

*На правах рукописи*

*А. Батрашов*

**БАТРАШОВ АНДРЕЙ БОРИСОВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ И  
ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург  
УрГУПС  
2019

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

**Научный руководитель:** кандидат технических наук  
Паранин Александр Викторович.

**Официальные оппоненты:**

Сидоров Олег Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Российской Федерации, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ОмГУПС), кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», заведующий кафедрой;

Гаранин Максим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО СамГУПС), проректор по научной работе и инновациям.

**Ведущая организация:** акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»).

Защита диссертации состоится «13» декабря 2019 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: [www.usurt.ru](http://www.usurt.ru).

Автореферат разослан «18» октября 2019 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять в адрес диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Тимухина Елена Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Порядка 43 % электрифицированных железных дорог России работает на системе постоянного тока 3 кВ. Из всех систем электроснабжения магистральных железных дорог для названной системы характерны самые высокие токовые и тепловые нагрузки при прочих равных условиях перевозок. Транспортная стратегия Российской Федерации, Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации, а также Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года предусматривают развитие скоростного, высокоскоростного и тяжеловесного железнодорожного движения, в том числе на участках, электрифицированных на постоянном токе, путем поэтапного усиления существующей инфраструктуры и строительства новых линий.

Контактная сеть, исходя из ее конструкционных особенностей, не имеет резерва. Проектирование существующей контактной сети производилось с упрощением ее геометрии и без учета ряда конструкционных особенностей. Повышение токовых нагрузок на контактную сеть постоянного тока приводит к увеличению интенсивности отказов тех ее узлов, которые ранее при проведении электротепловых расчетов были подвергнуты упрощению.

В системе тягового электроснабжения контактная сеть постоянного тока является одним из ограничивающих факторов в вопросах повышения скорости движения поездов, их массы и мощности, передаваемой электроподвижному составу. Величина тягового тока непосредственно определяет температурный режим работы элементов контактной сети. Допустимые температуры для проводов ограничены процессами термического разупрочнения их материалов. Существующая контактная сеть с ростом объемов перевозок требует проведения оценки на возможность такого использования, выявления «узких мест» с точки зрения токовой и тепловой нагрузки и разработки технических решений по их устранению.

В настоящее время широко распространена тепловизионная диагностика контактной сети. Определение теоретических критериев для поиска дефектов в контактной сети по данным инфракрасной термографии позволит существенно повысить качество тепловизионной диагностики.

Совершенствование электротепловых характеристик контактной сети постоянного тока позволит выровнять токовую и тепловую нагрузку в элементах контактной сети, что является актуальным с учетом потребности в увеличении объемов перевозок. Совершенствование методики электротепловых расчетов позволит повысить качество и эффективность разрабатываемых конструктивных решений и тепловизионной диагностики.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиями электротепловых процессов в контактной сети в России занимаются такие организации, как АО «ВНИИЖТ», ООО «МСД Холдинг», АО «УКС», ДвГУПС, ОмГУПС, ПГУПС, РГУПС, СамГУПС и УрГУПС.

В своих исследованиях автор опирался на труды ученых:

– в области проектирования и совершенствования системы электроснабжения постоянного тока: Аржанников Б.А., Бадер М.П., Беляев И.А., Бурков А.Т., Гаранин М.А., Зимакова А.Н., Мамошин Р.Р., Марквардт К.Г., Михеев В.П., Фрайфельд А.В., Черемисин В.Т., Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A. и др.;

– в области распределения тока в элементах контактной сети: Воронин А.В., Косарев А.Б., Косарев Б.И., Костюченко К.Л., Кудряшов Е.В., Марский В.Е., Паранин А.В. и др.;

– в области нагрева элементов контактной сети: Бочев А.С., Григорьев В.Л., Игнатенко И.В., Кобозев А.В., Ли В.Н., Эпштейн Л.Л., Lingen J., Löbl H., Merz H., Szepek V., Zürrer Th. и др.;

– в области влияния нагрева на свойства материалов контактной сети: Берент В.Я., Гершман И.С., Гуков А.И., Купцов Ю.Е., Миронос Н.В., Порцелан А.А., Флинк Д.В., Roggen F., Schmidt P. и др.;

– в области разработки тепловой защиты контактной сети: Набойченко И.О., Неугодников В.П., Тепляков В.Б., Фигурнов Е.П. и др.;

– в области диагностики контактной сети и ее взаимодействия с токоприемником: Галкин А.Г., Грачев В.Ф., Ефимов А.В., Жарков Ю.И., Павлов В.М., Сидоров О.А., Смердин А.Н., Jiqin Wu, Petrausch D., Xi-Yang Liu и др.

**Целью диссертационной работы** является совершенствование электро-тепловых расчетов и характеристик контактной сети постоянного тока, направленных на обеспечение требуемых температурных режимов работы при повышении объемов перевозок для существующей и вновь проектируемой контактной сети постоянного тока, а также для повышения качества оценки результатов ее тепловизионной диагностики.

#### **Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ существующих методик, предназначенных для электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока, определить критерии для их применения и аргументировать необходимость в совершенствовании.

2. Разработать методику электротеплового расчета контактной сети постоянного тока с учетом токоведущей и поддерживающей арматуры, неоднородных параметров элементов, нелинейных свойств материалов, пространственного соединения проводов и положения расчетного участка на межподстанционной зоне.

3. Произвести валидацию разработанной методики электротеплового расчета на базе масштабной модели и на участке реальной контактной сети в лабораторных условиях с учетом арматуры и местного износа контактного провода.

4. Выполнить совершенствование конструкции контактной сети постоянного тока путем выявления и устранения мест повышенной токовой и тепловой нагрузки, а также обоснования допустимости применения одинарного контактного провода взамен двойного.

5. С помощью разработанной методики электротеплового расчета произвести оценку эффективности выявления дефектных элементов контактной сети при тепловизионной диагностике.

**Объект исследования:** контактная сеть.

**Области исследования:** техническая диагностика систем электроснабжения, критерии оценки состояния систем электроснабжения железных дорог, совершенствование тяговых сетей и улучшение эксплуатационных показателей устройств электроснабжения.

**Предмет исследования:** электротепловые характеристики контактной сети постоянного тока и методики их расчета.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложена классификация существующих методик электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока по типам решаемых задач с учетом требуемой вычислительной мощности и расчетных возможностей.

2. Разработана методика электротеплового расчета контактной сети постоянного тока, позволяющая, в отличие от существующих, учесть токоведущую и поддерживающую арматуру, неоднородные параметры элементов, нагрев контактного провода токосъемными пластинами и расположение расчетного участка на межподстанционной зоне для режимов транзита тягового тока и токосъема несколькими токоприемниками.

3. Обоснованы причины возникновения мест с повышенными токовыми и тепловыми нагрузками в существующей контактной сети постоянного тока, а также предложены новые технические решения по их устранению, отличающиеся улучшенным выравниванием токовой и тепловой нагрузки.

4. Определены условия, при которых возможно выявление дефектных зажимов элементов контактной сети при тепловизионной диагностике.

**Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы** заключается в следующем:

1. Обоснованы области применения методик, предназначенных для электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока, в зависимости от поставленных задач.

2. Предложена методика электротеплового расчета, адаптированная для модернизации существующих и проектирования новых конструкций и узлов контактной сети постоянного тока по критерию выравнивания токовой и тепловой нагрузки.

3. Внедрена программа для ЭВМ под названием ELTECAT АВ УрГУПС, в которой реализована предложенная методика расчета.

4. Разработаны этапы модернизации существующей контактной сети постоянного тока в части устранения мест с повышенными токовыми и тепловыми нагрузками.

5. Обоснована допустимость применения контактных подвесок постоянного тока с одинарным контактным проводом взамен контактных подвесок с двойным контактным проводом.

6. Предложены рекомендации по проведению тепловизионной диагностики.

**Методология и методы исследования:** метод конечных элементов с использованием уравнений нестационарного теплообмена и непрерывности электрического тока, реализованный в программной среде COMSOL Multiphysics;

положения теории вероятности, математической статистики и планирования эксперимента.

Валидация разработанной конечно-элементной модели электротеплового расчета произведена на базе масштабной модели и участках реальной контактной сети в лабораторных условиях с учетом арматуры и местного износа контактного провода. По результатам валидации средние отклонения измеренных величин от расчетных значений оказались сопоставимы с инструментальной погрешностью приборов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты анализа методик электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока и критерии выбора данных моделей в зависимости от поставленных задач.

2. Усовершенствованная методика электротеплового расчета контактной сети постоянного тока, а также результаты валидации разработанной методики, полученные путем сравнения расчетных и экспериментальных исследований.

3. Этапы модернизации контактной сети постоянного тока и конструкционные решения, предназначенные для устранения мест с повышенными токовыми и тепловыми нагрузками.

4. Обоснование допустимости применения одинарного контактного провода взамен двойного для контактных подвесок постоянного тока по результатам теплового расчета.

5. Оценка эффективности выявления дефектных элементов контактной сети постоянного тока при тепловизионной диагностике.

**Степень достоверности результатов** подтверждается сходимостью результатов расчетов с данными экспериментальных исследований с точностью, сопоставимой с инструментальной погрешностью приборов, а также актами внедрений результатов научно-исследовательской работы автора на предприятиях.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: научная конференция «Техника и технологии наземного транспорта» (УрГУПС, Екатеринбург, 2015, 2017, 2018); региональная научно-практическая конференция «Энергосбережение и энергоэффективность системы тягового электроснабжения» (УрГУПС, Екатеринбург, 2016–2018); II международная научно-практическая конференция «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта» (ДонИЖТ, Донецк, 2016); международная научно-техническая конференция «Инновационный транспорт – 2016» (УрГУПС, Екатеринбург, 2016); всероссийская научно-техническая конференция «Наука и образование транспорту» (УрГУПС, Екатеринбург, 2018); всероссийская научно-практическая конференция «Инновации и новые технологические разработки для системы тягового электроснабжения» (УрГУПС, Екатеринбург, 2018); региональная научно-техническая конференция «Транспорт Урала – 2018» (УрГУПС, Екатеринбург, 2018); третья международная научно-практическая конференция «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (ОмГУПС, Омск,

2018); всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 60-летию кафедры «Электроснабжение транспорта» «Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта» (УрГУПС, Екатеринбург, 2019); заседание кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС (Омск, 2019).

Результаты диссертационной работы в полном объеме заслушаны и одобрены на заседании кафедры «Электроснабжение транспорта» УрГУПС (Екатеринбург, 2019).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 5 статей опубликованы в изданиях, включенных ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, общим объемом 4,83 печатных листа, из которых автору принадлежит 3,52 печатных листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа представлена на 216 страницах, содержит 207 страниц основного текста, 84 рисунка, 18 таблиц и 147 наименований списка литературы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, описана степень ее разработанности, поставлены цель и задачи, сформулированы положения научной новизны, теоретической и практической значимости результатов научно-исследовательской работы, описана методология и методы, используемые в диссертации, определены положения, выносимые на защиту, приведена информация о степени достоверности и апробации результатов исследования.

**В первой главе** выполнен анализ отказов элементов контактной сети и определена доля отказов, вызванных тепловым воздействием электрического тока. Так, наибольшее число отказов приходится на провода, арматуру и неизолированные звеньевые струны. Установлено, что до 20 % всех отказов контактной сети постоянного тока (без учета повреждений контактного провода при ненормативных режимах тяги) происходит по причине теплового воздействия электрического тока. На участках обращения тяжеловесных поездов доля отказов звеньевых струн от электромеханического износа составляет до 70 % от общего числа повреждений струн. В связи с этим дистанции электроснабжения производят мероприятия по усилению контактной сети при организации тяжеловесного движения путем установки дополнительных и обновления существующих поперечных электросоединителей. Так, в период с 2011 по 2017 годы на Свердловской железной дороге было заменено и установлено 18,5 тыс. электросоединителей. На Рисунке 1 представлена зависимость отказов элементов контактной сети по годам, из которой видно, что количество отказов струн не имеет тенденции к снижению. По результатам анализа сделан вывод о том, что данное усиление контактной сети постоянного тока не приводит к снижению отказов звеньевых струн по причине электромеханического износа.

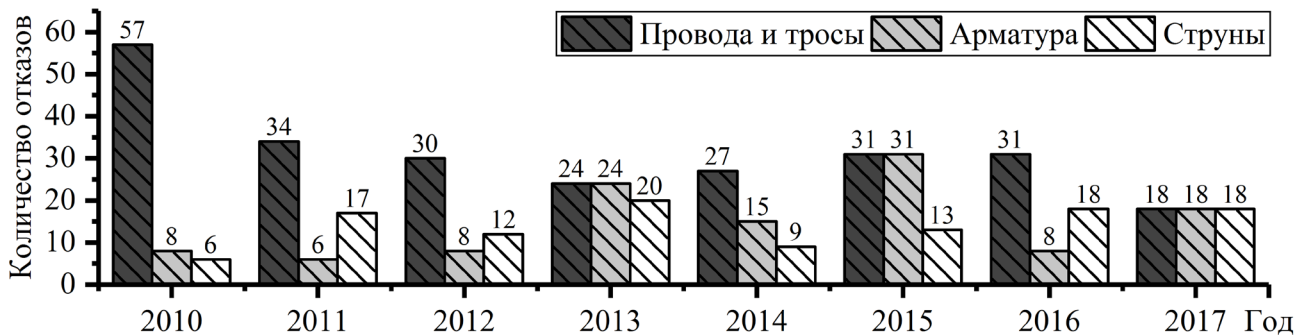


Рисунок 1 – Количество отказов элементов контактной сети по годам

В главе рассмотрены требования нормативно-технической документации, регламентирующие температурные режимы работы контактной сети, и теоретические обоснования, лежащие в основе ограничения температуры материалов элементов.

Выполнен анализ существующих методик электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока, основанных на математических моделях: естественного токораспределения; А.В. Воронина; К.Л. Костюченко; модели с бесконечным числом струн<sup>1</sup>; UKS-Current<sup>2</sup>; КОНТ-3<sup>3</sup>; модели, основанной на методе конечных элементов. Предложена классификация существующих моделей электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока по типам решаемых задач с учетом требуемой вычислительной мощности и расчетных возможностей.

Определены требования к расчетным возможностям разрабатываемой модели, которые необходимы для проведения анализа электротепловых процессов, происходящих в контактной сети постоянного тока при повышении токовой нагрузки вследствие роста объемов железнодорожных перевозок. Для совершенствования методики электротеплового расчета была принята математическая модель, основанная на методе конечных элементов.

**Во второй главе** разработана конечно-элементная математическая модель электротеплового расчета, основанная на законе непрерывности электрического тока и уравнении теплового баланса. Разработана трехмерная параметрическая модель геометрии контактной сети, элементы которой являются одномерными объектами, включая арматуру. За пределами расчетного анкерного участка межподстанционная зона двухпутного участка представляется в виде линий с эквивалентными параметрами проводов контактной сети, с учетом поста секционирования и пунктов параллельного соединения.

Расчетная система уравнений (1) содержит в себе уравнения, относящиеся к проводам, арматуре контактной сети, токосъемным пластинам, а также условиям, описывающим тепловой и электрический контакт в соединениях проводов и в контакте с токоприемником.

<sup>1</sup> Модель разработана автором в ходе диссертационного исследования.

<sup>2</sup> Разработана в АО «Универсал – контактные сети» под руководством Е.В. Кудряшова.

<sup>3</sup> Разработана в АО «ВНИИЖТ» под руководством В.Е. Марского.



$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{1}{r_{\text{ПГ}}^{\text{ПР}}(T_{\text{ЗЖМ}})} \cdot \nabla^2 V_{\text{ПР}} = f_I^{\text{ЗЖМ}} - f_I^{\text{ПОЛ}}; \\
c_{\text{ПГ}}^{\text{ПР}}(T_{\text{ЗЖМ}}) \cdot \frac{\partial T_{\text{ПР}}}{\partial t} - k_{\text{ПГ}}^{\text{ПР}}(T_{\text{ПР}}) \cdot \nabla^2 T_{\text{ПР}} = q_{\text{РЕЗ}}^{\text{ПР}} + q_{\text{СЛ}}^{\text{ПР}} - q_{\text{КН}}^{\text{ПР}} - q_{\text{ЛЧ}}^{\text{ПР}} + f_Q^{\text{ПОЛ}} - f_Q^{\text{ЗЖМ}}; \\
\frac{1}{r_{\text{ПГ}}^{\text{ЗЖМ}}(T_{\text{ЗЖМ}})} \cdot \nabla^2 V_{\text{ЗЖМ}} = -f_I^{\text{ЗЖМ}}; \\
c_{\text{ПГ}}^{\text{ЗЖМ}}(T_{\text{ЗЖМ}}) \cdot \frac{\partial T_{\text{ЗЖМ}}}{\partial t} - k_{\text{ПГ}}^{\text{ЗЖМ}}(T_{\text{ЗЖМ}}) \cdot \nabla^2 T_{\text{ЗЖМ}} = q_{\text{РЕЗ}}^{\text{ЗЖМ}} + q_{\text{СЛ}}^{\text{ЗЖМ}} - q_{\text{КН}}^{\text{ЗЖМ}} - q_{\text{ЛЧ}}^{\text{ЗЖМ}} + f_Q^{\text{ЗЖМ}}; \\
\frac{V_{\text{ПР}} - V_{\text{ЗЖМ}}}{R_{\text{П}} \cdot l_{\text{ЗЖМ}}} = f_I^{\text{ЗЖМ}}; \\
\frac{h_c \cdot S}{l_{\text{ЗЖМ}}} \cdot (T_{\text{ПР}} - T_{\text{ЗЖМ}}) = f_Q^{\text{ЗЖМ}}; \\
c_{\text{ПОЛ}}(T_{\text{ПОЛ}}) \cdot \frac{\partial T_{\text{ПОЛ}}}{\partial t} = (Q_{\text{РЕЗ}} + Q_{\text{ТР}}) \cdot p_{\text{ПОЛ}} + Q_{\text{РЕЗ}}^{\text{ПОЛ}} + Q_{\text{СЛ}}^{\text{ПОЛ}} - Q_{\text{КП}}^{\text{ПОЛ}} - Q_{\text{КН}}^{\text{ПОЛ}} - Q_{\text{ЛЧ}}^{\text{ПОЛ}}; \\
\frac{h_c^{\text{ПОЛ}} \cdot S_{\text{ПОЛ}}}{h_{\text{ПОЛ}}} \cdot (T_{\text{ПОЛ}} - T_{\text{ПР}}) = f_Q^{\text{ПОЛ}},
\end{array} \right. \quad (1)$$

Где ПР, ЗЖМ, ПОЛ – индексы, соответствующие таким расчетным элементам, как провода, зажимы и полозы токоприемника;

$V_i$  – искомое значение потенциала, В;

$T_i$  – искомое значение температуры, К;

$r_{\text{ПГ}}^i$  – погонное электросопротивление элемента расчета, Ом/м;

$c_{\text{ПГ}}^i$  – погонная теплоёмкость элемента расчета, Дж/(м·К);

$c_{\text{ПОЛ}}$  – теплоёмкость полоза токоприемника, Дж/(кг·К);

$k_{\text{ПГ}}^i$  – погонная теплопроводность элемента расчета, Вт·м/(К);

$q_{\text{СЛ}}^i$  – погонный поток солнечной радиации, Вт/м;

$q_{\text{КН}}^i$  – погонный поток тепла от теплоотдачи конвекцией, Вт/м;

$q_{\text{ЛЧ}}^i$  – погонный поток тепла от теплоотдачи лучеиспусканием, Вт/м;

$f_I^{\text{ЗЖМ}}$  – погонный источник тока в соединении провода и зажима, А/м;

$f_Q^{\text{ЗЖМ}}$  – погонный источник тепла в соединении провода и зажима, Вт/м;

$S$  – кажущаяся площадь контакта провода и зажима, м<sup>2</sup>;

$l_{\text{ЗЖМ}}$  – длина соединения провода и зажима, м;

$L_{\text{ПОЛ}}$  – длина токосъемных пластин, м;

$R_{\text{П}}$  – переходное сопротивление между проводом и зажимом, Ом;

$h_c$  – контактная теплопроводность между проводом и зажимом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$p_{\text{ПОЛ}}$  – доля тепла, приходящаяся на токосъемные пластины;

$Q_{\text{РЕЗ}}$  – резистивные поток тепла в контакте контактный провод-токосъемные пластины, Вт;

$Q_{\text{ТР}}$  – поток тепла от трения в контакте контактный провод-токосъемные пластины, Вт;

$h_C^{\text{ПОЛ}}$  – контактная теплопроводность между контактным проводом и токосъемными пластинами, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$h_{\text{ПОЛ}}$  – ширина токосъемных пластин, м;

$S_{\text{ПОЛ}}$  – кажущаяся площадь контакта между контактным проводом и токосъемными пластинами, м<sup>2</sup>;

$f_Q^{\text{ПОЛ}}$  – погонный источник тепла в контакте контактного провода и токосъемных пластин, Вт/м;

$f_I^{\text{ПОЛ}}$  – погонный источник тока в контакте контактного провода и токосъемных пластин, А/м.

Расчет электрического и теплового контактных сопротивлений осуществляется по широко распространенной модели Микича (В.В. Микич, 1974) с учетом того, что контактирующие тела являются абсолютно упругими.

Для решения уравнения на области, определенной геометрией, отрезки проводов контактной сети разбиваются на конечные элементы – элементы значительно меньшие по размерам, чем расчетная область, которые соединены между собой в узлах. Пример геометрии двух пролетов со средней анкерровкой компенсированной контактной подвески и их разбиение на конечные элементы изображен на Рисунке 2.

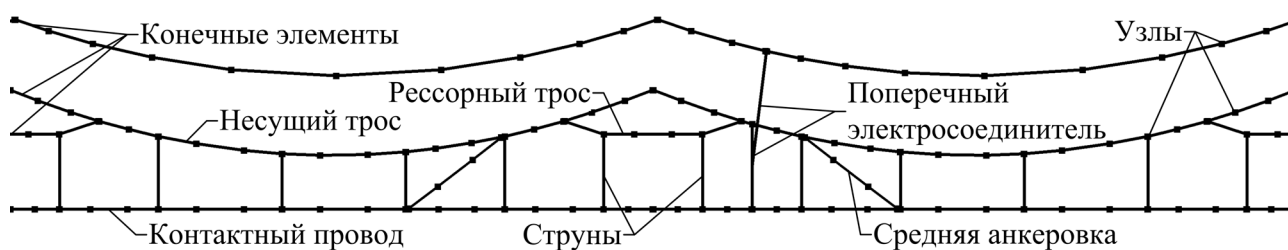


Рисунок 2 – Геометрия контактной сети постоянного тока с разбиением на линейные конечные элементы

Для наглядности представлено меньшее количество узлов и конечных элементов, чем это необходимо для выполнения расчета. Исследование сеточной сходимости показало, что для электротеплового расчета анкерного участка контактной сети постоянного тока с усиливающим проводом, рессорным тросом, арматурой контактной сети и равномерным сечением контактного провода необходимо порядка 200 тыс. конечных элементов. При учете неравномерного по длине износа контактного провода сечение контактного провода записывается в виде функции от координаты провода  $A_{\text{КП}}(x)$ . Участок неравномерного локального износа разбивается на участки с постоянным сечением, каждый из которых описывается минимум четырьмя конечными элементами. Также разбиение контактного провода при расчете в режиме токосъема необходимо про-

изводить конечными элементами минимум в четыре раза меньшими, чем расчетная ширина пластины токоприемника. Количество конечных элементов, которое приходится на каждый зажим контактной сети, составляет от 16 до 20.

**В третьей главе** произведено экспериментальное исследование распределения тока и температуры на базе масштабной модели контактной сети постоянного тока и участков реальной контактной сети с учетом арматуры и местного износа контактного провода. Выполнено сравнение результатов экспериментального исследования с данными, рассчитанными по разработанной математической модели. Все исследования проведены на материальной базе УрГУПС по разработанным автором программам и методикам.

Масштабная модель контактной сети состоит из медных проводов марки ПЭТВ-2, а суммарная длина двух моделируемых пролетов составляет пять метров. Сравнение результатов расчета проводилось со значениями температуры и тока проводов в зависимости от пространственной координаты.

В эксперименте подтверждены теоретические предположения В.Е. Марского по перегрузке несущего троса в районе узла средней анкеровки. Выявлено, что наибольшая нагрузка контактного провода на участке масштабной модели контактной сети расположена перед креплением троса средней анкеровки. На данном участке симитирован местный износ контактного провода и оценено влияние местного износа на перераспределение тока в продольных проводах контактной сети.

Отклонения значений тока и температуры в масштабной модели по экспериментальным данным от результатов расчета по разработанной математической модели были объединены в выборки для определения закона распределения. С помощью критерия Пирсона  $\chi^2$  с уровнем значимости 0,05 получены следующие значения: при числе степеней свободы  $k = 8$  для тока в продольных проводах  $\chi^2_{\text{набл}} = 10,07$  ( $\chi^2_{\text{крит}} = 15,51$ ); при числе степеней свободы  $k = 7$  для температуры  $\chi^2_{\text{набл}} = 9,12$  ( $\chi^2_{\text{крит}} = 14,07$ ). Были приняты гипотезы об экспоненциальном законе распределения отклонений температуры и тока в продольных проводах. С помощью обобщенного критерия Д'Агостино  $K^2$ , показатель которого для выборки равен 3,91 при  $p$ -значении 0,14, принят нормальный закон распределения отклонений тока в поперечных проводах. Различные законы распределения обусловлены отличием порядка значений измеряемых величин тока. Математические ожидания выборок отклонений тока составили 0,19 и 0,256 А для продольных и поперечных проводов или 3,8 и 5,3 % соответственно. Математическое ожидание выборки отклонений температуры составило 2,1 °С или 4,1 %.

Экспериментальное исследование распределения температуры в элементах контактной сети произведено на участке реальной контактной сети в лабораторных условиях. В процессе эксперимента участки контактного провода I и несущего троса II исследовались отдельно. Разделение участков исследования обусловлено различными значениями длительно допустимого тока проводов для нагрева их до максимально допустимой температуры. Принципиальная схема исследуемого участка контактной сети по исследованию распределения температуры в ее элементах изображена на Рисунке 3.

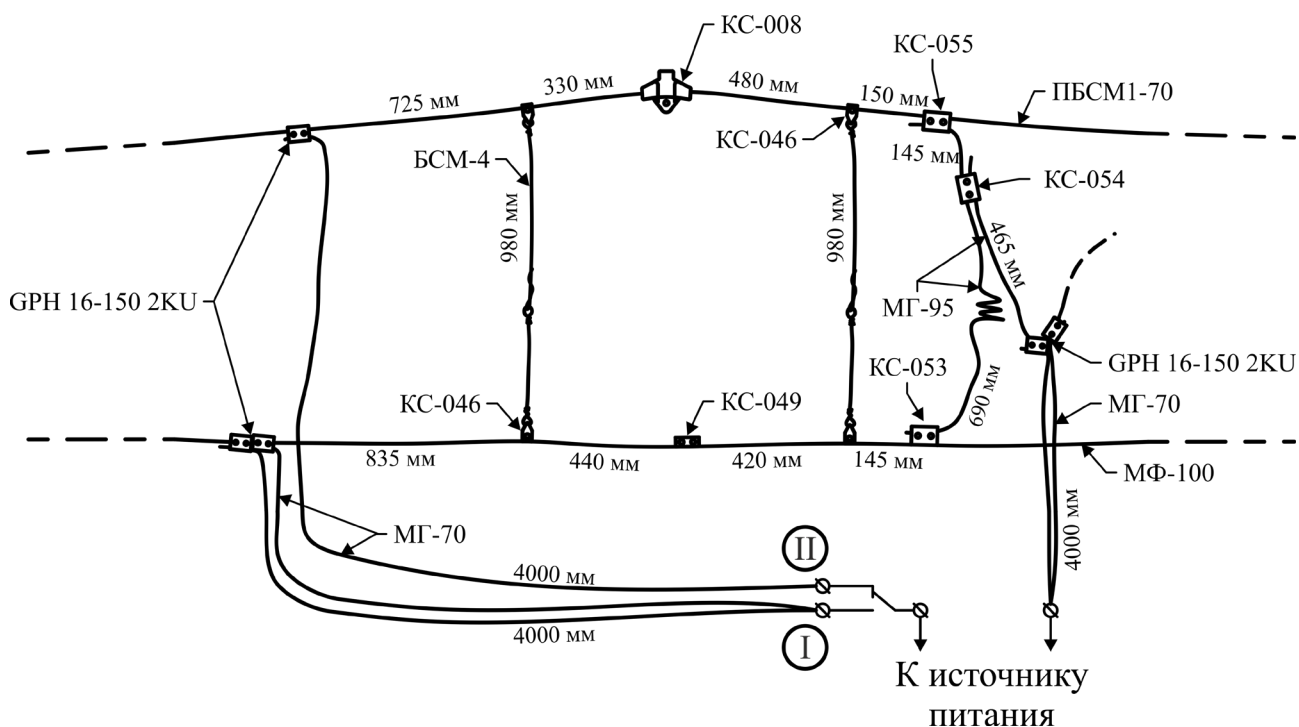


Рисунок 3 – Принципиальная схема исследуемого участка контактной сети

Сравнению подвергались значения температуры проводов и арматуры контактной сети в зависимости от их пространственной координаты. Исследования производились в установившемся режиме и режиме с зависимостью от времени при нагреве электрическим током и охлаждении при его отключении. На отдельном участке контактного провода длиной пять метров исследована температура контактного провода с местным износом при различных значениях величины износа и его длины. Также производилось исследование влияния арматуры контактной сети, расположенной вблизи участка местного износа, на его температуру.

Исследование распределения тока в элементах контактной сети производилось с учетом усиливающего провода и без него. Исследовано влияние переходного сопротивления соединительных зажимов на распределение тока. Среднее отклонение измеренных значений тока от расчетных составило 1,6 %, а максимальное – 4,95 %.

Отклонения между расчетными и экспериментальными значениями температуры были сгруппированы в выборки для определения закона распределения. С помощью критерия Пирсона  $\chi^2$  с уровнем значимости 0,05 получены следующие значения: при числе степеней свободы  $k = 4$  для участка подвески  $\chi^2_{\text{набл}} = 2,16$  ( $\chi^2_{\text{крит}} = 9,49$ ); при числе степеней свободы  $k = 7$  для участка износа  $\chi^2_{\text{набл}} = 9,72$  ( $\chi^2_{\text{крит}} = 14,07$ ). Принята гипотеза об экспоненциальном законе распределения отклонений температуры на исследуемых участках. Среднее значение отклонения температуры составило 0,675 °С, что ниже, чем отклонения в эксперименте с масштабной моделью. Снижение значения отклонения температуры связано, прежде всего, с увеличением диаметра исследуемых проводов, что позволило снизить погрешность тепловизионного измерения. Для измерения температуры элементов во всех экспериментах использовался тепловизор

Testo 881-1, а на измеряемые поверхности нанесено термопокрытие с коэффициентом черноты поверхности  $\varepsilon = 0,85$ .

Математические ожидания отклонений измеряемых значений, близкие к инструментальной погрешности приборов, свидетельствуют о преобладании инструментальной погрешности над другими типами погрешностей. На основании полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что математическая модель электротеплового расчета соответствует реальному физическому объекту в рамках области предполагаемого использования, а именно электротепловому расчету контактной сети постоянного тока.

Произведена верификация расчетной модели с экспериментальными исследованиями нагрева элементов контактной сети и токоприемника, произведенных в таких организациях, как ОмГУПС, ПГУПС и УрГУПС. Полученные соответствия экспериментальных и расчетных данных с учетом заданных допущений свидетельствует об адекватности предложенной математической модели электротеплового расчета контактной сети постоянного тока.

**В четвертой главе** произведен анализ существующих контактных подвесок на наличие «узких мест» с точки зрения токовой и тепловой нагрузки. На основании математического моделирования выявлено, что установка поперечных электрических соединителей в каждом пролете не позволяет снизить токовую и тепловую нагрузку на звеньевые струны, расположенные в середине пролета. Выявлена повышенная токовая и тепловая нагрузка струн на участке сопряжений анкерных участков, выполненных с обводом усиливающих проводов по контактным проводам анкеруемой ветви, и в ближайших к нему пролетах. Произведен сравнительный анализ тепловой нагрузки проводов контактной сети при различных вариантах конструктивного исполнения узла средней анкерровки и различных материалах ее троса. Установлено, что при использовании троса Бр2-95 в качестве троса средней анкерровки локальный перегрев несущего троса вблизи него на контактных подвесках с изолированными струнами достигает  $43,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что может привести к отжигу и обрыву несущего троса. Выявлено, что при конструктивном исполнении узла средней анкерровки с поперечным шунтированием основными и дополнительными спусками распределение токовой, а, соответственно, и тепловой нагрузки в узле становится наиболее приближенным к естественной картине токораспределения. На основании математического моделирования выявлена повышенная токовая нагрузка для несущего троса и контактных проводов и пониженная – для усиливающих проводов на участке от места присоединения питающих проводов и шлейфов разъединителей до первого поперечного электрического соединителя контактной сети.

Под электротепловыми характеристиками в работе понимается токонесящая способность контактной сети и распределение тока и температуры проводов вдоль оси пути. Разработаны конструктивные решения по совершенствованию электротепловых характеристик контактной сети постоянного тока. В Таблице 1 представлены этапы модернизации контактной сети, очередность которых установлена с учетом взаимного влияния конструктивных изменений друг на друга.

Таблица 1 – Этапы модернизации контактной сети

Этапы	Пояснения
Этап I. Выравнивание токовой и тепловой нагрузки вблизи ТСА КП.	Обеспечивает выравнивание температуры вдоль несущего троса и контактного провода. Обязательно применение на участках при использовании троса средней анкеровки из троса Бр2-95 или В2П-95, а также на участках с изолированными струнами.
Этап II. Изоляция звеньевых струн и усювиков фиксаторов.	Модернизация выполняется строго после выравнивания тепловой нагрузки продольных проводов вблизи ТСА КП. Рекомендуется использовать для снижения отказов звеньевых струн и усювиков фиксаторов по причине электромеханического износа при организации тяжеловесного движения и пропуске поездов повышенной массы.
Этап III. Дублирование соединений поперечных электро-соединителей с усиливающими проводами	Рекомендуется для повышения надежности контактного соединения поперечных электросоединителей с усиливающими проводами по причине возможности обгорания жил многопроволочных проводов при возникновении дефекта. Данное соединение является наиболее нагруженным узлом поперечного соединения продольных проводов. Применение рекомендуется на участках с установкой поперечных электросоединителей через пролет и более, а особенно на участках с алюминиевыми усиливающими проводами. Контактное соединение выявляется тепловизионной диагностикой только на стадии аварийного дефекта. Дефект данного соединения может привести к отказу.
Этап IV. Присоединение проводов обвода усиливающего провода к несущему тросу анкеруемой ветви.	Модернизация выполняется на участках соединения усиливающих проводов с проводами обвода. Позволяет выровнять токовую и тепловую нагрузку проводов контактной сети на сопряжениях анкерных участков, выполненных с обводом усиливающего провода. Для повышения надежности контактного соединения с алюминиевыми усиливающими проводами крепление к ним рекомендуется производить двумя зажимами. Контактное соединение усиливающих проводов с проводами обвода выявляется тепловизионной диагностикой на начальной и развивающейся стадии дефекта. Дефект в соединении может привести к отказу.
Этап V. Модернизация узла подключения питающих проводов.	Модернизация выполняется для узлов подключения питающих проводов и шлейфов к контактной сети постоянного тока путем установки поперечного электрического соединения с усиливающим проводом. Обеспечивает выравнивание токовой и тепловой нагрузки шлейфов и питающих проводов, а также в продольных проводах контактной сети до первого поперечного электросоединителя.

Порядок модернизации обусловлен взаимным влиянием узлов модернизации друг на друга, а также направлен на участки с наибольшей токовой и тепловой нагрузкой, приводящей к отказу при наличии дефекта. Так, например, использование бронзового троса средней анкеровки на участках контактной подвески с изолированными струнами приведет к повышенной тепловой нагрузке несущего троса. При этом в эксплуатации встречается вариант применения изолированных струн взамен звеньевых при ремонте и восстановлении, но без изоляции остальных струн на анкерном участке. Подобные действия приводят к повышенной нагрузке на оставшиеся звеньевые струны и на локальные участки несущего троса вблизи мест крепления средней анкеровки.

В главе представлены результаты обосновывающих расчетов о допустимости применения контактных подвесок с бронзовыми проводами и одинарным контактным проводом взамен контактных подвесок с двойным контактным проводом. Аналоги контактных подвесок представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Варианты контактных подвесок

Контактные подвески	Длительно доп. ток, А,		Погонное электрическое сопротивление, мОм/км		Стоимость, тыс. руб./км	Масса погонная, кг/км
	0	15	0	15		
<b>Тяжеловесное и скоростное движение</b>						
Типовая подвеска: М-120 + 2МФ-100 + 2М-120	2870	2710	32,9	34,8	3620	4916
Аналог 1: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-150	2730 -5 %	2710 -0 %	34,5 +5 %	35,8 +3 %	3892 +8 %	4497 -9 %
Аналог 2: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-185	2870 0 %	2860 +6 %	30,5 -8 %	31,5 -10 %	4326 +20 %	5696 +16 %
Типовая подвеска: М-120 + 2МФ-100 + 3М-120	3360	3290	27,2	28,5	4360	5950
Аналог 1: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 3М-150	3360 0 %	3360 0 %	27,0 -1 %	27,8 -2,5 %	4803 +10 %	6328 +6 %
Аналог 2: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 3М-185	3740 +11 %	3750 +14 %	23,4 -16 %	24 -19 %	5482 +26 %	7329 +23 %
<b>Высокоскоростное движение</b>						
Типовая КС-250-3М: Бр1-120 + 2Бр1Ф-120 + 2М-120	2380	2320	33,4	35,4	4180	5260
Аналог 1: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-185	2380 0 %	2320 0 %	30,5 -10 %	31,5 -12 %	4326 +3 %	5633 +7 %

Произведена оценка эффективности тепловизионной диагностики для поперечных электрических соединителей. Установлено, что дефектные зажимы поперечных электросоединителей с несущим тросом и контактными проводами не нагреваются выше температуры продольных проводов даже в случае максимального возможного тепловыделения в зажиме. При этом тепловыделение дефектных соединений поперечных электросоединителей с усиливающими проводами выше на порядок и может привести к отказу. Так, для участка с установкой поперечных электросоединителей через пролет максимальное тепловыделение в соединении с усиливающим проводом достигается при переходном сопротивлении от 16 до 31 мОм. При этом среднее значение перегрева дефектного зажима относительно нормального достигает 235 °С. Именно поэтому в

этапах модернизации предлагается дублирование соединений поперечных электросоединителей с усиливающими проводами.

На Рисунке 4 представлена температура несущего троса вблизи узла средней анкеровки с учетом и без учета предложенных мероприятий по модернизации контактной сети постоянного тока на нечетном пути участка Сарга – Сабик при проходе пакета грузовых поездов.

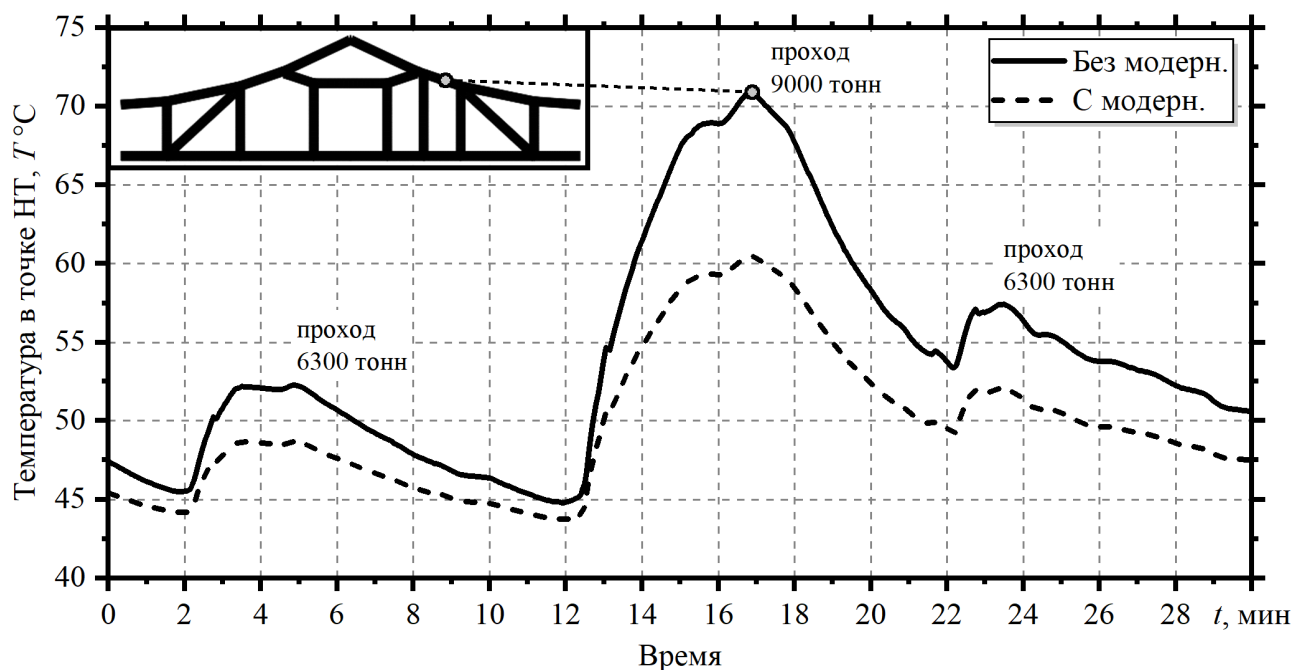


Рисунок 4 – Зависимость температуры несущего троса вблизи троса средней анкеровки до и после модернизации контактной сети на участке Сарга – Сабик

Из рисунка видно существенное снижение температуры локальной точки перегрева несущего троса.

В главе рассмотрена возможность обнаружения дефектного зажима и степень отступления по параметру нагрева в различные режимы времени после прохода пакета грузовых поездов. Для этого смоделирован проход пакетов поездов на участке Сарга – Сабик с различным значением переходного сопротивления дефектного зажима, соединяющего поперечный электрический соединитель с одним из усиливающих проводов.

В соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» № 348р от 21.02.2018 предусмотрена II, III и IV степень отступления по параметру нагрева узла со сроком устранения 3 месяца, 14 дней и 24 часа соответственно. По результатам моделирования предложены рекомендации по тепловизионной диагностике контактной сети постоянного тока.

На Рисунке 5 представлены зависимости от времени при проходе пакета поездов температуры перегрева зажима с различным значением переходного сопротивления, а также отнесение зажима к той или иной степени отступления.



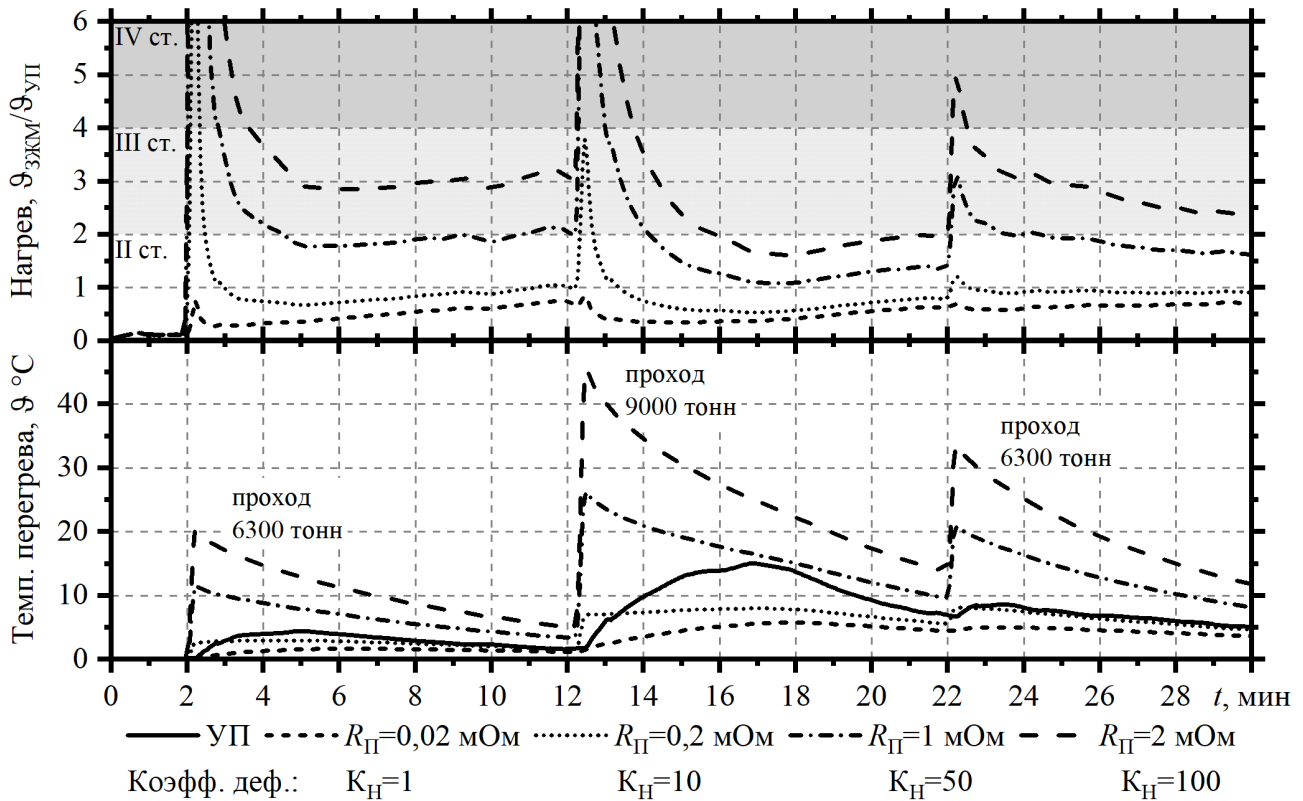


Рисунок 5 – Температура нагрева дефектного зажима в соединении поперечного электросоединителя и усиливающего провода при различном значении переходного сопротивления  $R_{II}$

Можно утверждать, что для качественной диагностики поперечных электрических соединителей контактной сети необходима установка тепловизионного измерительного комплекса в состав тяжеловесного поезда, для обеспечения регистрации значений температуры не позднее 2-3 минут после прохода токоприемника под диагностируемым элементом. Дублирование соединений данного узла на этапе модернизации позволит исключить перегрев этого сложно диагностируемого и приводящего к отказу узла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. По результатам анализа отказов контактной сети постоянного тока по причине теплового воздействия электрического тока установлено, что используемая конструкция с точки зрения электротепловых процессов и методы их расчета нуждаются в доработке при существующих условиях эксплуатации. Выявлено, что среди всех отказов контактной сети (без учета повреждений контактного провода при ненормативных режимах тяги) порядка 20 % происходит по причине теплового воздействия электрического тока. Выполнен анализ существующих методик электротепловых расчетов, на основании которого определены критерии для их применения, а также сформулированы требования к разрабатываемой методике.

2. Разработана методика электротеплового расчета контактной сети постоянного тока, основанная на методе конечных элементов, учитывающая арматуру, геометрию контактной сети, неоднородные параметры элементов и нелинейные свойства материалов для режимов транзита тягового тока и токо-съема. Разработанная методика рекомендована для применения на предприятии АО «Универсал – контактные сети».

3. Создана программа для ЭВМ под названием ELTECAT АВ УрГУПС, в которой реализована предложенная методика расчета.

4. Произведена валидация разработанной методики на базе масштабной модели и участках контактной сети в лабораторных условиях. Отклонения расчетных и измеренных величин сопоставимы с инструментальной погрешностью используемых приборов и не превышают 5 %.

5. Произведены верификации разработанной методики с экспериментальными исследованиями распределения температуры при обрыве внутренних жил в многопроволочном проводе и нагрева токосъемных пластин токоприемника, выполненных сторонними авторами. Средние отклонения расчетных и экспериментальных данных при верификации составили 4 % и 9 % соответственно, что также свидетельствует об адекватности разработанной методики.

6. Произведен анализ существующей контактной сети на наличие «узких мест» с точки зрения токовой и тепловой нагрузки. Разработаны конструкционные решения по устранению этих мест, отличающиеся от ранее разработанных улучшенным выравниванием токовой и тепловой нагрузки. В частности, вблизи мест подключения питающих проводов выравнивание температуры составляет до 6 °С, а вблизи троса средней анкеровки – до 43,2 °С. Разработаны этапы модернизации и усиления контактной сети, которые позволяют повысить нагрузочную способность контактной сети постоянного тока до 6 %. Получено решение о выдаче патента на полезную модель по Заявке № 2019113958/09(026928) от 06.05.2019 на «Устройство средней анкеровки компенсированной контактной подвески».

7. Проведены обосновывающие расчеты по допустимости применения контактных подвесок с одинарным контактным проводом взамен контактных подвесок с двойным контактным проводом.

8. Проведены расчеты по оценке эффективности выявления дефектных элементов контактной сети при тепловизионной диагностике. Выявлено, что наибольшее тепловыделение в дефектных соединениях поперечного электросоединителя наблюдается в месте крепления к усиливающим проводам, где средняя температура может достигать 235 °С, а температура в дефектных соединениях с несущим тросом и контактным проводом не превышает температуры продольных проводов.

Перспективы дальнейшей разработки темы включают в себя:

1. Более детальный учет характеристик тяговых подстанций и пунктов повышения напряжения.

2. Геометрию расчетного участка с учетом трехмерного объемного твердотельного представления элементов контактной сети и полозов токоприемника.

3. Учет воздействия электрической дуги на элементы контактной сети постоянного тока.

### СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических научных изданиях, включенных ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. **Батрашов, А. Б.** Обоснование допустимости применения одинарного контактного провода взамен двойного для контактной подвески постоянного тока на основании теплового расчета / А. В. Паранин, А. Б. Батрашов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1 (65). – С. 109–114.

2. **Батрашов, А. Б.** Сравнение моделей токораспределения в контактных подвесках постоянного тока / А. Б. Батрашов // Известия Транссиба. – 2017. – № 4 (32). – С. 54–67.

3. **Батрашов, А. Б.** Валидация математической модели электротеплового расчета контактной подвески постоянного тока на базе масштабной модели / А. В. Паранин, А. Б. Батрашов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – (Т. 77) № 4. – С. 222–229.

4. **Батрашов, А. Б.** Совершенствование математической модели расчета электротепловых процессов в контактной подвеске постоянного тока / А. Б. Батрашов, А. В. Паранин, К. Г. Шумаков // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 90–96.

5. **Батрашов, А. Б.** Конструкционные решения по выравниванию токовой и тепловой нагрузки проводов контактной сети постоянного тока / А. Б. Батрашов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (41). – С. 79–88.

### ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Работы [2, 5] опубликованы без соавторов. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1] – разработка конструктивных вариантов подвесок-аналогов, выбор сечений проводов, проведение электротепловых расчетов контактных подвесок для определения значений допустимых токов подвесок, проведение сравнительного анализа в режимах токосъема и перегрузки; [3] – разработка и монтаж лабораторной установки масштабной модели, проведение лабораторных испытаний, разработка математических моделей для проведения расчета исследуемых участков, статистическая обработка выборок расхождения опытных значений от расчетных; [4] – формирование параметров математической модели, проведение расчетов.

БАТРАШОВ АНДРЕЙ БОРИСОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ И  
ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Подписано в печать 30.09.2019  
Усл. печ. л. 1,2

Формат 60×84  $\frac{1}{16}$   
Тираж 100 экз.

УрГУПС  
Заказ № 47

---

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66