратного тягового тока и его асимметрии

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{2 \cdot U_1}{R_{дт}}, I_2 = \frac{2 \cdot U_2}{R_{дт}} \\
 I_T &= I_1 + I_2 = 2 * \frac{U_1 + U_2}{R_{дт}}, \\
 I_{ас} &= 2 * \frac{|U_1 - U_2|}{R_{дт}}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

где  $U_1, U_2$  – измеренные падения напряжения на полуобмотка дроссель-трансформатора;

$I_1, I_2$  – рассчитанные токи полуобмоток дроссель-трансформатора;

$I_T$  – обратный тяговый ток;



$I_{ac}$  – ток асимметрии.

Данное решение позволит использовать существующую аппаратную платформу КМСТ–МПК, повысить эффективность использования вычислительных средств, добавлением нового функционала.

Преимуществом косвенного измерения тока, на основании закона Ома, против использования датчиков Холла является ряд факторов:

1) антивандальность, – все оборудование находится в релейном шкафу, на поле выходит только кабель для подключения в выводы токовой обмотки дросель-трансформатора;

2) отсутствие ограничения по значениям измеряемого тока – все датчики Холла обладают фиксированным динамическим диапазоном и максимальным измеряемым током;

3) простота монтажа, подключение производится под контргайку вывода токовой обмотки.

Тем не менее, данный метод не лишен недостатка. Применение разностного метода при определении коэффициента асимметрии повышает требования к каналам измерения падения напряжения на токовых полуобмотках. При неудачном сочетании погрешностей измерительных каналов: один, к примеру, занижает получаемое значение, а другой завышает, ошибка в расчете асимметрии может достигать значений близких к 100%. Покажем это на примере: допустим, известно истинное значение токов в рельсах: 90 А и 100 А, т. е. ток асимметрии равен 10 А. При этом относительная погрешность каналов измерения напряжения: –5% и +5% для первого и второго канала соответственно, поэтому измеренные значения токов составят 85,5А и 105А и рассчитанный ток асимметрии будет равен 19,5А. Тогда относительная погрешность измерения асимметрии составит: 95 %, что неприемлемо.

#### **Повышение точности измерения асимметрии тягового тока.**

Данная проблема рассматривалась в работе [122], приведем основные положения:

– минимизировать погрешность разностных измерений возможно путем более точной калибровкой измерительных каналов, идеальный вариант, если относительные погрешности измерительных каналов одинаковы;

– если погрешности не равны, но известны их численные оценки то использование выражения 4.2 позволяет определить текущее значение тока асимметрии с погрешностью одного из измерительных каналов;

$$I_{\text{асим.}}^{\text{расч.}} = I_{\text{лев.р.}}^{\text{измер.}} - I_{\text{прав.р.}}^{\text{измер.}} \frac{1 + \delta_{\text{лев.к.}}}{1 + \delta_{\text{прав.к.}}}, \quad (4.2)$$

где  $I_{\text{асим.}}^{\text{расч.}}$  – расчетное значение тока асимметрии;

$I_{\text{лев.р.}}^{\text{измер.}}$ ,  $I_{\text{прав.р.}}^{\text{измер.}}$  – измеренные значения тока левого и правого рельсов с известной погрешностью;

$\delta_{\text{лев.к.}}$ ,  $\delta_{\text{прав.к.}}$  – относительные погрешности измерительных каналов напряжения в левом и правом рельсе соответственно.

Необходимое программное обеспечение было разработано автором и оптимизировано для работы в контроллере мониторинга сигнальной установки. В рамках экспериментальной части исследования в КМСТ–МПК был добавлен функционал для численного решения системы дифференциальных уравнений теплового баланса дроссель-трансформатора (2.5). Данные по температуре масла дроссель-трансформатора необходимы для автоматического расчета обобщенного коэффициента нагрузки, предложенного в п.п 3.2 данного исследования. Статистические данные по значениям обратного тягового тока и тока асимметрии, собираемые КМСТ–МПК, позволили реализовать расчет коэффициента готовности рельсовой линии, предложенный в п.п. 3.3 данной работы.

### **Алгоритм усреднения мгновенных значений**

Переход к учету мгновенных значений параметров рельсовой линии:

- значений обратного тягового тока;
- значений температуры масла дроссель-трансформатора;
- значений коэффициента асимметрии;

- значений обобщенного коэффициента нагрузки дроссель-трансформатора;
  - значений коэффициента готовности по асимметрии,
- породил проблему получения усредненных значений, для пост-обработки и передачи в дорожные центры мониторинга и диагностики. Проблема заключается в выборе наиболее подходящего алгоритма усреднения.

Усредненные значения необходимы для решения задачи диагностики прогноза состояние рельсовой линии, на основе анализа трендов изменения контролируемых величин и оптимизации занимаемого объема данных в памяти систем мониторинга. Следовательно, практическое использование предложенных методик требует усреднения получаемых мгновенных значений по шкале времени. В практике статистических расчетов, для усреднения по временной шкале используется средневзвешенное гармоническое значение, вычисляемое на основе следующего выражения:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n w_i / \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{x_i}, \quad (4.3)$$

где  $x_i$  – мгновенное значение величины на  $i$ -м интервале;

$w_i$  – вес  $i$ -го интервала.

Вес определяется как длительность интервала фиксации значения  $x_i$  к общей продолжительности наблюдений:

$$w_i = t_i / T, \quad (4.4)$$

где  $t_i$  – время фиксации значений из  $i$ -го интервала;

$T$  – общее время наблюдения.

Программное обеспечения системы мониторинга для усреднения мгновенных значений должно производить ранжирование всего множества значений усредняемых величин по диапазонам, к пределам которых значение параметра

можно принять неизменным.

### 4.3 Экспериментальные исследования на участках обращения поездов повышенной массы и длины

Экспериментальные исследования, проведенные в ходе данной работы, были направлены на экспериментальную верификацию моделей предложенных во второй главе. Согласно теории планирования эксперимента, был организован эксперимент с неуправляемыми факторами. В ходе эксперимента были получены экспериментальные значения для следующих функций отклика:

$$\begin{aligned}
 I_{дт}(x) &= f(I_э(x), x, t) \\
 I_{ас}(x) &= f(I_э(x), x, t) \\
 T_p &= f(I_э(x), T_{ext}, v, t) \\
 T_{и} &= f(t),
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

где  $I_{дт}(x)$  – мгновенное значение обратного тягового тока, протекающего через дроссель-трансформатор, А;

$I_{дт}(x)$  – мгновенное значение тока асимметрии дроссель-трансформатора, А;

$I_э(x)$  – ток электровоза в зависимости от ординаты участка, А;

$T_p$  – расчетное значение температуры масла дроссель-трансформатора, °С;

$T_{и}$  – измеренное значение температуры масла дроссель-трансформатора, °С;

$x$  – текущее местоположение электровоза, км;

$t$  – время эксперимента, с;

$T_{ext}$  – температура охлаждающей среды, °С;

$v$  – скорость ветра, м/с.

К неуправляемым факторам эксперимента относятся:

- текущая координата электровоза;

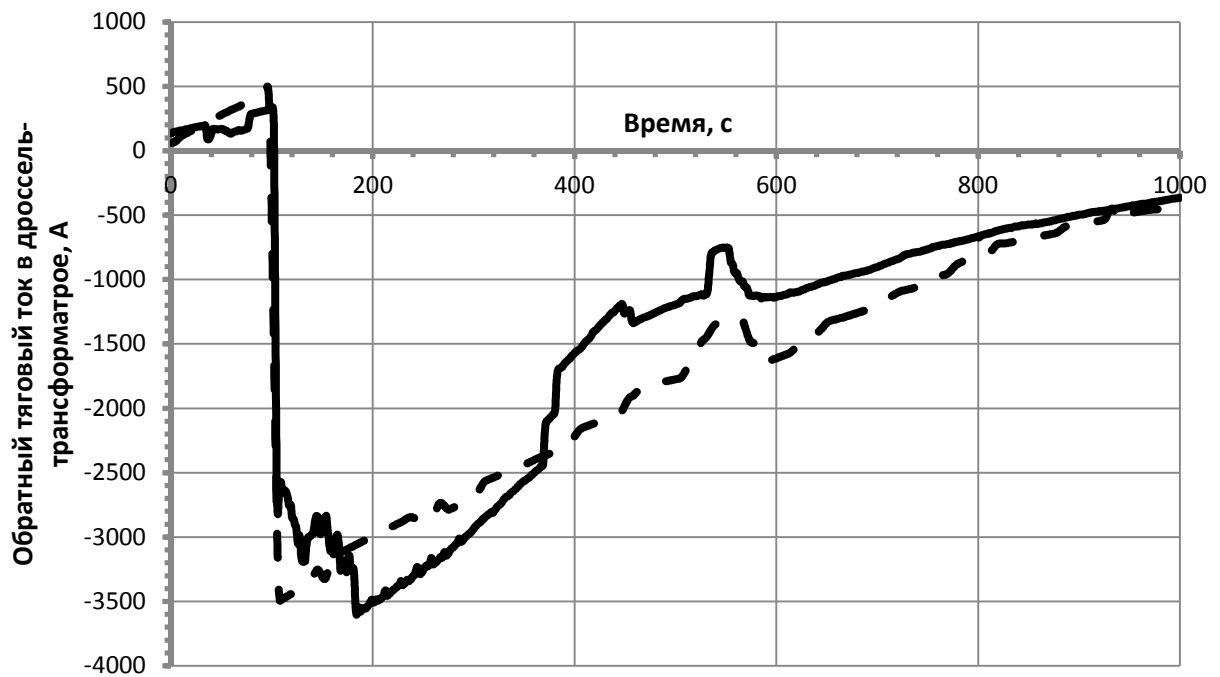
- зависимость тока электровоза от текущей координаты;
- температуры охлаждающей среды;
- скорость ветра.

Проведение эксперимента потребовало контролировать температуру охлаждающей среды, дроссель-трансформаторов и окружающего грунта. Данные измерения проводились с применением тепловизора Testo-881. Измерение падения напряжения на полуобмотках дроссель-трансформатора проводилось устройством нормирования сигналов, внесенное в перечень средств измерений сертификат типа: RU.C.34.058.A № 70682.

### **Верификация модели токораспределения.**

Для проведения экспериментальной проверки были измерены значения обратного тягового тока, протекающего через дроссель-трансформатор расположенный у светофора Чд, станции Сабик Свердловской железной дороги, при проходе состава массой 8700 тонн. Также для участка Сабик–Сарга была построена, конечно–элементная модель токораспределения, смоделирован проход состава такой же массой и определены мгновенные значения тока в том же дроссель-трансформаторе. Данные тока, потребляемого локомотивом, при ведении состава указанной массы были получены с системы моделирования «Кортес», разработки ВНИИЖТ.

Значение средней ошибки моделирования составило порядка 11%, рисунок 4.13. Расхождения объясняются ошибками измерения обратного тягового тока и различными режимами ведения поезда машинистом и системой моделирования «Кортес», что обусловили некоторую разницу в исходных данных тока локомотива. Ошибка измерения обусловлена появлением высокочастотной составляющей большой амплитуды в моменты шунтирования изолирующего стыка колесными парами поезда, что вносит ошибку в цифровой фильтр, подавляющий переменную составляющую сигнала, обусловленную действием сигнального тока.



сплошной график – измеренное значение обратного тягового тока в дроссель-трансформаторе;

пунктирный – значения тока, полученные с конечно-элементной модели

Рисунок 4.13 – Данные экспериментальной проверки модели токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов

### **Верификация модели теплового баланса дроссель-трансформатора.**

Экспериментальная проверка модели теплового баланса дроссель-трансформатора выполнена путем сравнения расчетной средней температуры масла с данными прямых измерений. Измерения проводились на дроссель-трансформаторе ДТ-0.6-1000 у светофора Чд, станции Сабик Свердловской железной дороги. Для измерения температуры использовались две термопары типа К, подключенные к системе регистрации значений на основе контроллера мониторинга сигнальной установки для обеспечения непрерывной регистрации температуры. Каналы измерения температуры были предварительно откалиброваны, на портативном калибраторе СЕМ ВХ-500, относительная погрешность не превышает 10%. Для подавления синфазных помех на соединительные провода термопар были одеты ферритовые кольца.

Условия проведения эксперимента:

- температура окружающего воздуха, порядка 10-12 °С;
- переменная облачность, порядка 50% небосвода затянуто облаками;
- ветер порывами до 3, м/с.

В ходе эксперимента регистрировалась температура верхних и нижних слоев масла дроссель-трансформатора. Одновременно с измерением температуры слоев масла производилась фиксация тока в дроссель-трансформаторе и расчет значения средней температуры масла, на основании предложенной ранее модели.

На рисунке 4.14 приведен совместный график измеренного значения тока дроссель-трансформатора, рассчитанных и измеренных температур, полученный в ходе эксперимента. Определить ошибку разработанной тепловой модели исходя из выражения (3.4) невозможно в силу положенных в основу тепловой модели упрощений. Отказ от анализа дивергенции удельного теплового потока в компонентах дроссель-трансформатора и поля скорости масла при конвективном теплообмене привели к более раннему росту температуры масла, полученному расчетным путем. В реальности между ростом значения обратного тягового тока и началом заметного изменения температуры слоев масла проходит некоторое время (12 минут по данным эксперимента), рисунок 4.15. Тем не менее, графическим путем можно численно оценить итоговую ошибку расчета температуры с учетом временного запаздывания, которая составила -2 °С. Таким образом, предложенная модель зависила расчетную температуру относительно фактической, что объясняется неполным учетом условий охлаждения корпуса дроссель-трансформатора, в модели скорость ветра постоянна. Исходя из вышесказанного модель теплового баланса дроссель-трансформатора следует признать верифицированной с учетом положенных в нее упрощений.

Предложенная в ходе диссертационного исследования модель теплового расчета и метод проверки прогнозного графика движения поездов оставляют запас по термической устойчивости дроссель-трансформаторов. Анализ данного запаса, и синтез методов, позволяющий его использовать – это тема дальнейших исследований автора.

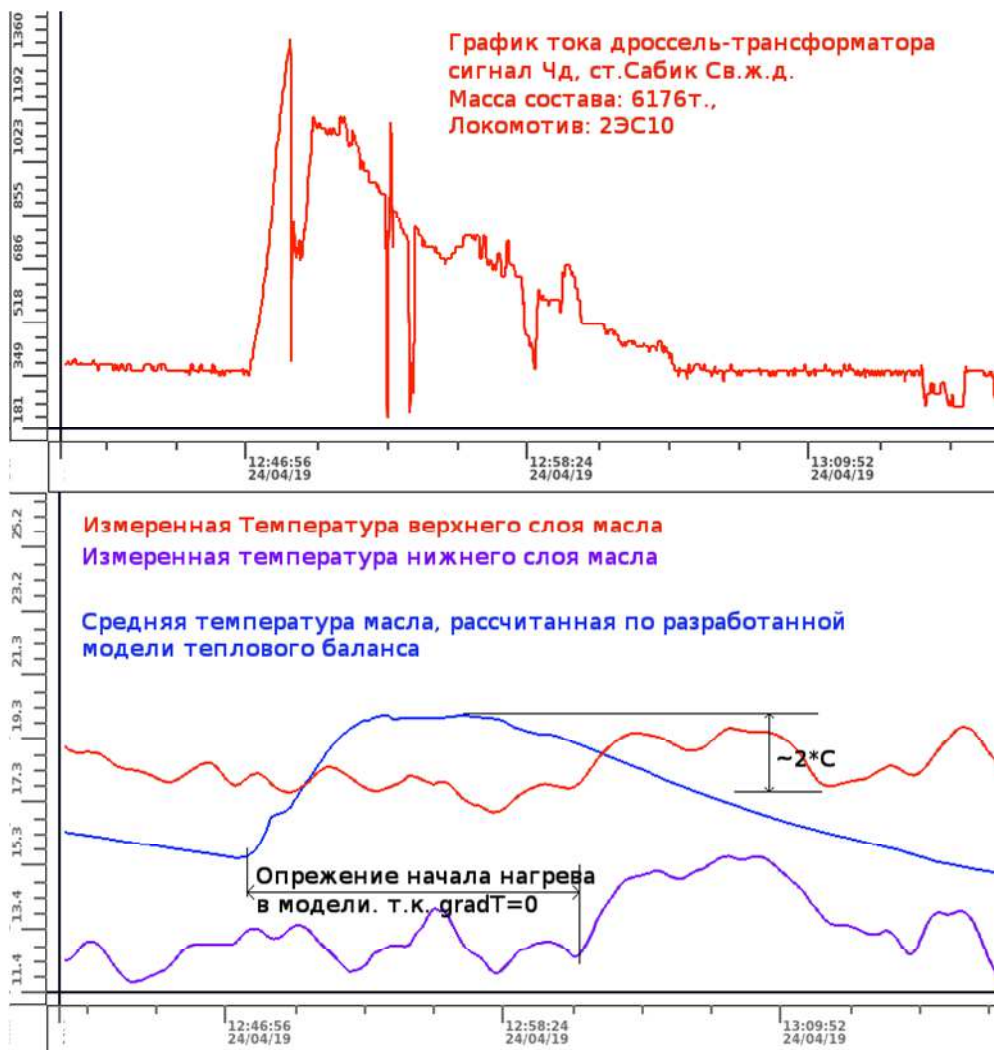


Рисунок 4.15 – Экспериментальная верификация модели теплового баланса дроссель-трансформатора

### Определение достаточности текущего уровня симметрии.

Данные использованные в экспериментальной верификации модели токо-распределения, были получены в ходе продолжительных (3 недели) измерений значений обратного тягового тока на указанном дроссель-трансформаторе. Собранный массив данных (регистрация проводилась раз в секунду), позволяет произвести статистическую обработку и используя предложенный ранее метод, определить коэффициент готовности дроссель-трансформатора по параметру асимметрии обратного тягового тока.

Гистограммы распределений значений обратного тягового тока и коэффициента асимметрии приведены на рисунке 4.16.



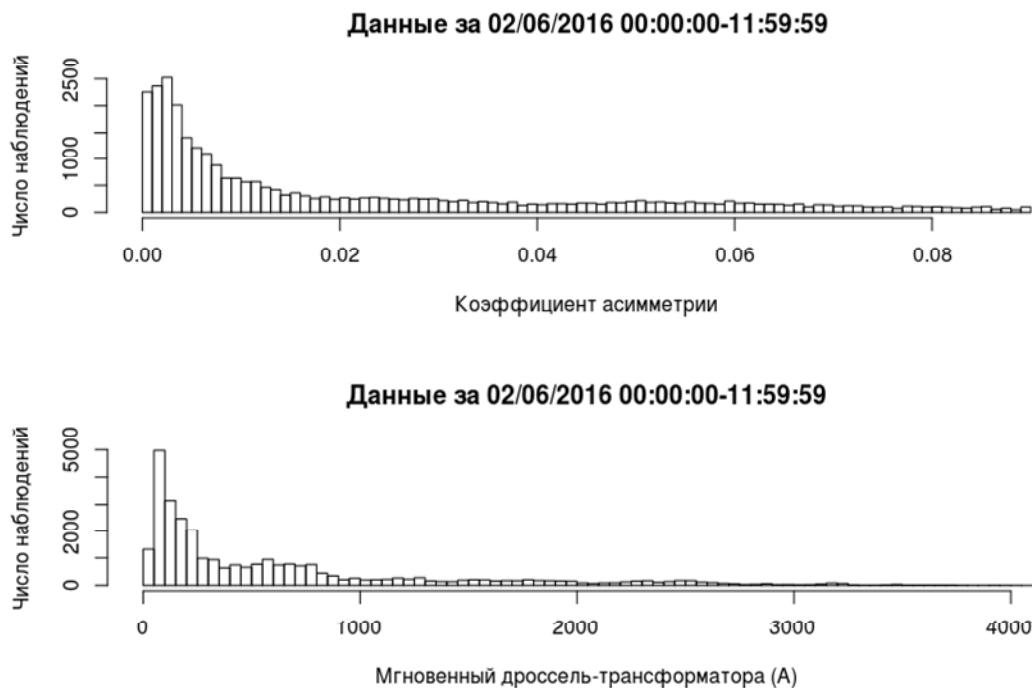


Рисунок 4.16 Статистические данные по току дроссель-трансформатора и коэффициенту асимметрии

В [114] указано, что для определения готовности по асимметрии обратного тягового тока является наличие известных законов распределения коэффициента асимметрии и обратного тягового тока, конкретного дроссель-трансформатора. На рисунке 4.17 приведены графики экспериментальных данных и подобранных теоретических законов, проведенные с применением программного обеспечения для статистических расчетов *RStudio*. Из приведенных графиков видно существенное расхождение между экспериментальными и теоретическими данными. Ошибка аппроксимации экспериментальных данных снизит точность определения коэффициента готовности. Поэтому, определение необходимых исходных данных производится с применением метода непосредственного подсчета вероятностей [123,124], применяя классическую формулу вероятности:

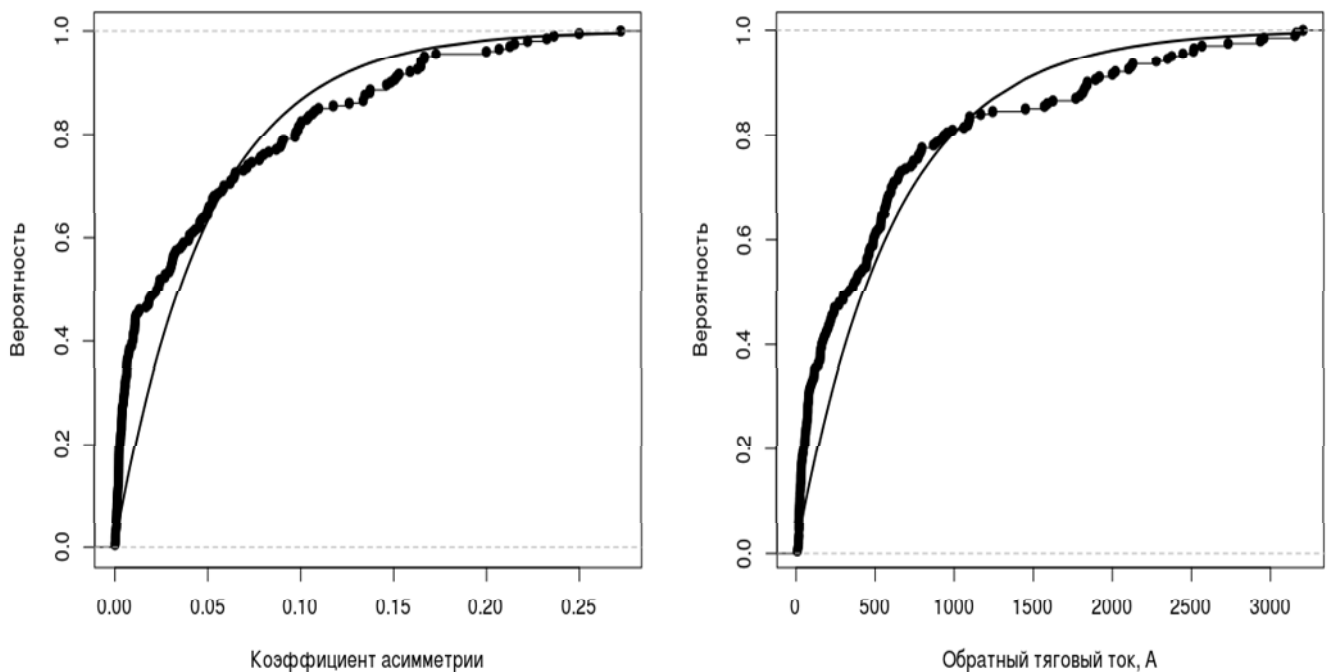
$$P(A) = \frac{n_A}{N}, \quad (4.6)$$

где  $P(A)$  – вероятность события;

$n_A$  – число случаев, благоприятных событию А;

$N$  – общее число случаев.

Тип дроссель-трансформатора дает градацию рисков отказа рельсовой цепи из-за асимметрии обратного тягового тока. В эксперименте учувствовал дроссель-трансформатор ДТ-0.6-1000, производства 1994 года. Тип металла, использованного для сердечника неизвестен. Поэтому для определения граничных значений был выбран наихудший вариант – максимальный конструктивный ток асимметрии дроссель-трансформатора составляет 240А.



тонкая линия – теоретический закон распределения,

точечный график – экспериментальные данные

Рисунок 4.17 – Кумулятивная диаграмма экспериментальных значений и график теоретического закона

Граничные значения категории рисков приведены в таблице 4.1. При расчете граничного значения для разделения областей нежелательного и допустимого риска было использовано значение разброса параметров в -10%, что дало граничное значение тока 216 А.

Таблица 4.1 – Граничные значения категорий рисков

Категория риска	Граничное значение
Недопустимый	$240 \leq I_{ac}$
Нежелательный	$216 \leq I_{ac} < 240$
Допустимый	$120 \leq I_{ac} < 216$
Незначительный	$0 \leq I_{ac} < 120$

Для каждого сочетания значения обратного тягового тока и коэффициента асимметрии определены значения тока асимметрии дроссель-трансформатора, таблица 4.2.

Таблица 4.2 – Определение значений тока асимметрии при различных сочетаниях коэффициента асимметрии и обратного тягового тока

Интервалы Коэффициента асимметрии		Интервалы значений обратного тягового тока дроссель-трансформатора				
		0-1000, А	1000-2000, А	2000-3000, А	3000-4000, А	4000-5000, А
		-	-	-	-	-
0-0,01	-	10	20	30	40	50
0,01-0,02	-	20	40	60	80	100
0,02-0,03	-	30	60	90	120	150
0,03-0,04	-	40	80	120	160	200
0,04-0,05	-	50	100	150	200	250
0,05-0,06	-	60	120	180	240	300
0,06-0,07	-	70	140	210	280	350
0,07-0,08	-	80	160	240	320	400
0,08-0,09	-	90	180	270	360	450
0,09-0,1	-	100	200	300	400	500
0,1-0,11	-	110	220	330	440	550
0,11-0,12	-	120	240	360	480	600
0,12-0,13	-	130	260	390	520	650
0,13-0,14	-	140	280	420	560	700
0,14-0,15	-	150	300	450	600	750

На основании полученного значения тока асимметрии выбрана соответствующая категория риска (под риском понимаем вероятность события) появле-

ния ложной занятости рельсовой цепи из таблицы 4.1. И построена матрица вероятностей, таблица 4.3, цвет ячейки матрицы показывает принадлежность к определенной категории риска.

Таблица 4.3 – Матрица вероятностей

Вероятность попадания Касимметрии в интервалы		Вероятность попадания обратного тягового тока ДТ в интервалы				
		0-1000, А	1000-2000, А	2000-3000, А	3000-4000, А	4000-5000, А
		0,781058	0,106964	0,0934188	0,0176291	0,000930
0-0,01	0,503202	0,393	0,0538	0,04700	0,0088	0,000468
0,01-0,02	0,100103	0,0781	0,0107	0,00935	0,00176	9,31E-05
0,02-0,03	0,0637951	0,049	0,0068	0,00595	0,00112	5,93E-05
0,03-0,04	0,0629795	0,0491	0,0067	0,00588	0,00111	5,86E-05
0,04-0,05	0,0554582	0,043	0,0059	0,00518	0,00097	5,16E-05
0,05-0,06	0,0466683	0,036	0,0049	0,00435	0,00082	4,34E-05
0,06-0,07	0,0311122	0,024	0,0033	0,00290	0,00054	2,89E-05
0,07-0,08	0,0230774	0,018	0,0024	0,00215	0,00040	2,14E-05
0,08-0,09	0,0189392	0,014	0,0020	0,00176	0,00033	1,76E-05
0,09-0,1	0,0155561	0,012	0,0016	0,00145	0,00027	1,44E-05
0,1-0,11	0,0130188	0,010	0,0013	0,00121	0,00022	1,21E-05
0,11-0,12	0,0127771	0,009	0,0013	0,00119	0,00022	1,18E-05
0,12-0,13	0,0141666	0,011	0,0015	0,00132	0,00024	1,31E-05
0,13-0,14	0,0214463	0,016	0,0024	0,00200	0,00037	1,99E-05
0,14-0,15	0,0177007	0,013	0,0018	0,00165	0,00031	1,64E-05

Для определения коэффициента готовности дроссель-трансформатора по асимметрии обратного тягового тока, необходимо просуммировать значения в ячейках зеленого и красного цвета, соответствующие наличию незначительного или допустимого риска отказа рельсовой цепи. По данным расчета коэффициент готовности данного дроссель-трансформатора к пропуску текущей токовой нагрузки составляет 0.972, что выше нормативного значения 0.96 [2], для двухпутных перегонов.

**Результаты исследования режимов работы дроссель-трансформаторов в различных условиях эксплуатации.**

Экспериментальная часть исследования включала в себя обследования

участков с различными условиями работы рельсовой линии. Были проведены исследования режимов работы дроссель-трансформаторов расположенных на горном и равнинном участках железной дороги. Данные диагностических параметров, предложенных в данной работе для обследованных дроссель-трансформаторов приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – значения диагностических параметров для дроссель-трансформаторов с различных участков

Параметр	Ст. Сабик, сигнал Чд, горный участок	Перегон Ревда–Дидино, СУ-19, равнинный участок
Максимальное значение обратного тягового тока	4246, А	1235, А
Среднегармоническое взвешенное значение обратного тягового тока	1150, А	1002, А
Максимальное значение температуры масла	109, °С	79, °С
Среднегармоническая температура масла	70, °С	20, °С
Среднее гармоническое взвешенное коэффициента 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

Полученные значения ожидаемо показывают большую нагрузку на дроссель-трансформатор, расположенный на горном участке. Тем не менее, более низкое среднее значение коэффициента асимметрии говорит о лучшем содержании рельсовой линии на горном участке. Тем не менее на горном участке, обследованный дроссель-трансформатор имеет расчетный ненормативный перегрев температуры масла, и необходимо рассмотреть вопрос его усиления. Данное обследова-

ние проводилось в марте – июне 2016 года, а летом 2018 года на нечетном перегоне Сабик-Сарга был проведен капитальный ремонт пути и указанный дроссель-трансформатор был заменен на ДТ-0.4-1500.

### **Выводы**

В данной главе решена последняя задача исследования: совершенствования средств мониторинга рельсовой цепи – на примере современной системы мониторинга на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллерах (СТД-МПК), совместной разработки ПГУПС и УрГУПС. В состав данной системы входит контроллер мониторинга сигнальной точки, устанавливаемый в релейном шкафу децентрализованной автоблокировки и контролирующей работу сигнальной установки. Его функции были расширены задачами измерения значений обратного тягового тока и тока асимметрии, а также расчётом предложенных в работе диагностических параметров и температур конструктивных элементов дроссель-трансформатора.

Усовершенствованный контроллер мониторинга был использован в ходе экспериментальной проверки предложенных во второй главе моделей: токораспределения в неоднородной рельсовой линии и теплового баланса дроссель-трансформатора. В ходе экспериментальной проверки модели были признаны адекватными с учетом принятых упрощений физической сути явлений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа посвящена повышению устойчивости работы рельсовых цепей с изолирующими стыками на участках обращения поездов повышенной массы и длины. Дроссель-трансформатор, как элемент рельсовой цепи, наиболее подвержен негативному влиянию возросших значений обратного тягового тока, при вводе тяжеловесного движения. Поэтому основное направление данной работы: это разработка метода обеспечения нормативных тепловых режимов дроссель-трансформатора в новых условиях. Обеспечение нормальных условий эксплуатации дроссель-трансформатора основано на определении минимально допустимого интервала попутного следования поездов с учетом мгновенных значений обратного тягового тока и его теплового воздействия. Так же проработан вопрос совершенствования средств мониторинга рельсовой цепи: предложены диагностические параметры, средства и методы для контроля режимов работы рельсовой линии.

В данной диссертационной работе решены следующие задачи:

1) Проанализированы применяемые в настоящее время методы расчета наличной пропускной способности, токораспределения в рельсовых линиях участков железных дорог, тепловые модели силовых масляных трансформаторов и экспериментальные исследования термической устойчивости дроссель-трансформаторов, а также принципы синтеза систем мониторинга.

2) Разработана конечно-элементная модель расчета токораспределения в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов, позволяющая определять мгновенные значения тока в любой точке рельсовой линии и моделировать аварийные режимы работы;

3) Разработана аналитическая модель теплового расчета дроссель-трансформатора, учитывающая процессы теплопередачи между его компонентами: сердечником, токовой обмоткой, маслом и корпусом. Учтены следующие виды теплоотдачи с корпуса дроссель-трансформатора: теплопередачей в грунт,

конвекцией в воздух и излучением в окружающую среду, а также учитывается нагрев корпуса солнечной радиацией;

4) Разработан метод численной оценки достаточности симметрии рельсовой линии для исключения ложной занятости рельсовой цепи, вследствие насыщения магнитопровода дроссель-трансформатора;

5) Разработан метод определения интенсивности отказов дроссель-трансформатора с учетом тепловых и токовых режимов работы;

6) Для систем мониторинга предложен набор диагностических параметров позволяющий контролировать режимы работы рельсовой линии. Функциональное наполнение системы технической диагностика на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров (СТД-МПК) расширено. Добавлены: измерения значений обратного тягового тока и тока асимметрии, расчет температуры элементов дроссель-трансформатора и контроль диагностических параметров, предложенных в данной работе.

Полученные в ходе работы результаты позволяют корректировать график движения поездов, основываясь на фактических данных по нагрузке на элементы рельсовой цепи, что позволит избежать ненормативных режимов работы, сократить количество отказов рельсовой цепи и их негативное влияние на эффективность перевозочного процесса. При невозможности изменения графика движения поездов, разработанные методы позволяют обосновать необходимый перечень работ по усилению обратной тяговой сети, избегая сплошной замены дроссель-трансформаторов, что повысит эффективность инвестиций.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2020 г. и перспективу до 2025 г. [Текст] // Белая книга. – М.: ОАО «РЖД», 2015. – 98 с.
2. Инструкция по расчету наличной пропускной способности [Текст] / М.: ОАО «РЖД», 2010.–350 с.
3. Методика расчета эффективных токов в элементах обратной тяговой рельсовой сети при электротяге постоянного и переменного тока [Текст] / М.: МПС РФ, 2001.– 19 с.
4. Аркатов, В.С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог [Текст]: справочник, 3-е издание, переработанное и дополненное / В.С.Аркатов, Ю.В.Аркатов, С.В.Казеев, Ю.В.Ободовский // . – М.: «ООО Миссия -М», 2006. – 496 с.
5. Пенкин, Н.Ф. Рельсовые цепи переменного тока с дроссель-трансформаторами [Текст] / Н.Ф. Пенкин // Сб.научн.трудов / ВНИИЖТ – М.: ВНИИЖТ, 1963. вып. 83. – С. 144
6. Котельников, А.В. Особенности работы дроссель-трансформаторов в условиях обращения тяжеловесных поездов [Текст] / А.В. Котельников, А.В. Наумов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1980. – № 11. – С. 8-12
7. Котельников, А.В. обратная тяговая сеть переменного тока при пропуске поездов повышенной массы [Текст] / А.В. Котельников, А.В. Наумов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1983. – № 4. – С. 5-8
8. Котельников, А.В. Оптимизация параметров цепей обратного тока тягового электроснабжения в условиях интенсификации движения и повышения весовых норм поездов [Текст] / Котельников А.В., Наумов А.В., Наумов А.А., Закиев Е.Э.// Вестник ВНИИЖТ. – 2006. – № 1. – С. 3-12
9. Наумов, А.А. Электромагнитная совместимость тяговых сетей электрифицированных железных дорог рельсовыми цепями при пропуске поездов по-

вышенного веса и длины : дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.22.07 [Текст] / Наумов Алексей Анатольевич. – Москва, 2003 – 197 с.

10. Наумов, А.В. Потенциал рельсов и электробезопасность [Текст] / А.В. Наумов, А.А. Наумов // Автоматика связь информатика – 2014. – № 5 – С. 20-23

11. Лыгин, Ю.А. Дискретная модель оценки коэффициента асимметрии стекания обратного тягового тока [Текст] / Ю.А. Лыгин // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 4. – С. 110-119

12. Наумов, А.В. Усиление требований к тяговой рельсовой сети как важнейшей составляющей инфраструктуры электрифицированных железных дорог в условиях повышенных объемов перевозок [Текст] / А.В. Наумов, А.А. Наумов // Вестник НИИЖТ – 2012. – № 4. – С. 43-48.

13. Котельников, А.В. Тепловые режимы работы соединителей и сборных стыков [Текст] / А.В. Котельников, А.В. Наумов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1980. – № 12. – С. 9-10

14. Абусеридзе, З.В. Учитывать температуру элементов [Текст] / З.В. Абусеридзе, Е.Ю. Шевцов // Локомотив. – 2014. – № 7 (691). – С. 42-43

15. Бушуев, В.И. Рельсовые цепи: теоритические основы и эксплуатация [Текст] / В.И. Бушуев, А.В. Бушуев, С.В. Бушуев С.В. // Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 311 с.

16. Сороко, В.И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / В.И. Сороко, В.А. Милюков // Справочник: в 2 кн. Кн. 1. – 3. изд. – М.: НПФ «ПЛАНЕТА», 2000. – 960 с.

17. Тер-Оганов, Э.В. Моделирование работы системы электроснабжения железной дороги [Текст] / Э.В. Тэр-Оганов // Конспект лекций. – Екатеринбург: УрГУПС, 2007. – 83 с.

18. Паранин, А.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.

19. ГОСТ 14209–85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки [Текст]. – М.: ФГУП «Стандартинформа», 1985 – 38 с.

20. Боднар, В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов [Текст] / В.В. Боднар // М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
21. Киш, Л. Нагрев и охлаждения трансформаторов [Текст]: Пер. с венгерского / ред. Тарле Г.Е., Л. Киш – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
22. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов [Текст]: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп / П.М. Тихомиров – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
23. Готтер, Г. Нагревание и охлаждение электрических машин [Текст]: Пер. с нем. / Г. Готтер – Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 264 с.
24. Васютинский, С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов [Текст] / С.Б. Васютинский // Л.: «Энергия», 1970. – 432 с.
25. Бушуев, С.В. Теплофизический расчет дроссель-трансформатора [Текст] / С.В. Бушуев, Б.В. Рожкин // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – №6. – С. 45-54.
26. Залесова, О.В. Распределение тяговых токов в контактной сети двухпутного участка железной дороги [Текст] / О.В.Залесова, П.И.Прокопчук // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – № 8 (34). – С. 69-73.
27. Саблин, О.И. Повышение эффективности рекуперации энергии в системе электротранспорта при ограниченном тяговом электропотреблении [Текст] / О.И. Саблин // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 1. Т. 6 – С. 21-26.
28. Сопов, В.И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе [Текст] / В.И. Сопов, Н.И. Щуров // Новосибирск: НГТУ, 2013. – 728 с.
29. Черемисин, В.Т. Токораспределение в системе тягового электроснабжения при наличии рекуперации электрической энергии [Текст] / В.Т. Черемисин, П.В. Тарута // Разработка и исследование автоматизированных средств контроля и управления для предприятий железнодорожного транспорта: сб. статей. – Омск: ОмГУПС, 2005. – С. 15-18.
30. Закарюкин, В.П. Токораспределение в проводах высоковольтных ли-

ний электропередачи [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Системы, методы, технологии – 2009. – № 3. – С. 59-64

31. Чернов, Ю.А. Токораспределение в автотрансформаторной системе [Текст] / Ю.А. Чернов // Мир транспорта –2013 – № 5 (49) – С. 10-18

32. Закарюкин, В.П. Токораспределение в проводах линий электропередачи с расщепленными фазами [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 1. – С. 54-61.

33. Чернов, Ю.А. Многопроводные тяговые сети переменного тока [Текст] / Ю.А. Чернов, М.С. Гаврилов // Мир транспорта – 2014. – № 4 (53) – С. 16-23.

34. Ахметбаев, Д.С. Метод расчета уставившихся режимов электрических сетей на основе коэффициентов токораспределения [Текст] / Д.С. Ахметбаев // Электричество – 2010. – № 11 – С. 23-27.

35. Жуков, Л.А Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем [Текст] / Л.А. Жуков, И.П. Стратан. – М.: Энергия, 1979. – 413 с.

36. Александров, Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи [Текст] / Г.Н. Александров. - СПб.: ЦПКЭ, 2006. - 139 с.

37. Веников, В. А. Электрические системы. Электрические сети [Текст] / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков [и др.]. – М.: Высш. школа, 1998. – 511 с.

38. Александров, Г.Н. Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах [Текст] / Г. Н. Александров, Г. А. Евдокунин, Т. В. Лисочкина [и др.]. - Л. :Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. - 232 с.

39. Мукосеев, Ю.Л. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] / Ю. Л. Мукосеев. – М.: Энергия, 1973. – 584 с.

40. Чальян, К.М. Методы расчета электромагнитных параметров токопроводов [Текст] / М. К. Чальян. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 280 с.

41. Закарюкин, В. П. Сложно симметричные режимы электрических систем [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2005. – 273 с.

42. Карякин, Р.Н. Тяговые сети переменного тока [Текст] / Р.Н. Карякин – М.: Транспорт, 1987. – 279 с.

43. Бочев, А.С. Электротяговая сеть с усиливающим и обратным проводом [Текст] / А.С. Бочев, В.В. Мунькин, Е.П.Фигурнов // Железные дороги мира. – 1997. – № 11. – С. 8–12.
44. Чернов, Ю.А. Оптимизация развития системы тягового электроснабжения методом динамического программирования [Текст] / Ю.А. Чернов // Транспорт Урала. – 2012. – № 3. – С. 90–93.
45. Чернов, Ю. А. Электроснабжение электрических железных дорог [Текст] : учеб. пособие. / Ю.А. Чернов– М.: МИИТ, 2005. – 154 с.
46. Тэр-Оганов Э.В. Моделирование работы системы электроснабжения электрифицированных железных дорог [Текст]: метод указания, 2-е изд. доп. и перераб / Э.В. Тер-Оганов, К.П. Луковкин, Н.С. Емельянов. — Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 51с.
47. Закарюкин, В.П. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения при движении тяжеловесных поездов [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.В. Черепанов // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 11. – С. 133–142
48. Крюков, А.В. Моделирование систем электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, С.М. Астахин // Проблемы энергетики. – 2008. – № 3-4.– С. 134–139
49. Крюков, А.В. Компьютерные технологии для моделирования систем электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин // Транспорт российской федерации. – 2010. – № 3 (28). – С. 61–65
50. Закарюкин, В.П. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения при движении высокоскоростных поездов [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.М. Авдиенко, Е.С. Безридный // Современные технологии, системный анализ, моделирование. – 2017. – № 3 (55). – С.126–135
51. Лунев, С.А. Канализация обратного тягового тока в условиях пропуска тяжеловесных поездов [Текст] / С.А. Лунев, С.С. Сероштанов, А.Г. Ходкевич // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции ОмГУПС. Омск, 2018. – С. 247–254
52. Пышкин, А.А. Электроснабжение железных дорог [Текст] /

А.А.Пышкин – Екатеринбург: УрГУПС, 216 – 371с.

53. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / К.Г. Марквардт – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

54. Каллер, М.Я. Теория линейных электрических цепей [Текст] / М.Я. Каллер – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 495с.

55. Бушуев, В.И. Проблемы и перспективы рельсовых цепей [Текст] / В.И. Бушуев, Л.В. Оводков // Автоматика, телемеханика и связь. – 1985. – № 4. – С. 26-28

56. Оводков, Л.В. Рельсовые стыковые соединители [Текст] / Л.В. Оводков, В.Я. Литвинов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1985 – № 4 – С. 35-37

57. Кириленко, А.Г. Исследование работы рельсовых цепей на участках с тяжеловесным движением [Текст] /А.Г. Кириленко, Ю.В. Кузнецов, Д.А. Фоминов //Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 10. – С. 14-17

58. Карта технологического процесса № КТП ЦШ 0156-2015. Электрические рельсовые цепи, измерение асимметрии обратного тягового тока [Текст]: утв. ЦДИ ОАО «РЖД», 2015. – 8 с.

59. Дмитренко, И.Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [Текст]: Учебник для вузов ж.д. трансп. Под ред. И.Е.Дмитренко / И.Е. Дмитренко, В.В. Сапожников, Д.В. Дьяков М.: Транспорт, 1994. – 263 с.

60. Технические решения 62130-22ТР. Унификация информационного взаимодействия систем технического диагностирования и мониторинга с автоматизацией обмена с АСУ-Ш-2 [Текст]: утв. ЦДИ ОАО «РЖД», 2007. – 81 с.

61. Паранин, А.В. Анализ условий работы рельсовой линии на основе моделирования растекания обратного тягового тока [Текст] / А.В. Паранин, Б.В. Рожкин // Транспорт Урала. – 2018. – № 4 (59). – С. 28–34.

62. Лесников, Д. В. Совершенствование методики расчета протяженных заземлителей на участках постоянного тока [Текст] / Д.В. Лесников // Транспорт Урала. – 2017. – № 1 (52). – С. 71–76.

63. Лесников, Д.В. О подходе к расчету электрического сопротивления железобетонных конструкций [Текст] / Д.В. Лесников, А.В. Паранин // Известия Транссиба. – 2017. – № 3. – С.102-114.

64. Лесников, Д.В. О возможности применения метода конечных элементов при расчете протяженного дренающего заземляющего устройства [Текст] / Д.В. Лесников // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог : м-лы Междунар. науч.-практ. конф. — Екатеринбург : УрГУПС, 2017. — вып. 8 (227). — С. 80-92.

65. Лесников, Д.В. Методы исследования системы «рельсы-протяженный заземлитель» [Текст] / Д.В. Лесников // Техника и технологии наземного транспорта: мат. всеросс. науч. конф. аспирантов / УрГУПС – Екатеринбург, 2018 – Вып. 2(232) – С. 121-124.

66. Урцева, В.С. Влияние асимметрии обратного тягового тока на работу рельсовых цепей [Текст] / В.С. Урцева, Н.В. Стадухина, К.В. Менакер // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2011. – № 1. – Т.1. – С. 188-197

67. Шнырев, А. П. Технологические основы сварочных процессов [Текст] / А.П. Шнырев, С.Ю. Козлов – М.: Агар, 2001 – 152 с.

68. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – Москва, 1967. – 592с.

69. Юдаев, Б.Н. Теплопередача [Текст] / Б.Н. Юдаев. – Высшая школа, 1973. – 353с.

70. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст]: Учебник для вузов, Изд. 3–е, перераб. и доп. / В.П. Исаченко – М.: «Энергия», 1975. – 488 с.

71. Пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91 Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения [Текст]. – М.: ГУП ЦПП, 1993. – 32 с.

72. Влияние препятствий солнечным лучам на выработку энергии солнечными панелями [Электронный ресурс]. <http://www.solarhome.ru/basics/pv-info/techorient.htm> (дата обращения: 26.04.2018).

73. Щукин, А.А. Теплотехника [Текст] / А.А. Щукин, И.Н. Сушкин – М.:

«Металлургия», 1973 – 479 с.

74. Кудинов, А.А. Теплообмен [Текст]: Учеб.пособие. / А.А. Кудинов – М.: «ИНФРА-М», 2015 – 375 с.

75. Макарович, А.М. Интенсификация перевозочной работы железных дорог на основе устойчивого обращения блок-поездов / Интенсификация перевозочного процесса. Автоматизация управления // Сб. научн. тр. / МИИТ – М.: МИИТ, 1988г. – вып. 806. – С. 4-37

76. Шаров, В.А. Надежность технических средств и пропускная способность участков по перегонам [Текст] / В.А. Шаров // Интенсификация перевозов на железнодорожном транспорте: сб. научн. Трудов. ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1989. – С. 22-28

77. Шишков, В.Д. Народно-хозяйственная эффективность повышения надежности технических средств железнодорожного транспорта [Текст] / В.Д. Шишков – М.: Транспорт, 1986. – 183с.

78. Шульженко, П.А. Организация пропуска сдвоенных поездов на двухпутных направлениях [Текст] / Труды БелИИЖта, вып. 125. Гомель, 1973. – с. 47-58.

79. Паристый, И.Л. Вождение поездов повышенного веса и длины (опыт Московской железной дороги) [Текст] / И.Л. Паристый, Р.Г. Черепашенец – М.:Транспорт. 1983. – 239 с.

80. Лисицин, А.Л. Интенсификация работы железных дорог на основе повышения массы поездов [Текст] / А.Л. Лисицин // Сб.науч.трудов / ВНИИЖТ. – М.: Траспорт. 1985. – вып. 345. – С. 3-11

81. Степенский, Б.М. Оценка последствий отказов устройств автоматики на пропускную способность железнодорожных линий [Текст] / Б.М. Степенский, Р.Ш. Ягудин // Сб.научн.трудов / МИИТ. – М.: МИИТ, 1974. – вып. 452. – С. 83-84

82. Шаманов, В.И. Надежность и эффективность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст]: Учебное пособие / В.И. Шаманов – Алматы: АлЖИТ, 1992. – 78 с.

83. Шаманов, В.И. Автоматический контроль в кодовых рельсовых цепях



[Текст] / В.И. Шаманов, Г.К. Шаклин, В.П. Мхалдык // Автоматика, телемеханика и связь. – 1993. – № 3 – С. 27-29

84. Шишляков, А.В. Эксплуатационная надежность устройств автоблокировки и АЛС [Текст] / А.В. Шишляков, Ю.А. Кравцов, А.Ф. Михайлов – М.: Транспорт, 1969. – 96 с.

85. Шаманов В.И. Теория и методы управления технической эксплуатацией систем интервального регулирования движения поездов: дис. ... на соиск. уч. ст. докт. техн. наук: 05.22.08 [Текст] / Шаманов Виктор Иннокентьевич. – Иркутск, 1997. – 423 с.

86. Баранов, А.М. Рациональные загрузки железнодорожных линий [Текст] / А.М. Баранов, В.Е. Козлов, А.Д. Чернов // Сб. науч. трудов / ВНИИЖТ. – М.: ВНИИЖТ, 1998. – вып. 361 – 208 с.

87. Козлов, В.Е. Эффективность диспетчерской централизации однопутных и двухпутных линий [Текст] / В.Е. Козлов // Сб. науч. труд / ВНИИЖТ. – М.: ВНИИЖТ, 1969. – вып. 167 – 151 с.

88. Козлов, В.Е. Пропускная способность железнодорожных линий и надежность технических устройств [Текст] / В.Е. Козлов // Вестник ВНИИЖТ. – 1979. – № 4. – С. 1-6.

89. Разгонов, А.П., Критерий эффективности функционирования автоблокировки с учетом ее надежности [Текст] / А.П. Разгонов, В.М. Абрамов, Б.А. Давлетьяров // Вестник ВНИИЖТ. – 1977. – №1. – С. 51-54

90. СТО РЖД 1.07.002–2010 Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования [Текст]. – М.: ОАО «РЖД», 2010. – 42 с.

91. Методика оценки и планирование показателя качества технической эксплуатации средств ЖАТ [Текст]: утв. ОАО «РЖД» 23.12.2013 – 31 с.

92. Методическое руководство по управлению ресурсами и рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики на основе методологии УРРАН [Текст]: утв. ОАО «РЖД», 08.12. 2012. – 167 с.

93. Методика расчета показателей эксплуатационной надежности объектов

хозяйства автоматики и телемеханики [Текст]: утв. ТЩ1 ЦДИ ОАО «РЖД», 28.11.2011 – 45 с.

94. Методика оценки ущерба от инцидентов, вызывающих нарушение графика движения поездов [Текст]: утв. ОАО «РЖД», 06.08.2015 – 37 с.

95. СТО РЖД 02.044-2011 Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Термины и определения [Текст]. – М.: ОАО «РЖД», 2011 – 41 с.

96. Шаманов, В.И. Надежность и эффективность средств перегонной автоматики [Текст] / В.И. Шаманов // Микропроцессорные системы на железнодорожном транспорте: сб.научн.тр – Л.: ЛИИЖТ, 1991. – С. 90-93

97. Дьяков, Ю.В. Повышение уровня использования пропускной способности [Текст] / Ю.В. Дьяков // Совершенствование технологии перевозок и увеличение пропускной способности железных дорог: сб.научн.трудов / МИИТ. – 1983. – вып.736 – С. 68-72

98. Гуменюк, В.М. Принципы выбора диагностических параметров [Текст] / В.М. Гуменюк // Вологодские чтения. – 2008. – №69. – С. 152–153

99. Кашковский, В.В. Оценка характеристик надежности невостанавливаемых изделий при эксплуатации пор ресурсу [Текст] / В.В. Кашковский, В.В. Разумов // Известия ИГЭА. – №1. – С. 28-30.

100. Гиря, М.П. Прогнозирование остаточного ресурса электрооборудования АЭС [Текст] / М.П. Гиря // Энергетика. – 2010. – №4. – С. 25-32

101. Окладникова Е.Н. Оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации с учетом случайных факторов [Текст] / Е.Н. Окладникова, Е.В. Сугак //Авиационная и ракетная техника. – 2011. – С. 132-136.

102. Малафеев, С.И. Надежность технических систем [Текст]: Примеры и задачи. Учебное пособие. / С.И.Малафеев, А.И. Копейкин – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 320 с.

103. Половко, А.М. Основы теории надежности [Текст]: 2-е изд., перераб. и доп. / А.М. Половко, С.В. Гуров – СПб.: БХВ–Петербург, 2006. – 704 с.

104. Рожкин, Б.В. Оценка влияния реконструкции на параметры надежности

обратной тяговой сети / Б.В. Рожкин // Инновационный транспорт – Екатеринбург: УрГУПС. – 2016. – № 4 (19). – С. 37–42.

105. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды [Текст] – М.: Изд-во стандартов, 1969 – 60 с.

106. Надежность радио изделий. [Электронный ресурс] [https://chipinfo.pro/books/Reliability\\_\(2006\).pdf](https://chipinfo.pro/books/Reliability_(2006).pdf) (дата обращения 04.09.2019)

107. Клашанов, Ф.В. Дискретный анализ информационных систем [Текст]: Учебное пособие / Ф.В. Клашанов – М.: НИУ МГСУ, 2015. – 208 с.

108. Хохлов, Г.И. Комбинаторная теория информации: монография [Текст] / Г.И. Хохлов – М.: Издательство «Русайнс», 2014. – 280 с.

109. Демиденко, Е.З., Линейная и нелинейная регрессия [Текст]. / Е.З. Демиденко – М.: «Финансы и статистика», 1981. – 291 с.

110. Левитин, А.В. Алгоритмы. Введение в разработку и анализ [Текст] / А.В. Левитин, – М.: Вильямс, 2006 – 576 с.

111. Рожкин, Б.В. Учет влияния условий эксплуатации на параметры надежности обратной тяговой сети [Текст] / Б.В. Рожкин // Транспорт Урала. – 2016. – № 4 (51). – С. 47–51.

112. Устройства и элементы рельсовых цепей и обратной тяговой сети [Текст]: технические требования и нормы содержания [утв. ОАО «РЖД», 2012] – 32 с.

113. ГОСТ Р 54505-2011 Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте [Текст] – М.: ОАО «РЖД», 2011 – 53 с.

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

115. Набойченко, И.О. Полигонные технологии тяжеловесного движения [Текст] / И.О. Набойченко // Железнодорожный транспорт. – 2015. № 6 – С. 17–22.

116. Заровняев, А.А. Принципы полигонной технологии пропуска совме-

щенного потока поездов. [Текст] / А.А. Заровняев, И.О. Набойченко // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 7. – С. 41–43

117. Бушуев, С.В. Возможности применения системы технического диагностирования и удаленного мониторинга на базе микроЭВМ и программируемых контроллеров [Текст] / С.В. Бушуев, К.В. Гундырев, Б.В. Рожкин // Автоматика на транспорте. – 2016. – № 4. Т. 2. – С. 513–529

118. Андрончев, И.К. Влияние неисправного состояния сборных токопроводящих стыков на работу рельсовых цепей [Текст] / И.К. Андрончев, А.Г. Исайчева, Е.М. Тарасов, В.Б. Тепляков, А.А. Булатов // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 6 (72). – С. 40–45

119. Железнов, Д.В. Концепция мониторинга и диагностики состояний токопроводящих стыков [Текст] / Д.В. Железнов, А.Г. Исайчева // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 4 (52). – С. 15–18

120. Белоногов, А.С. Интерполяция сопротивления рельсовых линий инвариантной системы контроля обратной тяговой сети [Текст] / А.С. Белоногов, Л.Г. Герус, А.Г. Исайчева // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 5 (53). – С. 28–31

121. Рожкин, Б.В. Измеритель значений тягового тока и его асимметрии в обратной тяговой сети [Текст] / Б.В. Рожкин // Инновационный транспорт. – 2013. – № 4 (10). – С. 59–64

122. Рожкин, Б.В. Проблемы точности измерения асимметрии тягового тока в автоматическом режиме [Текст] / Б.В. Рожкин // Инновационный транспорт. – 2017. – № 1. – С. 43–47.

123. Вентцель, Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст]: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., стер./ Е.С. Вентцель – М.:Высш.шк., 2000.– 480 с.

124. Меньшиков, Н.Я. Надежность железнодорожных систем автоматики и телемеханики [Текст] / Н.Я. Меньшиков, А.И. Королев, Р.Н. Ягудин – М.: «Транспорт», 1976. – 215 с.

ЗАВИСИМОСТИ ТОКА РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ И ПОТЕНЦИАЛА РЕЛЬС–  
ЗЕМЛЯ ОТ КООРДИНАТЫ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ  
ИЗОЛЯЦИИ В НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

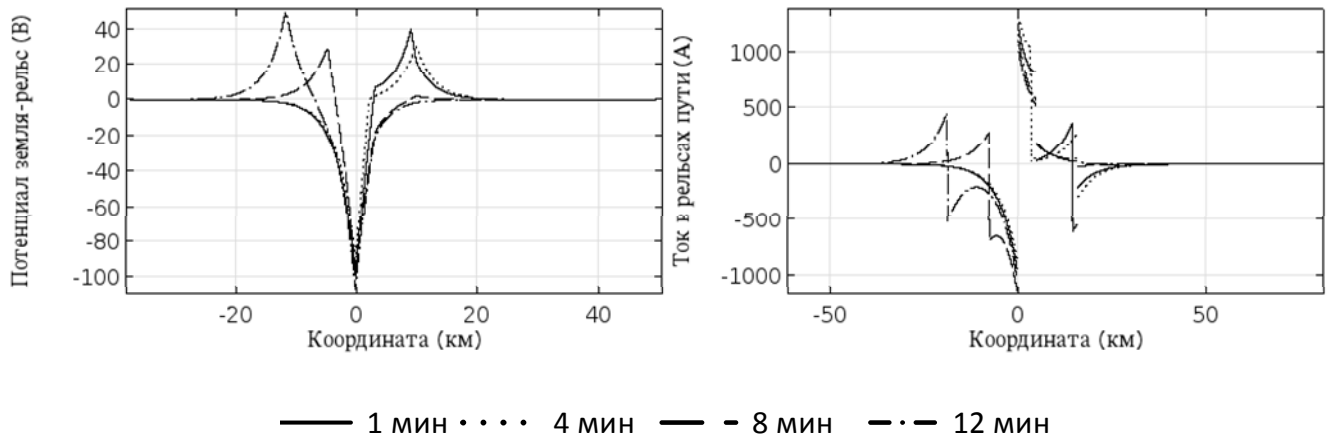


Рисунок А.1. Распределение потенциала рельс–земля и обратного тягового тока в рельсовой линии четного перегона, при сопротивлении изоляции 0.5 Ом/км, в различные моменты времени

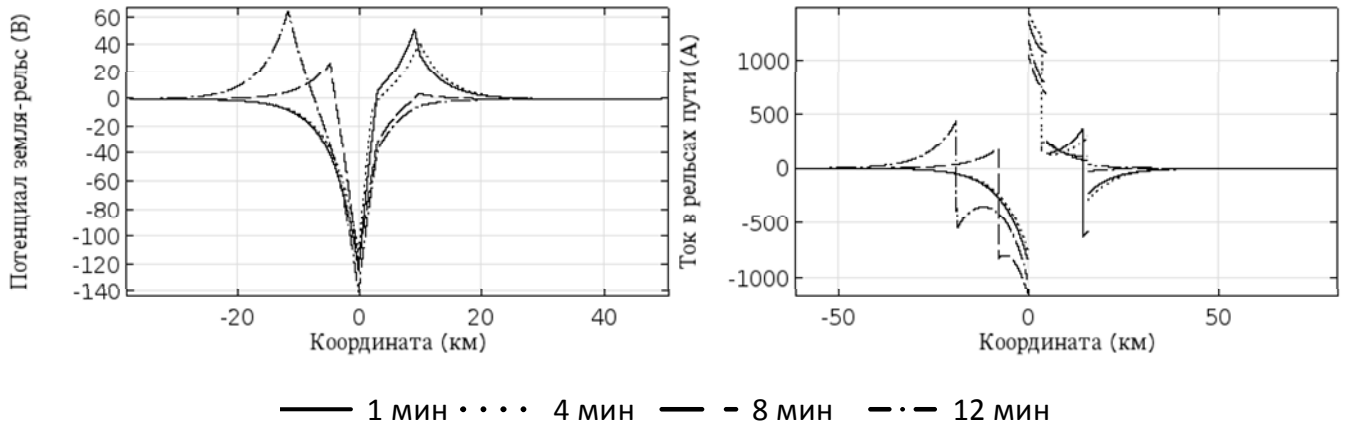


Рисунок А.2. Распределение потенциала рельс–земля и обратного тягового тока в рельсовой линии четного перегона, при сопротивлении изоляции 1 Ом/км, в различные моменты времени

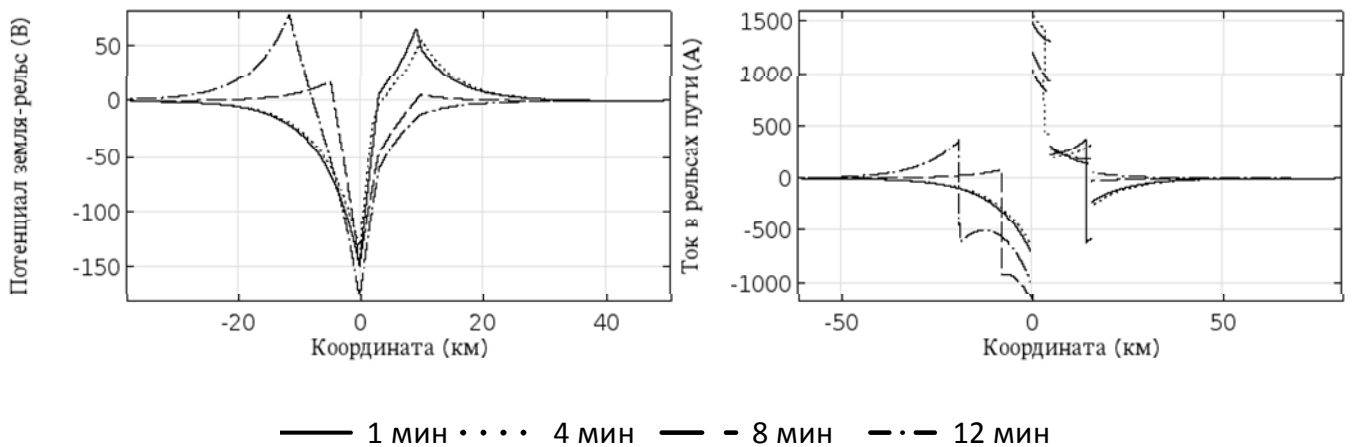


Рисунок А.3. Распределение потенциала рельс–земля и обратного тягового тока в рельсовой линии четного перегона, при сопротивлении изоляции 2 Ом/км, в различные моменты времени

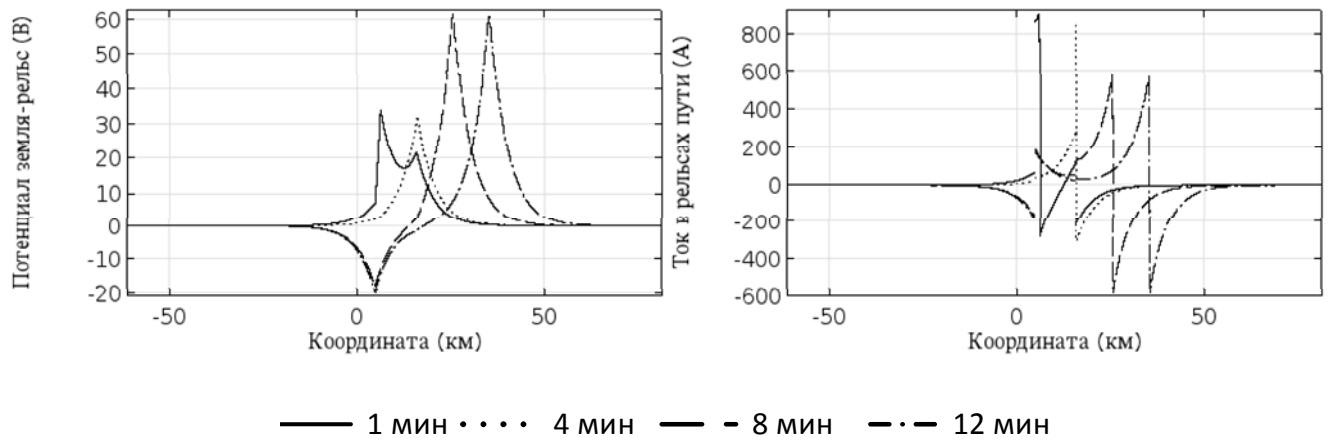


Рисунок А.4. Распределение потенциала рельс–земля и обратного тягового тока в рельсовой линии нечетного перегона, при сопротивлении изоляции 1 Ом/км, в различные моменты времени

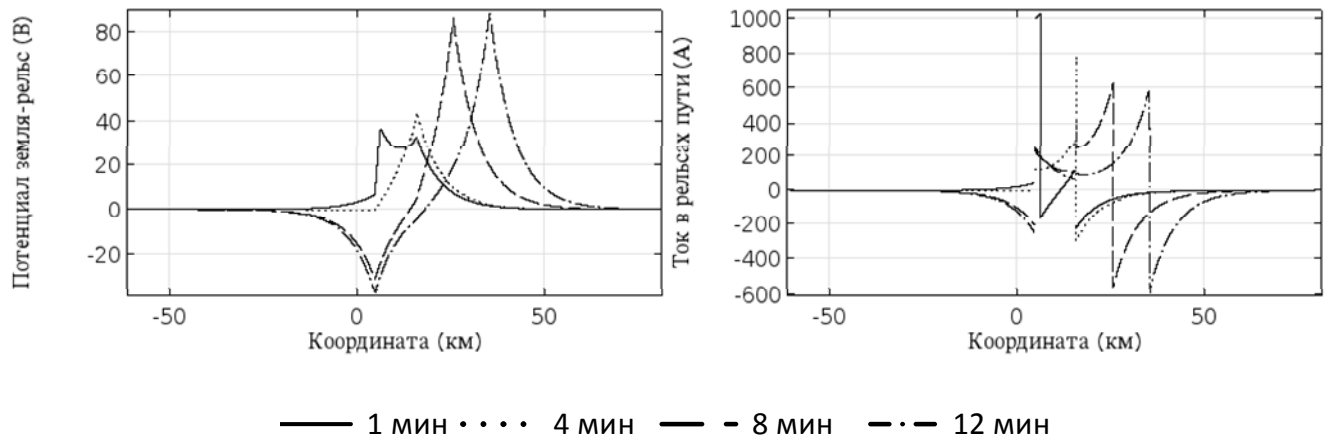


Рисунок А.5. Распределение потенциала рельс–земля и обратного тягового тока в рельсовой линии нечетного перегона, при сопротивлении изоляции 1 Ом/км, в различные моменты времени

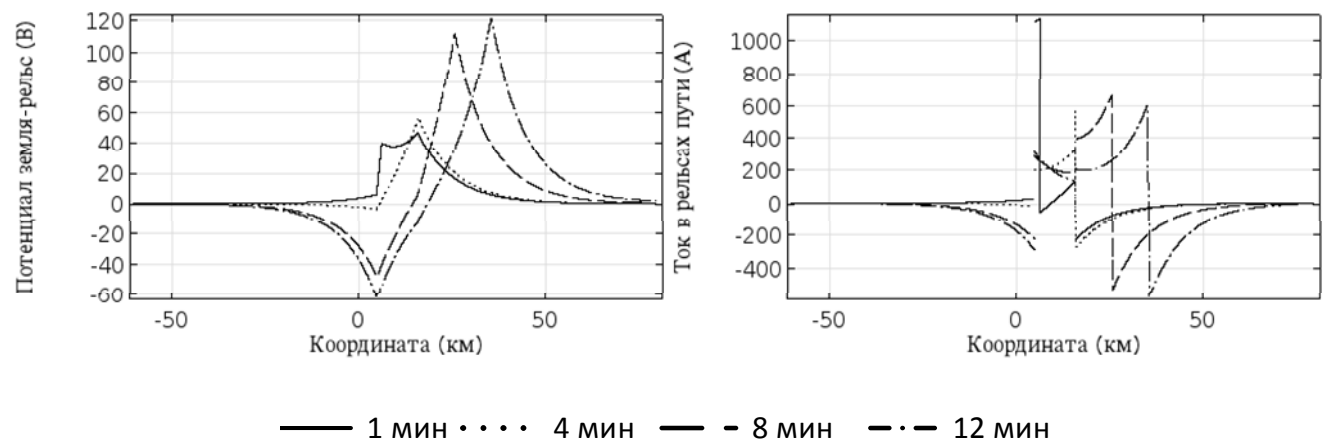


Рисунок А.6. Распределение потенциала рельс–земля и обратного тягового тока в рельсовой линии нечетного перегона, при сопротивлении изоляции 1 Ом/км, в различные моменты времени

ЗАВИСИМОСТИ ТОКА РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ И ПОТЕНЦИАЛА РЕЛЬС–  
ЗЕМЛЯ ОТ КООРДИНАТЫ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ  
ИЗОЛЯЦИИ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ



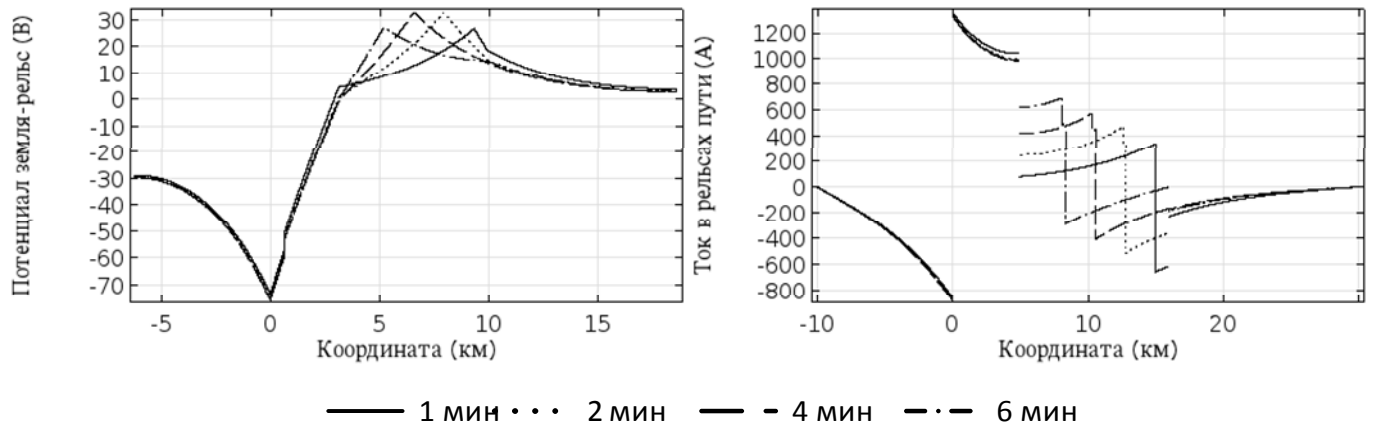


Рисунок Б.1 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления  $0,01 \text{ Ом}$ , при переходном  $0,5 \text{ Ом/км}$  для различных моментов времени

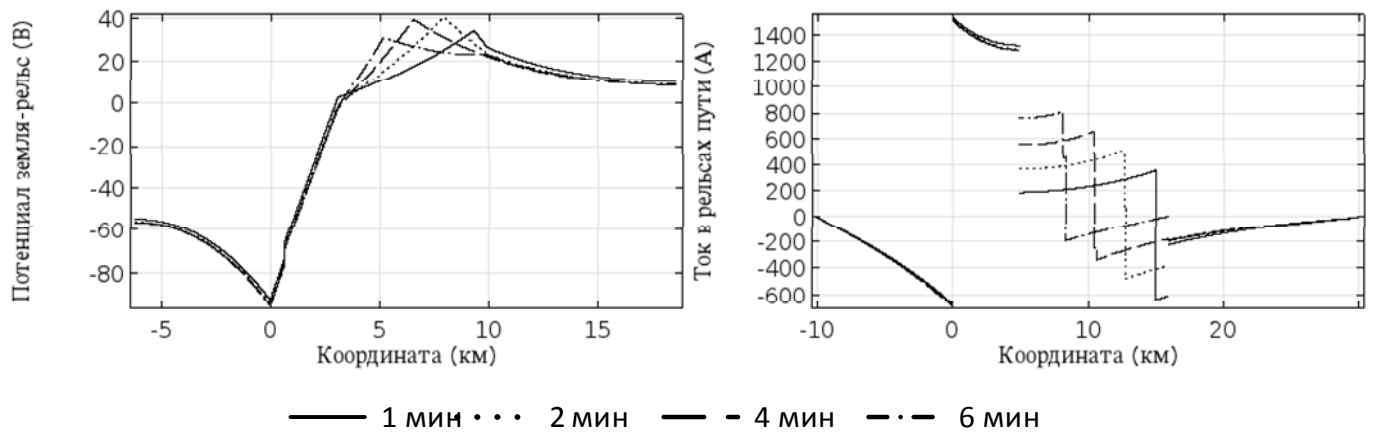


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления  $0,01 \text{ Ом}$ , при переходном  $1 \text{ Ом/км}$  для различных моментов времени

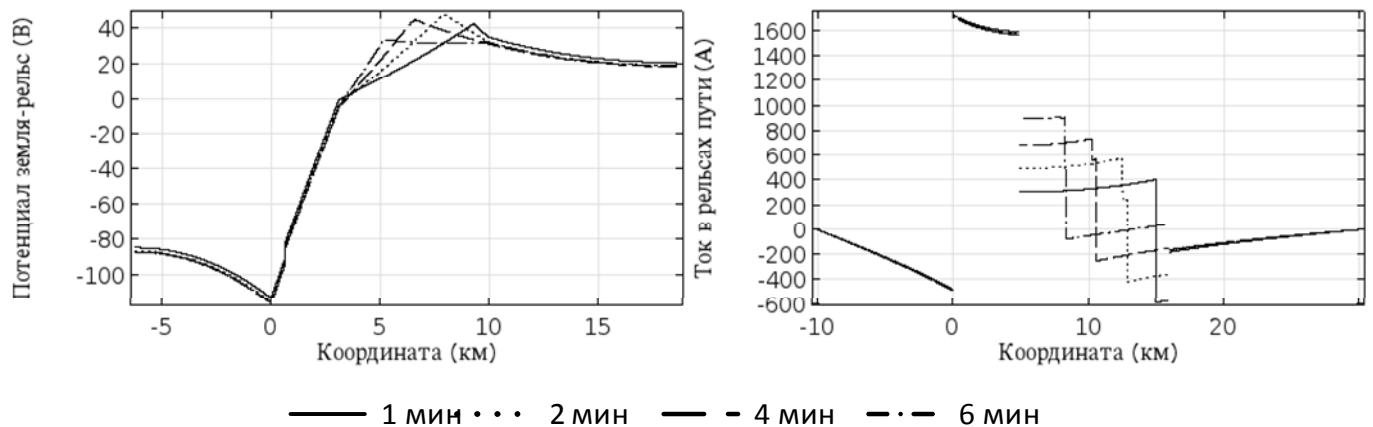


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления  $0,01 \text{ Ом}$ , при переходном  $2 \text{ Ом/км}$  для различных моментов времени

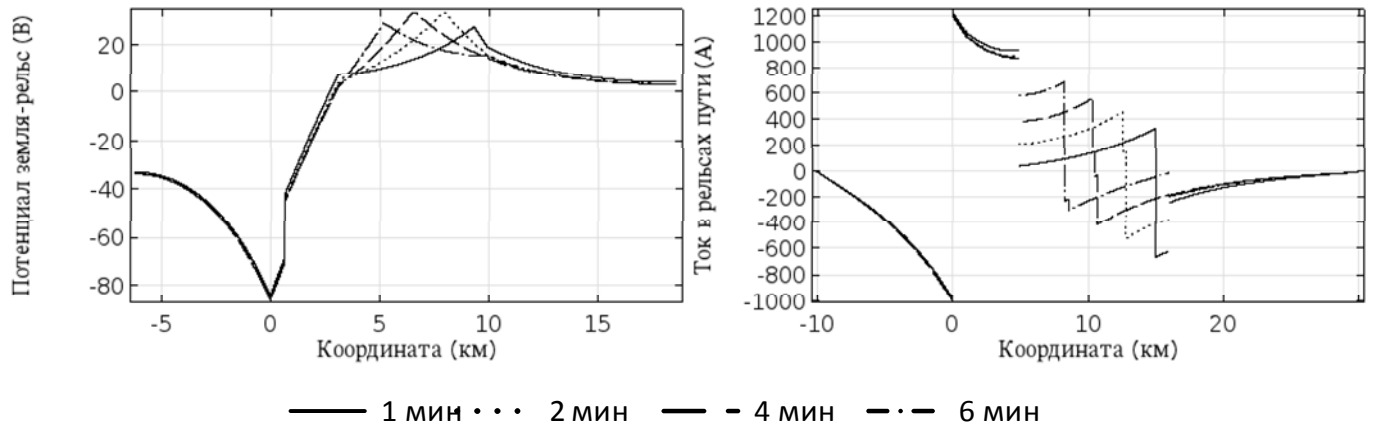


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления 0,05 Ом, при переходном 0,5 Ом/км для различных моментов времени

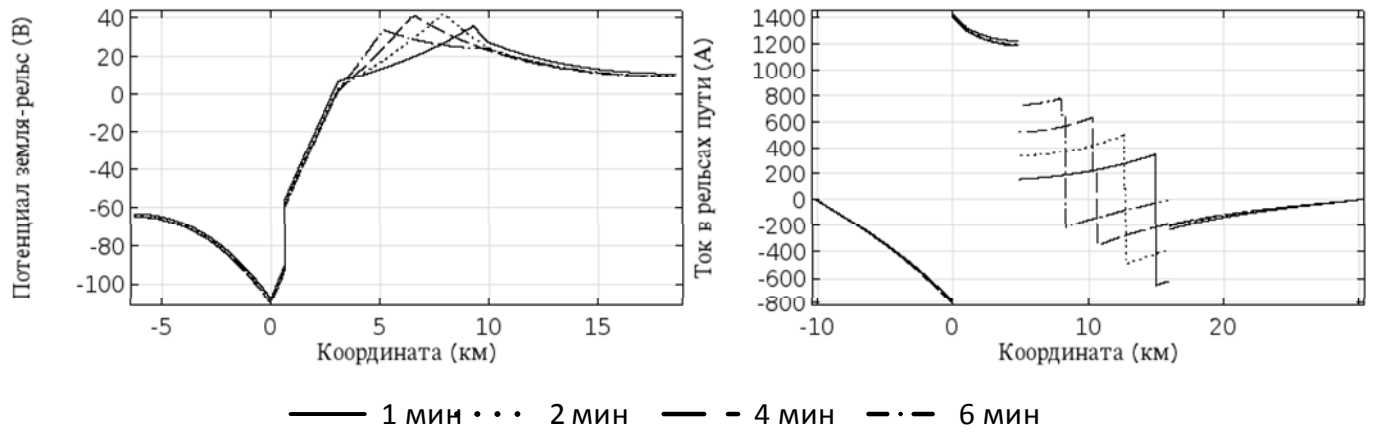


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления 0,05 Ом, при переходном 1 Ом/км для различных моментов времени

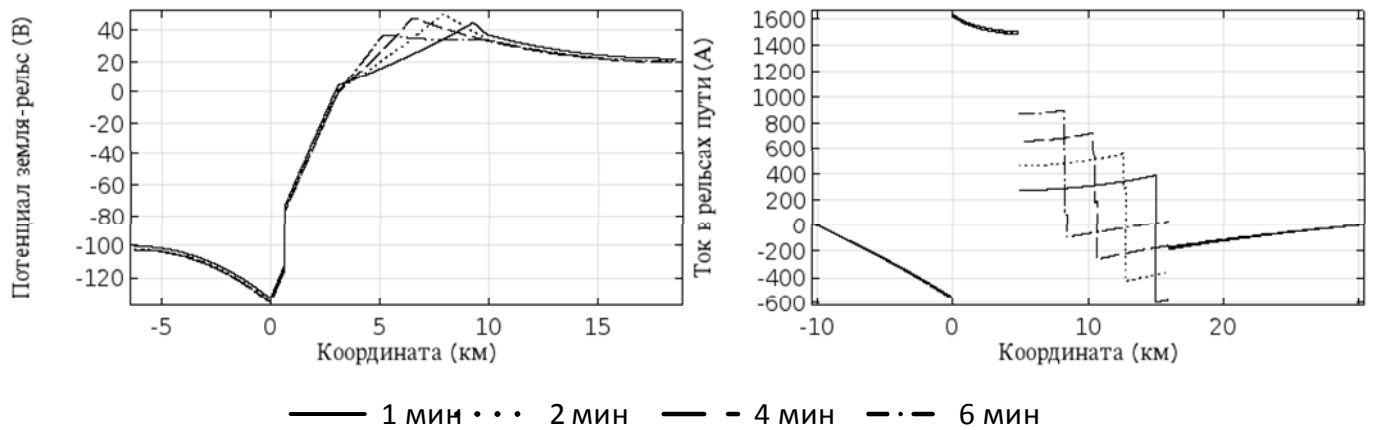


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления 0,05 Ом, при переходном 2 Ом/км для различных моментов времени

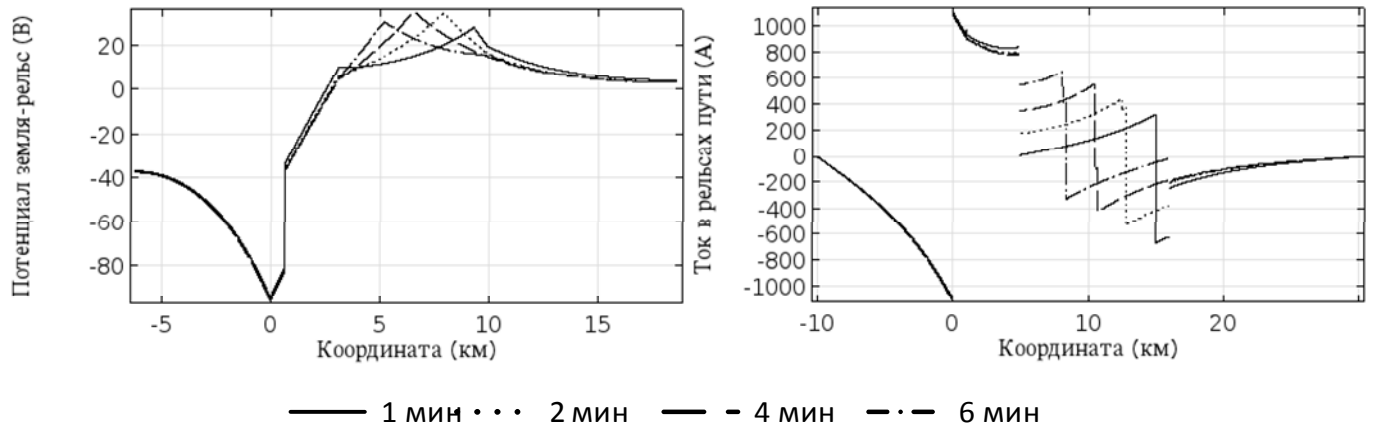


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления 0,1 Ом, при переходном 0,5 Ом/км для различных моментов времени

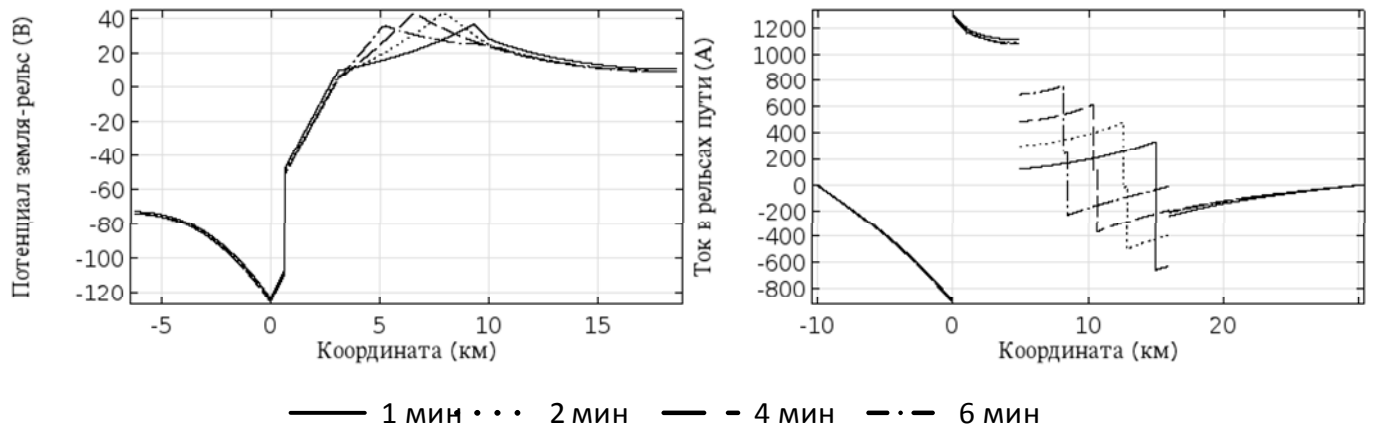


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления 0,1 Ом, при переходном 1 Ом/км для различных моментов времени

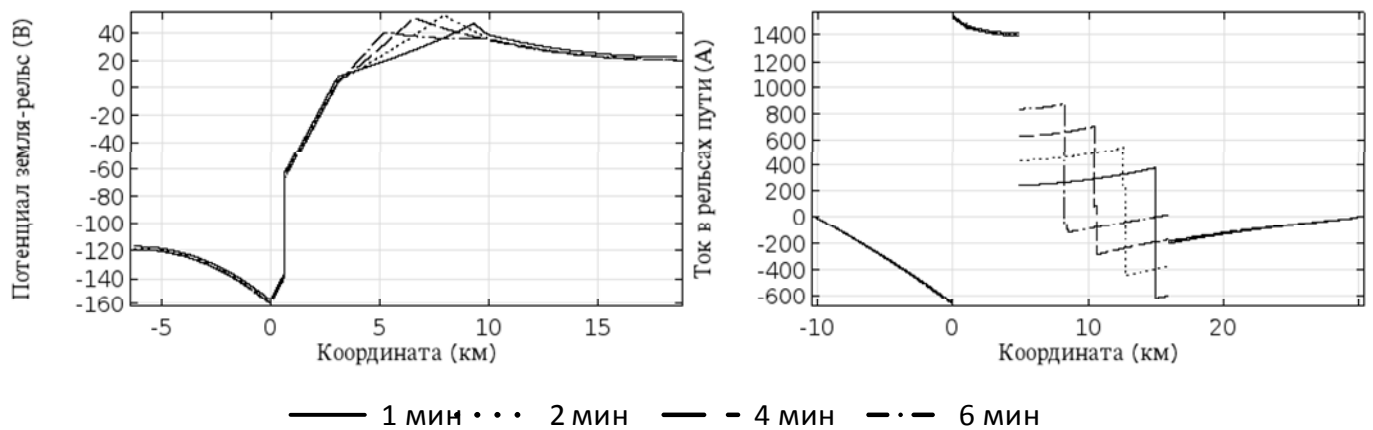


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления 0,1 Ом, при переходном 2 Ом/км для различных моментов времени

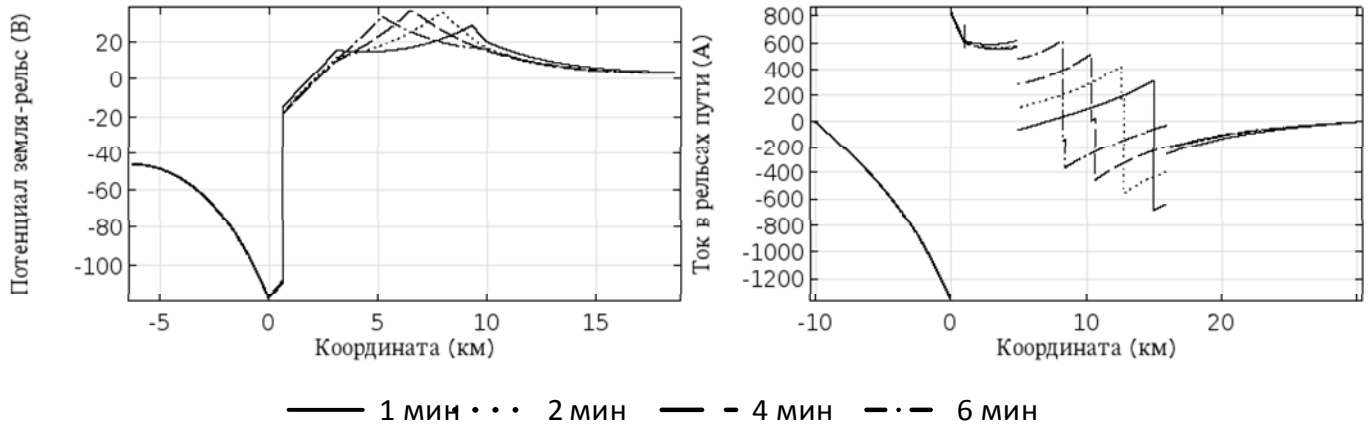


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления 0,3 Ом, при переходном 0,5 Ом/км для различных моментов времени

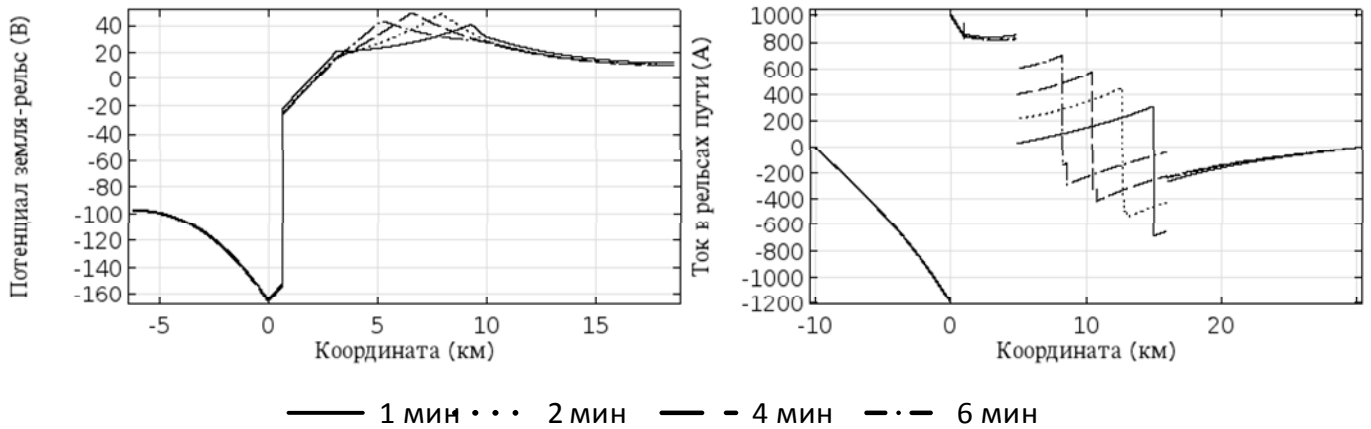


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления 0,3 Ом, при переходном 1 Ом/км для различных моментов времени

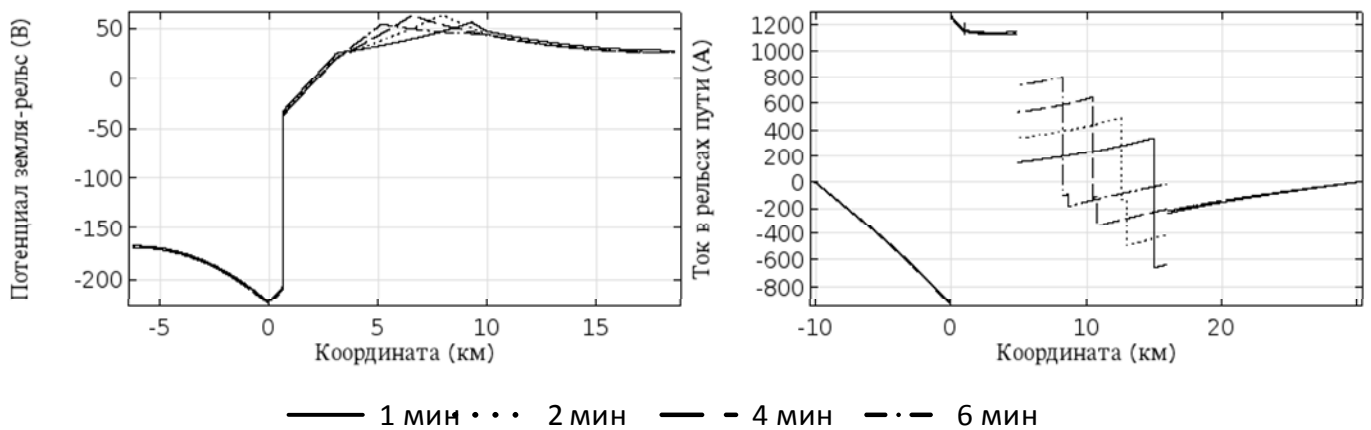


Рисунок Б.2 – Распределение потенциала рельс-земля и тока в месте внесенного в рельсовую линию сосредоточенного сопротивления 0,3 Ом, при переходном 2 Ом/км для различных моментов времени

**ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕВА МАСЛА ДРОССЕЛЬ-  
ТРАНСФОРМАТОРА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ**

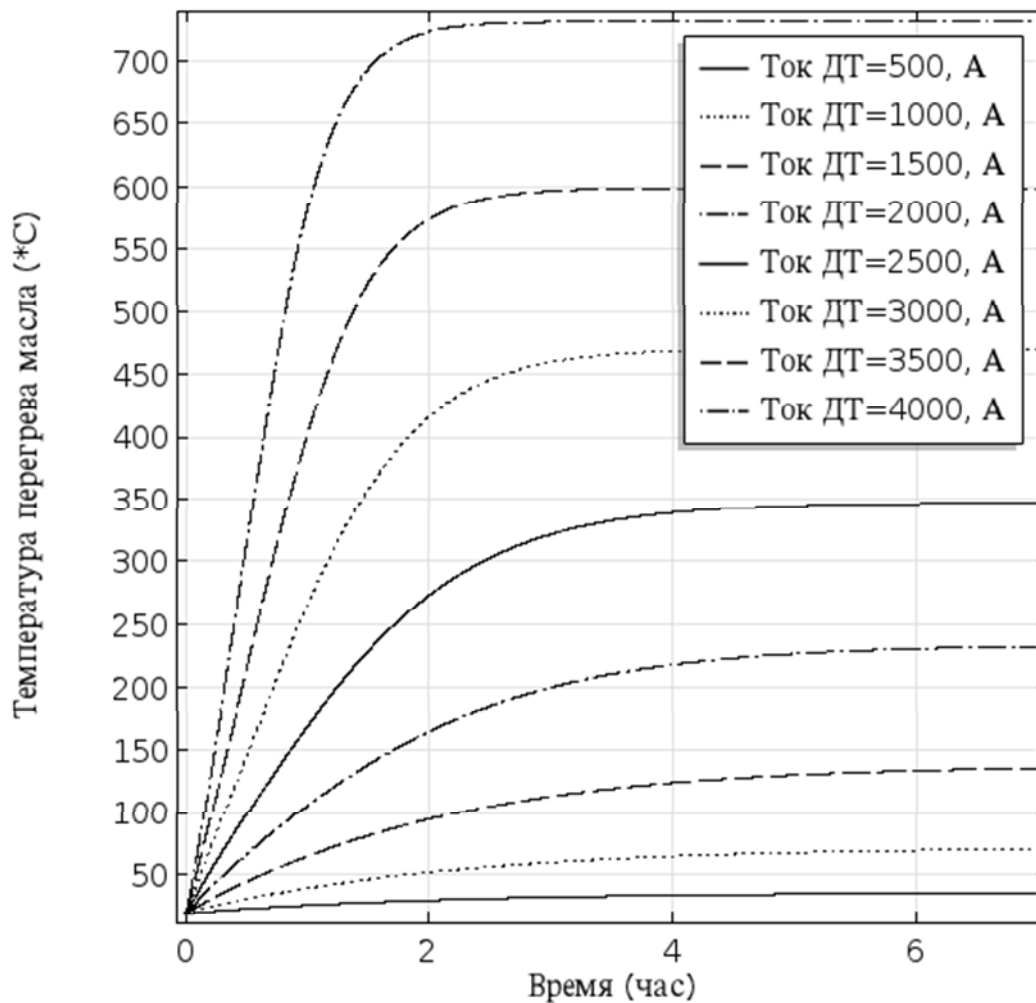


Рисунок В.1 – Зависимость установившейся температуры масла дроссель-трансформатора от величины протекающего по основной обмотке обратного тягового тока

Таблица В.1 – Эквивалентные коэффициенты теплоотдачи с корпуса дроссель-трансформатора

Ток основной обмотки, А	Тепловыделение в основной обмотке, Вт	Установившаяся температура масла, *С	Эквивалентный коэфф. теплоотдачи, Вт/м <sup>2</sup> К
500	250	36,0	5,34
1000	1000	70,7	10,88
1500	2250	135,9	12,74
2000	4000	232,6	13,23
2500	6250	347,9	13,82
3000	9000	471,1	14,7
3500	12250	599,4	15,72
4000	16000	732,6	16,8

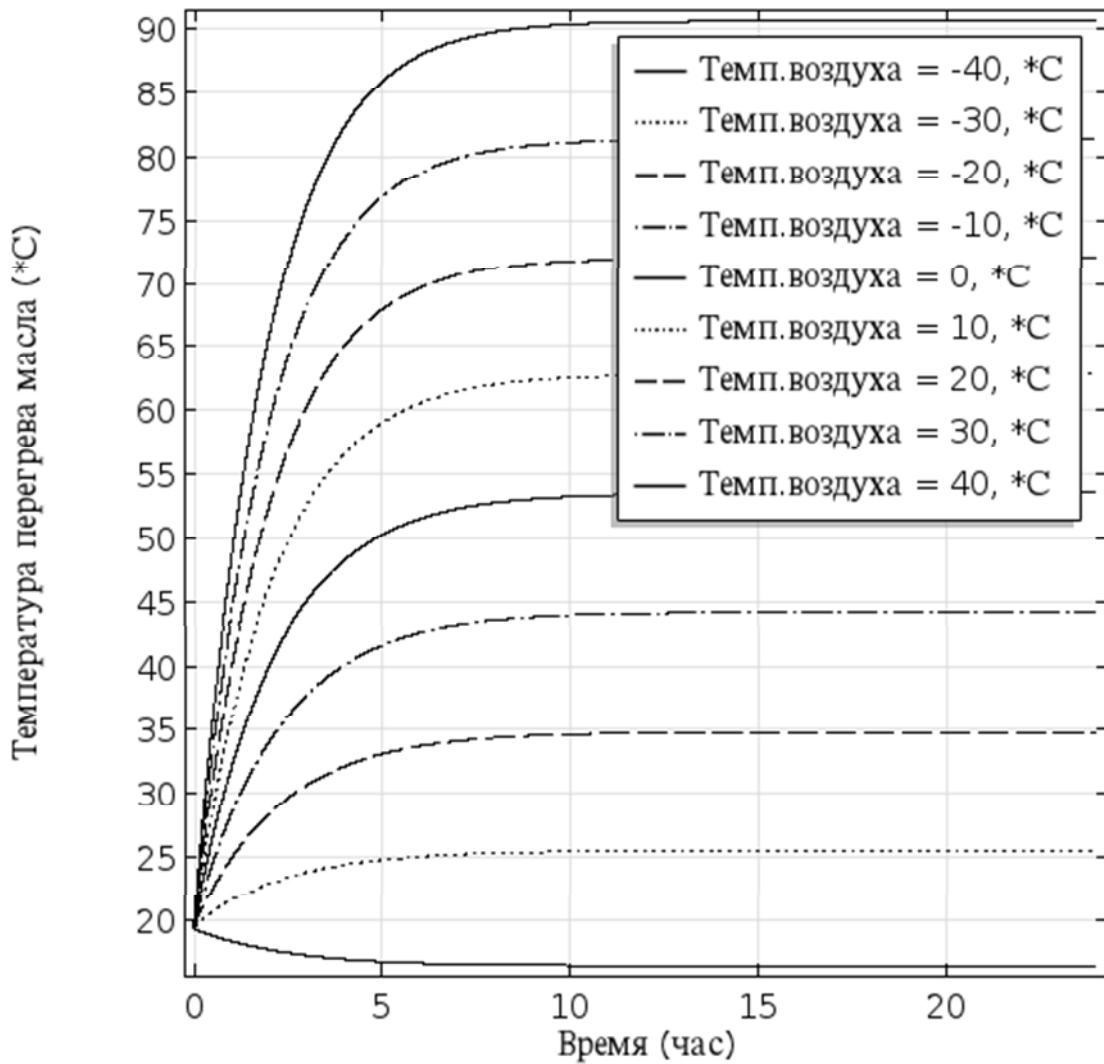


Рисунок В.2 – Зависимость установившейся температуры масла при протекании тока в 1000А по основной обмотке дроссель-трансформатора при различных температурах окружающего воздуха

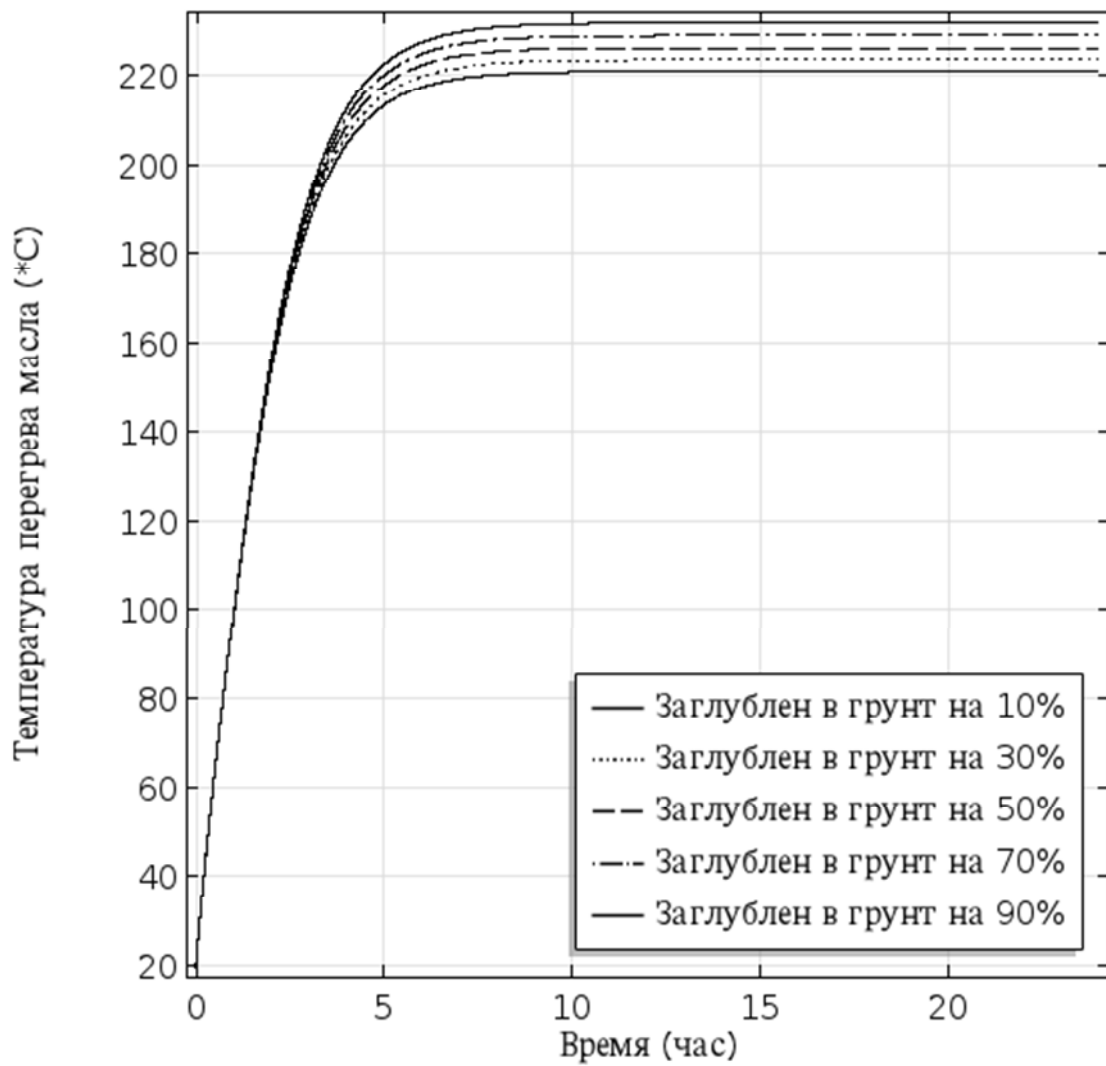


Рисунок В.3 – Зависимость установившейся температуры масла при протекании тока в 2000А по основной обмотке дроссель-трансформатора при различной степени заглибления в грунт



**ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
**СВЕРДЛОВСКАЯ  
ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА**

Челюскинцев ул., 11, г. Екатеринбург, 620013,  
тел.: (343) 358-44-66, факс: (343) 358-48-48, e-mail: [info@svrw.ru](mailto:info@svrw.ru), [www.svrw.rzd.ru](http://www.svrw.rzd.ru)

«8» апрель 2019 г.

№ 1000-9357/СВЕД

**Экспертное заключение**

О внедрении результатов научно-исследовательской работы

1. Разработчики: Рожкин Борис Викторович, Бушуев Сергей Валентинович
2. Предмет внедрения: «Методика определения высоконагруженных дроссель-трансформаторов участка.»
3. Место внедрения: Свердловская железная дорога - филиал ОАО «РЖД».
4. Технико-экономический эффект: предложенная методика учитывает фактическое распределение обратных тяговых токов в неоднородной рельсовой линии многопутных перегонов. На основании значений обратного тягового тока определяет температурные режимы работы дроссель – трансформаторов участка. Выявляет дроссель – трансформаторы подвергающиеся перегреву при анализируемом графике движения поездов. Данный анализ позволяет выявлять «узкие места» в обратной тяговой сети и проводить точечное усиление элементов.
5. Дата испытания: 24.04.2019 г.
6. Предложение о дальнейшем использовании: предлагается применять указанную методику при подготовке систем автоблокировки к движению тяжеловесных поездов и при пересмотре графика движения поездов.

Заместитель главного инженера  
железной дороги

С.Н.Веселов

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«Петербургский государственный  
университет путей сообщения  
Императора Александра I»  
(ФГБОУ ВО ПГУПС)**  
Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031  
Телефон: (812) 457-86-28, факс: (812) 315-26-21  
E-mail: dou@pgups.edu, dou@pgups.ru  
http://www.pgups.ru  
ОКПО 01115840, ОГРН 1027810241502,  
ИНН 7812009592/ КПП 783801001

04.09.2019 № 005.06.4/1-14/340  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_  
Г \_\_\_\_\_ Т

### СПРАВКА

**О внедрении результатов диссертационной работы  
Рожкина Бориса Викторовича на тему «Методы обеспечения тепловых  
режимов дроссель-трансформаторов рельсовых цепей с изолирующими  
стыками действующей инфраструктуры при вводе тяжеловесного движения»**

С 2010 года Центром компьютерных железнодорожных технологий ПГУПС и научно-исследовательской лабораторией «Компьютерные системы автоматки» УрГУПС ведется разработка и внедрение системы технической диагностики на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров (СТД-МПК).

В совместном проекте двух ВУЗов использованы результаты научных исследований Рожкина Бориса Викторовича. Программное обеспечение управляющего вычислительного комплекса СТД-МПК дополнено функцией мониторинга состояния рельсовой линии на основании предложенных в работе алгоритмов.

Данная инновация обеспечила конкурентоспособность СТД-МПК на рынке систем технической диагностики устройств железнодорожной автоматки и телемеханики.

Первый проректор – проректор  
по научной работе ФГБОУ ВО ПГУПС



Т.С. Титова