

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

На правах рукописи



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)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
Паранин Александр Викторович

Екатеринбург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	5
1 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК	
ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО	
ТОКА	
	13
1.1 Постановка задачи для анализа существующих методик электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока	13
1.2 Анализ тепловых повреждений контактной сети постоянного тока	14
1.3 Требования нормативно-технической документации к элементам контактной сети постоянного тока	18
1.4 Обзор существующих методик электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока	22
1.5 Сравнительный анализ электротепловых расчетов по различным математическим моделям	44
1.6 Выводы по первой главе	55
2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ	
ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	
	57
2.1 Постановка задачи для разработки математической модели электротеплового расчета контактной сети постоянного тока	57
2.2 Геометрия контактной сети и расчетная сетка	58
2.3 Математическая модель токораспределения	62
2.3.1 Уравнение распределения тока	62
2.3.2 Граничные условия для расчета токораспределения	64
2.4 Математическая модель распределения температуры	67
2.4.1 Уравнение нагрева и охлаждения проводов	67
2.4.2 Теплообмен контактного провода и токосъемных пластин	76
2.4.3 Граничные условия для расчета температуры	84

2.5 Алгоритм проведения электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока	85
2.6 Выводы по второй главе.....	87
3 ВАЛИДАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА.....	89
3.1 Постановка задачи для валидации методики.....	89
3.2 Лабораторная установка на базе масштабной модели для экспериментального исследования распределения тока и температуры в контактной сети постоянного тока	90
3.3 Формирование параметров масштабной модели для расчета.....	93
3.4 Сравнение экспериментальных и расчетных результатов исследования масштабной модели.....	94
3.5 Лабораторная установка для экспериментального исследования распределения тока и температуры в элементах контактной сети	108
3.6 Формирование параметров модели участков контактной сети для проведения расчета	112
3.7 Сравнение экспериментальных и расчетных результатов исследования участка контактной сети	114
3.8 Верификация расчетных данных с результатами экспериментальных исследований сторонних авторов	125
3.8.1 Экспериментальное исследование нагрева контактного провода в эксплуатации	125
3.8.2 Экспериментальное исследование дефекта несущего троса	127
3.8.3 Экспериментальное исследование нагрева токоъемных пластин токоприемника	130
3.9 Выводы по третьей главе	133
4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ОЦЕНКА ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ.....	136

4.1 Выявление «узких мест» в контактной сети постоянного тока с точки зрения тепловой нагрузки	137
4.2 Разработка этапов модернизации узлов контактной сети постоянного тока	160
4.3 Оценка возможности выявления дефектных элементов контактной сети постоянного тока при тепловизионной диагностике на основании электротеплового расчета	163
4.4 Обоснование допустимости применения контактных подвесок с одинарным контактным проводом взамен двойного	171
4.5 Оценка влияния предлагаемых мероприятий по модернизации контактной сети по разработанной методике электротеплового расчета на примере участка Сарга – Сабик.....	178
4.6 Выводы по четвертой главе	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	190
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	192
ПРИЛОЖЕНИЕ А Программа для электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока ELTECAT АВ УрГУПС	208
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Допустимые температурные воздействия на провода контактной сети	210
ПРИЛОЖЕНИЕ В Документы о внедрении результатов научно-исследовательской работы	212

ВВЕДЕНИЕ

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 [1], Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации [2], а также Стратегия развития холдинга «РЖД» [3] 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 конструктивных особенностей, не имеет резерва. Проектирование существующей контактной сети производилось с упрощением ее геометрии и без учета ряда конструктивных 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.

Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года [4] предполагает создание, стимулирование и внедрение высокопроизводительных рабочих мест в сфере технического обслуживания

и диагностики инфраструктуры. 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.

Совершенствование электротепловых расчетов и характеристик контактной сети постоянного тока тесно связано с трудами российских и зарубежных ученых по таким проблемам как:

– проектирование и совершенствование системы электроснабжения постоянного тока: Аржанников Б.А. [5; 6], Бадер М.П. [6], Беляев И.А. [7], Бурков А.Т. [6; 8], Гаранин М.А. [9–11], Зимакова А.Н. [12; 13], Мамошин Р.Р. [13], Марквардт К.Г. [14; 15], Михеев В.П. [16], Фрайфельд А.В. [17], Черемисин В.Т. [18], Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A. [19] и др.;

– распределение тока в элементах контактной сети: Воронин А.В. [20], Косарев А.Б., Косарев Б.И. [21; 22], Костюченко К.Л. [23], Кудряшов Е.В. [24], Марский В.Е. [25], Паранин А.В. [26–33] и др.;

– нагрев элементов контактной сети: Бочев А.С. [34], Григорьев В.Л. [35; 36], Игнатенко И.В. [37; 38], Кобозев А.В. [39], Ли В.Н. [37], Эпштейн Л.Л. [40], Lingen J. [41], Löbl H. [42], Merz H. [43], Szepek V. [44], Zürrer Th. [43] и др.;

– влияние нагрева на свойства материалов контактной сети: Берент В.Я. [45–48], Гершман И.С. [49–51], Гуков А.И. [52; 53], Купцов Ю.Е. [54], Мирнос

Н.В. [50; 51], Порцелан А.А. [55; 56], Флинк Д.В. [57], Roggen F. [43; 58], Schmidt P. [41] и др.;

– разработка тепловой защиты контактной сети: Набойченко И.О. [59–61], Неугодников В.П. [59; 62], Тепляков В.Б. [63], Фигурнов Е.П. [64] и др.;

– диагностика контактной сети и ее взаимодействие с токоприемником: Галкин А.Г. [65; 66], Грачев В.Ф. [67], Ефимов А.В. [26; 27], Жарков Ю.И. [68], Павлов В.М. [69], Сидоров О.А. [70], Смердин А.Н. [69; 70], Jiqin Wu [71], Petrausch D. [72], Xi-Yang Liu [73] и др.

Тема диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки) в следующих пунктах областей исследования:

– техническая диагностика подвижного состава и систем электроснабжения; критерии оценки состояния подвижного состава и систем электроснабжения железных дорог и метрополитенов; системы автоматизации процессов технической диагностики этих объектов;

– совершенствование подвижного состава, тяговых подстанций, тяговых сетей, включая преобразователи, аппараты, устройства защиты, схемы электроснабжения; улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава и устройств электроснабжения.

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 электро-тепловых 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); X международная научно-практическая конференция «Будущее транспорта России» (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 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.

1 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1 Постановка задачи для анализа существующих методик электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока

Существенное значение в транспортной системе России имеют участки железной дороги, электрифицированные на постоянном токе. Проектированию и совершенствованию системы электроснабжения постоянного тока посвящены работы [5–19].

Особую роль в системе электроснабжения играет контактная сеть, так как она не имеет резерва. Анализом процессов распределения тока в элементах контактной сети посвящены работы [20–33]. Изучение нагрева элементов контактной сети электрическим током рассмотрено в трудах [34–44]. Как показывают исследования [45–58], температура оказывает значительное влияние на свойства материалов контактной сети. Таким образом, задача электротеплового расчета контактной сети постоянного тока является междисциплинарной и требует связанного расчета электрических и тепловых процессов.

Совершенствование электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока важно при проектировании и эксплуатации, открывает новые возможности при диагностике [65–73], особенно тепловизионной [67; 69; 72], а также может быть использовано при разработке тепловой защиты [59–64].

При проведении сравнительного анализа существующих методик электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока также важно выявить элементы контактной сети, наиболее подверженные отказам по причине токовых и тепловых нагрузок, для оценки важности их учета при принятии расчетных допущений. Для этих целей необходимо выполнить анализ отказов контактной сети постоянного тока, в том числе содержащей участки обращения поездов повышенной массы и тяжеловесных поездов.

В ходе сравнительного анализа необходимо определить допущения, принятые в методиках электротепловых расчетов, и сопоставить возможность применения данных методик с задачами, которые могут быть поставлены перед расчетом.

По результатам анализа расчетных методик необходимо определить требования, предъявляемые к электротепловому расчету контактной сети постоянного тока в условиях возрастающих потребностей в повышении объемов движения.

1.2 Анализ тепловых повреждений контактной сети постоянного тока

Система электроснабжения постоянного тока имеет относительно низкий уровень напряжения в контактной сети – 3 кВ, что влечет за собой достаточно высокие токовые, и, как следствие, тепловые нагрузки. Так, локомотив 2ЭС10 с бустерной секцией 2ЭС10С, имеет максимальную (часовую) мощность на валах тяговых двигателей, равную 13200 кВт. Таким образом, ток одного грузового локомотива с весовой нормой 9000 тонн на горном профиле может достигать значений до 4400 А. Согласно [2, с. 27], для тяжеловесного движения планируется использование контактной подвески КС-160, при этом, в соответствии с [74], ее длительно допустимый ток, в зависимости от числа усиливающих проводов, составляет от 2160 до 3440 А. При этом стоит отметить, что несмотря на обновление правил содержания контактной сети [75], на практике часто обращаются к документу [74] за частью информации, которая в новой редакции правил отсутствует.

В настоящий момент на главных путях Свердловской железной дороги широко используются контактные подвески М-95+ 2МФ-100 + 2А-185 и М-120 + 2МФ-100 + 2А-185, которые, с учетом износа контактного провода 15 %, имеют длительно допустимый ток, равный 2590 и 2710 А соответственно. При этом возрастает потребность в дальнейшем увеличении пропускной способности участков для тяжеловесных поездов и поездов повышенной массы.

Проектирование контактных подвесок, использующихся в настоящее время, осуществлялось без учета столь высоких токовых нагрузок. Развитие тяжеловесного движения на существующих участках приводит к ряду отказов элементов

контактной сети, связанных с тепловым воздействием электрического тока. На Рисунке 1.1 представлена интенсивность отказов элементов контактной сети на Свердловской железной дороге с 2010 по 2017 годы на основании эксплуатационных данных.

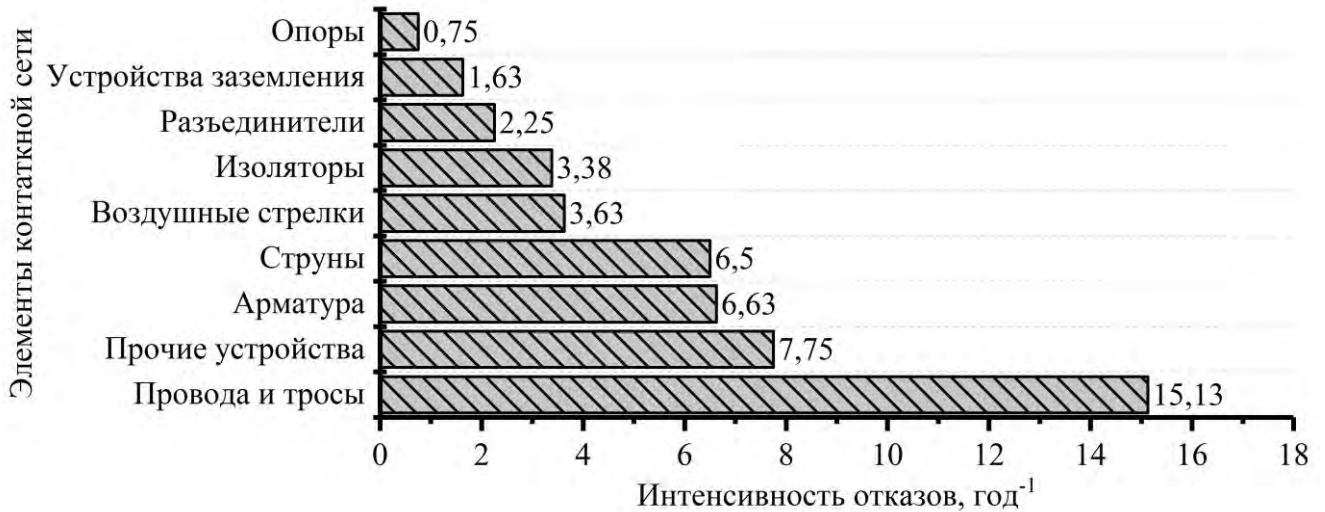


Рисунок 1.1 – Интенсивность отказов элементов контактной сети

Из рисунка видно, что наибольшее число отказов приходится на провода, арматуру и неизолированные звеньевые струны. В среднем на отказы контактного провода приходится 47 % от общего числа отказов проводов контактной сети. Порядка 20 % всех отказов контактной сети постоянного тока происходит по причине теплового воздействия электрического тока¹. На Рисунке 1.2 изображена доля тепловых отказов элементов контактной сети в зависимости от года.

¹ Без учета повреждений контактного провода при ненормативных режимах тяги.

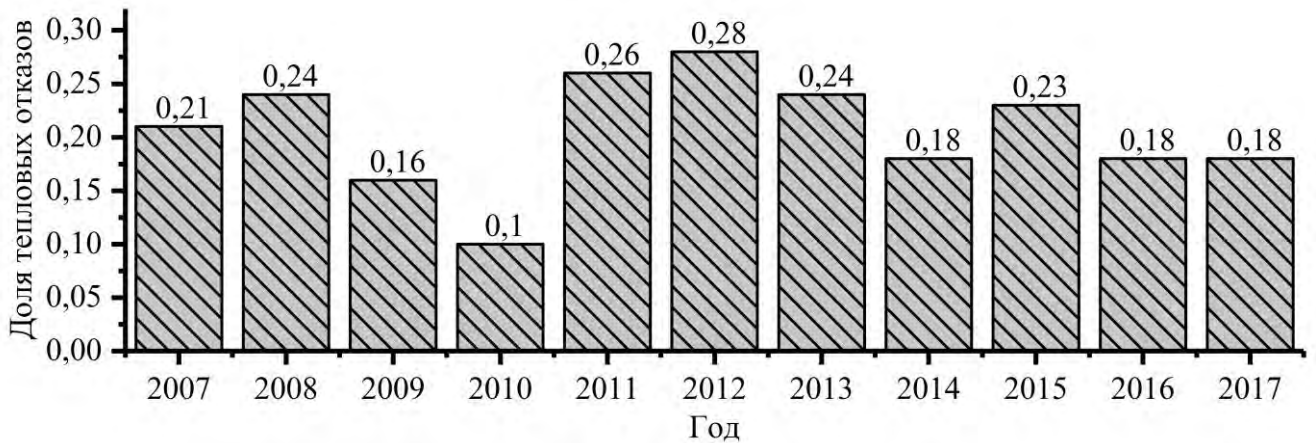


Рисунок 1.2 – Доля тепловых отказов контактной сети

На участках обращения тяжеловесных поездов доля обрыва и пережога звеньевых струн составляет порядка 70 % от общего числа повреждений струн. В связи с этим дистанции электроснабжения производят мероприятия по усилению контактной сети для пропуска тяжеловесных поездов путем установки дополнительных электрических соединителей. В период с 2011 по 2017 год на Свердловской железной дороге в общей сложности было заменено и установлено 18,5 тыс. электрических соединителей. При этом, согласно Рисунку 1.2, не прослеживается тенденции к снижению количества отказов звеньевых струн. Провода, тросы, звеньевые струны и арматура контактной сети являются наиболее часто отказываемыми элементами. Стоит учесть, что электротепловые расчеты при проектировании существующей инфраструктуры контактной сети производились с упрощениями геометрии соединения проводов и без учета арматуры контактной сети и звеньевых струн.

На Рисунке 1.3 представлена зависимость отказов элементов контактной сети Свердловской железной дороги по годам.

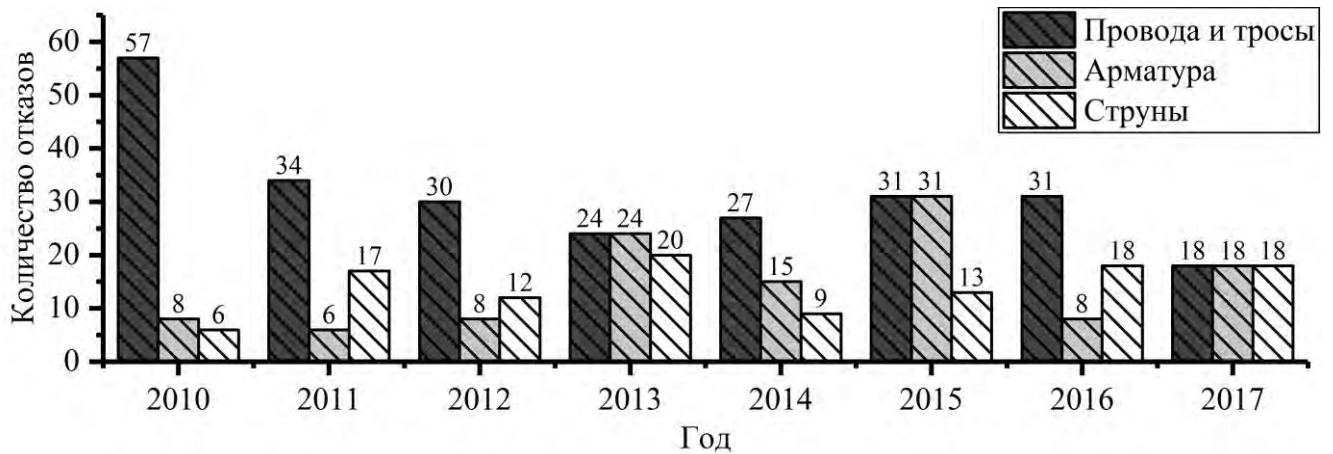


Рисунок 1.3 – Количество отказов элементов контактной сети по годам

Опыт эксплуатации контактной сети постоянного тока на участках с обращением тяжеловесных поездов и поездов повышенной массы показывает принципиальную возможность использования существующих контактных подвесок для данных целей. Однако повышение количества отказов элементов контактной сети от теплового воздействия электрического тока свидетельствует, что для этого необходимо совершенствование конструкции контактной сети на основании уточненных электротепловых расчетов. Расширение расчетных возможностей создаваемой методики должно быть направлено в сторону учета наиболее часто отказываемых элементов, которые ранее были подвергнуты упрощению.

Накопленный практический опыт по усилению контактной сети с целью пропуска тяжеловесных поездов и поездов повышенной массы показывает, что установки дополнительных электрических соединителей недостаточно. Также разработка этапов по усилению контактной сети постоянного тока должна учитывать взаимное влияние конструктивных изменений друг на друга. Так, например, часть токовой нагрузки, которая приходится на звеньевые струны, при их изоляции будет распределена между другими элементами контактной сети, что в свою очередь приведет к изменениям тепловой нагрузки.

Одной из основных целей при электротепловых расчетах контактной сети постоянного тока является сопоставление тепловой нагрузки, действующей на

элементы контактной сети, с максимально допустимой температурой материалов, из которых они изготовлены.

1.3 Требования нормативно-технической документации к элементам контактной сети постоянного тока

Эксплуатационные характеристики проводов контактной сети постоянного тока предъявляют ряд противоречивых требований к материалу для их изготовления. Так, материал должен обладать низким электрическим сопротивлением, но высокой прочностью и стойкостью к механическим и термическим нагрузкам. Ни один из металлов или сплавов в полной мере не удовлетворяет всем желаемым требованиям. Подробное описание материалов, применяемых для изготовления проводов контактной сети, и их свойств содержится в [45; 46].

Медь обладает высокой электропроводностью (порядка $59,5 \cdot 10^6$, См/м) и наиболее часто используется в качестве материала для проводов контактной сети постоянного тока на ОАО «РЖД». Провода контактной сети при изготовлении подвергаются пластической деформации в процессе волочения через фильеры, либо, как это было раньше при изготовлении контактных проводов – прокатке катанки через клетки прокатного стана. Упрочнение проводов в процессе деформации происходит в результате снижения подвижности дислокаций при их взаимодействии друг с другом и с другими дефектами кристаллической решетки, причем характер упрочнения существенно зависит от типа дефектов. Препятствием для распространения дислокаций могут являться границы зерен в поликристаллах, а также примеси легирующих элементов. Под воздействием растягивающих усилий, а также нагрева тяговым током провода подвержены процессам ползучести и рекристаллизации. Повышение температуры рекристаллизации и увеличение прочности медных проводов осуществляется легированием Mg, Cd, Zr, Cr, Ag, Sn, которое приводит к снижению электропроводности и увеличению тепловыделения при протекании тягового тока.

Достижение эксплуатационной прочности происходит за счет деформационного упрочнения и легирования проводов, поэтому нагрев провода или его части до температуры рекристаллизации ведет к обрыву, а превышение максимально допустимой температуры провода приводит к ускорению рекристаллизационных процессов, вытягиванию провода и, как следствие, снижению срока службы.

Технические требования, предъявляемые к контактными проводам (КП) из меди и ее сплавов, а также методы их испытаний отражены в ГОСТ Р 55647–2018 [76]. Данный стандарт распространяется на КП, предназначенные для контактной сети электрифицированных железных дорог, эксплуатируемых на территории Российской Федерации. Аналогично для несущих тросов (НТ) и усиливающих проводов (УП) используются ГОСТ 32697–2014 [77] и ГОСТ 839–80 [78] соответственно.

Согласно техническому указанию № К–01/12 от 17.01.2012, применение алюминиевых проводов марок А и АС в качестве УП, проводов питающих (при их длине до 200 м по условиям монтажа) и отсасывающих линий, шлейфов пунктов параллельного соединения (ППС) и постов секционирования (ПС) контактной сети запрещается для использования в проектах с 01.02.2012 [26]. Тем не менее алюминиевые провода остаются в эксплуатации на существующих контактных подвесках.

В качестве троса средней анкеровки (СА) в контактных подвесках постоянного тока могут применяться биметаллические сталемедные провода ПБСМ, изготовленные по ГОСТ 477–91 [79], либо бронзовые провода – по DIN 48201–1:1981–04 [80] или ГОСТ 32697–2014 [77]. Струны могут выполняться из биметаллической сталемедной проволоки по ГОСТ 3822–79 [81], проводов из меди или бронзы по DIN 48201–1:1981–04 [82] или ГОСТ 26437–85 [83], а также из изоляционных материалов, таких как полиамид по ГОСТ 30055–93 [84]. Поперечные электросоединители могут выполняться медными проводами по ГОСТ 26437–85 [83] или ГОСТ 839–80 [78].

Для руководства при проектировании, монтаже и эксплуатации контактной сети ранее были предназначены «Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог» [74], отмена которых произошла приказом Министерства транспорта РФ [85]. Взамен им на сегодняшний

день предлагается использовать «Правила содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи» [75]. Тем не менее использование [74] остается допустимым по приказу Ространснадзора [86], так как часть нормативно-технических требований не учтена в [75], а необходимые изменения еще не вступили в силу.

Так, в [74] установлены допустимые длительные токи проводов при температуре окружающего воздуха плюс 40 °С и скорости ветра 1 м/с, максимальные температуры нагрева проводов при длительности протекания тока в течение 20, 3 и 1 минуты, а также допустимая кратность перегрузок. Данные правила распространяются на устройства контактной сети, обеспечивающие скорость движения до 200 км/ч.

В России нормативно-техническая документация по проектированию контактной сети при высокоскоростном движении на текущий момент находится в стадии разработки [87]. Также при проектировании контактной сети опираются на международный опыт [19; 88–91].

Рекристаллизационное разупрочнение материала, от которого в том числе зависит срок службы контактной сети, оценивается по степени относительной ползучести при испытаниях по ГОСТ Р 55647–2018 [76] и ГОСТ 32697–2014 [77]. На ползучесть влияют три параметра: механическое напряжение от растягивающих усилий, температура и время воздействия этих нагрузок. В работах [92; 93] рассмотрено разупрочнение проводов от температуры.

Электротепловой расчет контактной сети позволяет оценить величину и время воздействия термических нагрузок на провода контактной сети при перегрузках, проходе токоприемника и транзите тягового тока. В рамках электротеплового расчета осуществляется проверка соответствия тепловых режимов работы проводов контактной сети требованиям нормативно-технической документации.

Расчет температуры и длительно допустимого тока в проводах контактной сети описывается методикой, приведенной в ГОСТ Р 57670–2017 [94]. При этом методика не включает в себя расчет распределения тока в контактной сети, а также соединение проводов друг с другом в пространстве. Подобные методики также

подробно описаны в [36; 64] и их часто используют при расчетах и проектировании, а также обращаются к [95].

С точки зрения электротепловых характеристик к арматуре контактной сети, согласно ГОСТ 12393–2013 [96], предъявляются требования по соответствию коэффициента дефектности токоведущих соединений с нормируемыми значениями.

Коэффициент дефектности зажимов по температуре K_Q вычисляют по формуле

$$K_Q = \frac{T_C}{T_{ПР}}, \quad (1.1)$$

где T_C – температура токоведущего соединения, °С;

$T_{ПР}$ – температура ответвления провода с минимальным номинальным сечением, измеренная на расстоянии не менее 1 м от арматуры, °С.

Стоит отметить, что измерение температурного коэффициента дефектности происходит при установившейся температуре, достигаемой токоведущим соединением при протекании длительно допустимого тока. Установившейся считают температуру, при которой дальнейшее нагревание током токоведущего соединения вызывает ее изменение не более чем на 1 °С за 10 минут [96]. Для большинства токоведущих зажимов контактной сети характерен нестационарный режим протекания электрического тока, что не позволяет применять температурный коэффициент дефектности для диагностики зажимов [66].

Коэффициент дефектности зажимов по электрическому сопротивлению K_H вычисляют по формуле

$$K_H = \frac{R_C}{R_{ПР}} = \frac{\Delta U_C}{\Delta U_{ПР}}, \quad (1.2)$$

где R_C , $R_{ПР}$ – электрическое сопротивление, соответственно, токоведущего соединения условной длины l_C и ответвления провода с минимальным номинальным сечением такой же длины, Ом;

ΔU_C , $\Delta U_{\text{ПР}}$ – падение напряжения, соответственно, на токоведущем соединении условной длины l_C и на ответвлении провода с минимальным номинальным сечением такой же длины, при протекании по ним одинакового тока, В.

1.4 Обзор существующих методик электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока

Электротепловые расчеты контактной сети постоянного тока используются для решения ряда инженерных задач на основных стадиях жизненного цикла [97] контактной сети:

- на стадии разработки новых технических решений контактной сети:
 - а) разработка нормативно-технической документации с точки зрения электротепловых характеристик;
 - б) разработка схемных и конструктивных решений по результатам электротепловых расчетов;
 - в) разработка технологий проектирования и критериев выбора модели электротеплового расчета;
 - г) разработка методик и инструментария для моделирования электротепловых процессов;
- на стадии реализации технических решений:
 - а) определение принципов развития проекта контактной сети по данным электротепловых расчетов;
 - б) исследование альтернативных вариантов проекта контактной сети;
 - в) разработка этапов внедрения технических решений на основании электротепловых расчетов;
- на стадии эксплуатации контактной сети:
 - а) совершенствование существующих конструкционных и технических решений на основании электротепловых расчетов;
 - б) выбор методов системного анализа и диагностики контактной сети на основании электротепловых расчетов;

- в) разрешение проблем при эксплуатационных инцидентах;
- г) определение эксплуатационных ограничений контактной сети при пропуске поездов с превышением весовой нормы поездов, установленной графиком движения.

На сегодняшний день существуют семь основных моделей расчета токораспределения в проводах контактной сети постоянного тока, предназначенных для определения конструкции и нагрузочной способности контактной сети. Модели токораспределения рассмотрены в работе [98]. Методика подбора материала КП описана в работах [99–101].

Модель естественного токораспределения

В настоящее время расчет токонесущей способности контактной сети постоянного тока определяют по сумме токов, которые протекают через КП, НТ и УП [19, с. 736]

$$I_{\Sigma\text{КС}} = I_{\text{НТ}} + I_{\text{КП}} + I_{\text{УП}}, \quad (1.3)$$

где $I_{\Sigma\text{КС}}$ – токонесущая способность контактной сети, А;

$I_{\text{НТ}}$ – ток, протекающий в НТ, А;

$I_{\text{КП}}$ – ток, протекающий в КП, А;

$I_{\text{УП}}$ – ток, протекающий в УП, А.

Токи в проводах определяют на основании гипотезы естественного токораспределения, основанной на том, что распределение тока между продольными проводами происходит обратно пропорционально их удельному сопротивлению. Расчетная схема замещения контактной сети постоянного тока в модели естественного токораспределения представлена на Рисунке 1.4.

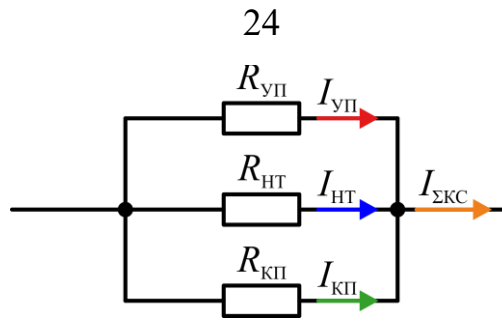


Рисунок 1.4 – Расчетная схема замещения контактной сети постоянного тока в модели естественного токораспределения

Ток в НТ, КП и УП рассчитывается по формуле

$$I_i = \frac{I_{\Sigma КС} \cdot R_{\Sigma КС}}{R_i}, \quad (1.4)$$

где i – индекс, соответствующий НТ, КП или УП;

$R_{\Sigma КС}$ – суммарное погонное сопротивление контактной сети, Ом/м;

R_i – погонное сопротивление i -ого провода, Ом/м.

Суммарное погонное сопротивление контактной сети рассчитывается как для параллельно соединенных проводников по формуле

$$\frac{1}{R_{\Sigma КС}} = \frac{1}{R_{НТ}} + \frac{1}{R_{КП}} + \frac{1}{R_{УП}}, \quad (1.5)$$

которая после преобразования имеет следующий вид

$$R_{\Sigma КС} = \frac{R_{НТ} \cdot R_{КП} \cdot R_{УП}}{R_{КП} \cdot R_{НТ} + R_{КП} \cdot R_{УП} + R_{УП} \cdot R_{НТ}}. \quad (1.6)$$

Токонесущая способность контактной сети $I_{\Sigma КС}$ ограничивается тем проводом, который первым достигает тока $I_{i \text{ ОГР}}$, ограниченного максимально допустимой температурой

$$I_{\Sigma КС} = I_{i \text{ ОГР}} \cdot \left(1 + \frac{n_2}{n_{i \text{ ОГР}}} + \frac{n_3}{n_{i \text{ ОГР}}} \right), \quad (1.7)$$

где i – индекс, соответствующий КП, НТ или УП;

$I_{i \text{ ОГР}}$ – длительно допустимый ток i -ого ограничивающего провода;

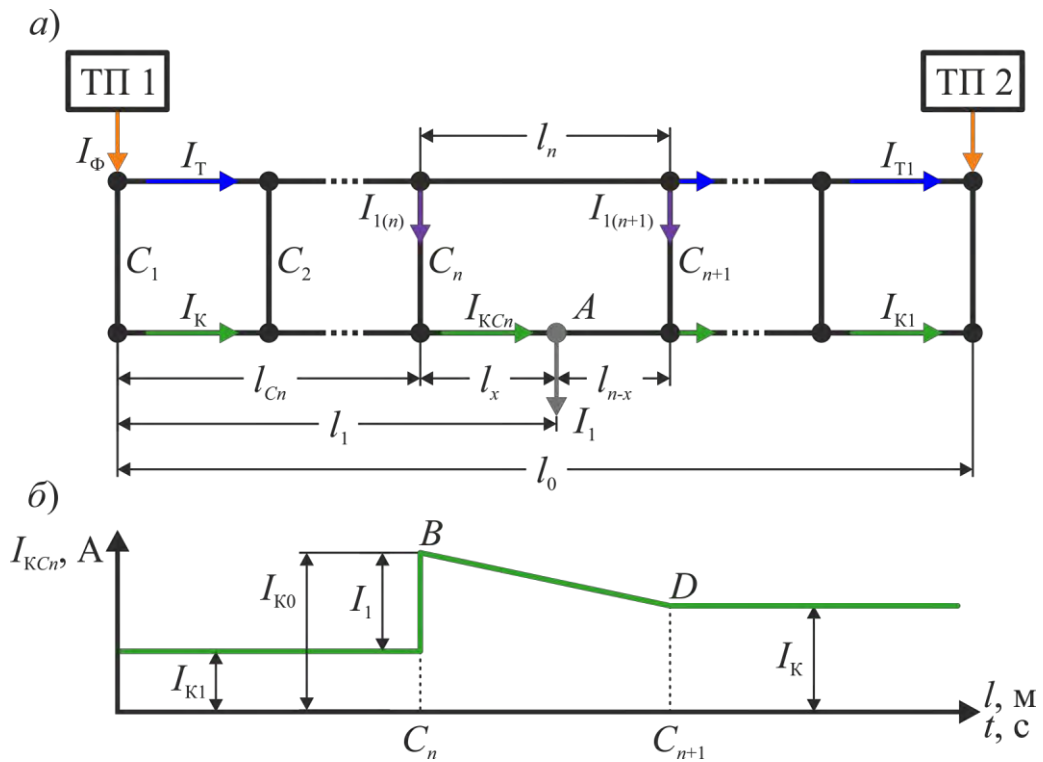
$n_{i \text{ ОГР}}$ – доля тока в i -ом ограничивающем проводе;

n_2, n_3 – доля тока в оставшихся проводах контактной сети.

В модели естественного токораспределения учитываются только продольные провода контактной сети, а поперечные соединения, такие как струны, СА, ПС, РТ учтены быть не могут. Реальная картина токораспределения может существенно отличаться от естественной модели в зависимости от топологии и геометрии контактной сети. В статье В.Е. Марского [25] впервые в России была показана перегрузка НТ почти на 30 % в зоне около крепления троса СА. Также модель естественного токораспределения не предполагает расчет в режиме прохода токоприемника электроподвижного состава (ЭПС). Таким образом, можно сделать вывод, что использование модели естественного токораспределения допустимо для предварительной оценки токонесущей способности контактной сети постоянного тока.

Модель А.В. Воронина

Для выбора расположения ПС в контактной сети К.Г. Марквардтом [15] была использована модель токораспределения А.В. Воронина [20], основанная на расчете эффективной токовой нагрузки на контактный провод на участке, ограниченном двумя поперечными электрическими соединителями (УОС), при проходе токоприемника ЭПС. Расчетная схема участка контактной сети представлена на Рисунке 1.5, а.



а) схема замещения контактной сети;

б) график тока в точке КП около ПС от времени или координаты ЭПС

Рисунок 1.5 – Расчетная схема токораспределения в контактной сети постоянного тока по модели А.В. Воронина

На Рисунке 1.5 представлены следующие условные обозначения: ТП 1, ТП 2 – тяговые подстанции; C_1, C_2, C_n, C_{n+1} – поперечные электрические соединители; A – местоположение токоприемника ЭПС; I_Φ – ток фидера подстанции ТП 1, А; I_T – ток в эквивалентном проводе до точки токосъема, А; I_{T1} – ток в эквивалентном проводе после точки токосъема, А; I_K – ток в КП от ТП 1 до C_n , А; I_{K1} – ток в КП от C_{n+1} до ТП 2, А; I_{KCn} – ток в КП от C_n до токоприемника ЭПС, А; I_1 – ток ЭПС, А; l_{Cn} – расстояние от подстанции ТП 1 до C_n , м; l_1 – расстояние от подстанции до токоприемника ЭПС, м; l_0 – длина межподстанционной зоны, м; l_x – расстояние от C_n до токоприемника ЭПС, м; l_{n-x} – расстояние от токоприемника ЭПС до C_{n+1} , м; l_n – расстояние между C_n и C_{n+1} , м.

Данная модель разрабатывалась с целью решения задачи нагрева, прежде всего, КП, так как на него воздействует наибольшая токовая нагрузка в процессе токосъема. Контактная сеть в модели представлена двумя проводами с погонными

сопротивлениями проводов r_K и r_T , где r_K – погонное сопротивление одинарного или двойного КП, Ом/м, а r_T – эквивалентное погонное сопротивление НТ и УП, Ом/м. Предполагается, что контактный и эквивалентный провод соединены между собой ПС с нулевым сопротивлением. При двустороннем питании считается, что ток между подстанциями ТП 1 и ТП 2 распределяется обратно пропорционально расстоянию от нагрузки до соответствующей подстанции.

Ток I_1 раскладывается между узловыми точками C_n и C_{n+1} обратно пропорционально расстоянию от этих узлов до точки приложения нагрузки A . Распределение токов $I_{1(n)}$ и $I_{1(n+1)}$ между подстанциями происходит обратно пропорционально расстоянию до соответствующей подстанции. В случае расположения нескольких ЭПС на межподстанционной зоне их составляющие суммируются по методу суперпозиции.

Токораспределение в проводах контактной сети до поперечных электросоединителей C_n и C_{n+1} , между которыми находится токоприемник ЭПС, рассчитывается как для параллельно соединенных проводников, аналогично естественной модели токораспределения.

Формула для определения тока на участке между C_n и местом приложения нагрузки A выглядит следующим образом

$$I_{KCn} = \frac{1}{r_K + r_T} \cdot \left(I_\Phi \cdot r_T + I_1 \cdot \frac{r_K \cdot (-l_x)}{l_n} \right). \quad (1.8)$$

Максимальное значение тока в точке контактного провода около узла C_n возникает при $l_x = 0$ или, что то же самое, $l_1 = l_{Cn}$

$$I_{K0} = \frac{1}{r_K + r_T} \cdot (I_\Phi \cdot r_T + I_1 \cdot r_K). \quad (1.9)$$

Так как $l_n \ll l_0$, то изменением токораспределения между подстанциями при проходе токоприемника по расчетному УОС пренебрегают и считают составляющую тока фидера ТП 1 $I_{\Phi 1}$ от нагрузки I_1 постоянной. Ток I_{KCn} в таком случае может быть представлен в виде зависимости $I_{KCn}(l_1)$, изображенной на Рисунке 1.5, б.

В расчете предполагается, что скорость движения электровоза постоянная, а, следовательно, расстояние l_x в соответствующем масштабе показывает время. Квадрат эффективного тока $I_{K0Э}$ в точке контактного провода ПС за время хода электровоза по УОС определяется по формуле

$$I_{K0Э}^2 = \frac{3 \cdot I_{\Phi}^2 \cdot r_T^2 + 3 \cdot I_{\Phi} \cdot I_1 \cdot r_T \cdot r_K + I_1^2 \cdot r_K^2}{3 \cdot (r_T + r_K)^2}. \quad (1.10)$$

По ЦЭ-868 [74, с. 11] установлены допустимые температуры нагрева проводов и кратность токовых перегрузок при длительности протекания тока 1, 3 и 20 минут. Определение эффективного тока за установленные интервалы времени производят по формуле

$$I_{KHЭ}^2 = \left(I_{K0Э}^2 \cdot t_{\Pi} + I_{K\thetaЭ}^2 \cdot (t_H - t_{\Pi}) \right) \cdot \frac{1}{t_H}, \quad (1.11)$$

где $I_{KHЭ}$ – эффективный ток за время t_H , А;

$I_{K0Э}$ – эффективный ток за время t_{Π} , А;

$I_{K\thetaЭ}$ – эффективный ток за время θ , А;

t_H – длительность протекания тока, мин;

t_{Π} – время хода токоприемника ЭПС по расчетному УОС, мин.

На Рисунке 1.6 изображена зависимость тока в точке контактного провода около узла C_n от времени при проходе одноплатных поездов с минимальным межпоездным интервалом θ .

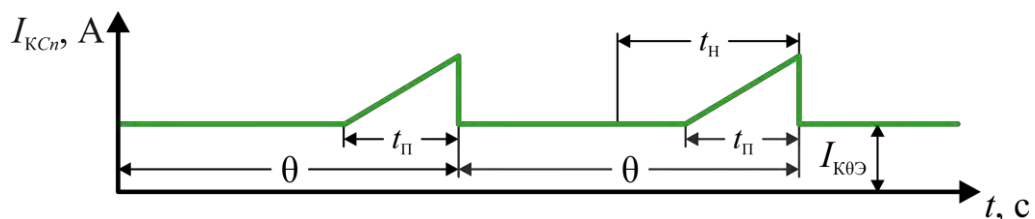


Рисунок 1.6 – Зависимость тока в расчетной точке C_n от времени при проходе одноплатных поездов с минимальным межпоездным интервалом θ

Таким образом, модель А.В. Воронина может быть использована для предварительной оценки расположения ПС на участке по условиям нагрева КП. Для учета других проводов контактной сети, помимо контактного, при проведении электро-тепловых расчетов математическая модель А.В. Воронина нуждается в доработке. Прежде всего, в расчетной схеме необходимо раздельное рассмотрение составляющих эквивалентного провода – НТ и УП, что было осуществлено К.Л. Костюченко.

Модель К.Л. Костюченко

В диссертационной работе К.Л. Костюченко [23] рассмотрена модель токо-распределения в контактной сети постоянного тока с учетом КП, НТ и УП на УОС. При прежних допущениях, что сопротивления ПС равны нулю, а ток и скорость электровоза неизменны во времени, ток в проводах контактной сети описывается уравнениями (1.12–1.17)

$$I_{\text{ЭУ}} = I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{У}} \cdot \left(1 - \frac{L}{L_{\text{ПС}}}\right); \quad (1.12)$$

$$I_{\text{ЭК}} = I_{\text{Э}} \cdot (s_{\text{У}} + s_{\text{Н}}) \cdot \left(1 - \frac{L}{L_{\text{ПС}}}\right); \quad (1.13)$$

$$I_{\text{КЛ}} = I_{\text{Э}} \cdot (s_{\text{У}} + s_{\text{Н}}) \cdot \left(1 - \frac{L}{L_{\text{ПС}}}\right) + I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{К}} \cdot \left(1 - \frac{L_{\text{Э}}}{L_{\text{ТП}}}\right); \quad (1.14)$$

$$I_{\text{КП}} = I_{\text{Э}} \cdot (s_{\text{У}} + s_{\text{Н}}) \cdot \frac{L}{L_{\text{ПС}}} + I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{К}} \cdot \frac{L_{\text{Э}}}{L_{\text{ТП}}}; \quad (1.15)$$

$$I_{\text{У}} = I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{У}} \cdot \left(\frac{L_{\text{Э}}}{L_{\text{ТП}}} - \frac{L}{L_{\text{ПС}}}\right); \quad (1.16)$$

$$I_{\text{Н}} = I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{Н}} \cdot \left(\frac{L_{\text{Э}}}{L_{\text{ТП}}} - \frac{L}{L_{\text{ПС}}}\right); \quad (1.17)$$

где L – расстояние от ЭПС до расчетного ПС, м;

$L_{\text{ПС}}$ – расстояние между соседними ПС, м;

$L_{\text{Э}}$ – удаленность рассматриваемого УОС от тяговой подстанции, находящейся слева, м;

$L_{\text{ТП}}$ – расстояние между тяговыми подстанциями, м;

$s_{\text{К}}, s_{\text{Н}}, s_{\text{У}}$ – доли сечений КП, НТ и УП в общем сечении подвески (в медном эквиваленте);

$I_{\text{Э}}$ – ток ЭПС, А;

$I_{\text{ЭУ}}$ – ток в поперечном электросоединителе от УП, А;

$I_{\text{ЭК}}$ – ток в поперечном электросоединителе от НТ и УП, А;

$I_{\text{Н}}, I_{\text{У}}$ – ток в НТ и УП, А;

$I_{\text{КЛ}}, I_{\text{КП}}$ – ток в КП слева и справа от ЭПС, А.

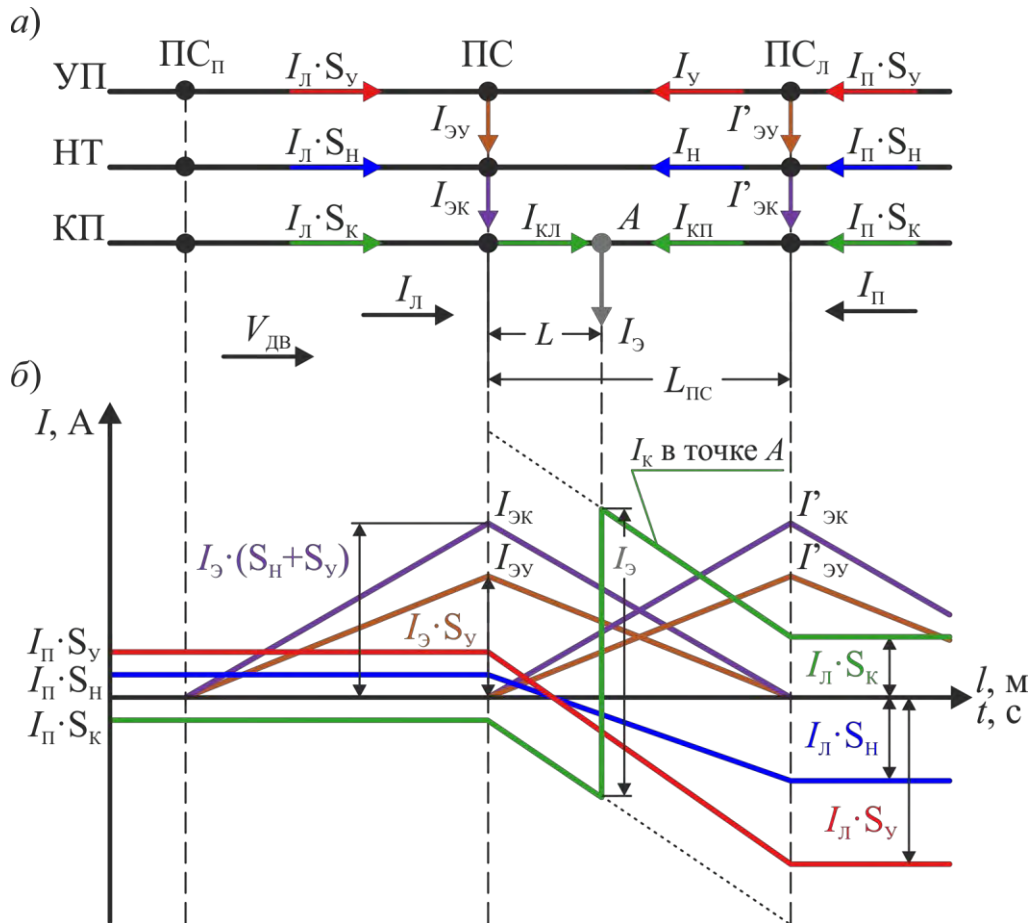
Эффективные токи $I_{\text{ЭУ}}, I_{\text{ЭК}}$ в поперечных электросоединителях от УП и НТ определяются по формулам

$$I_{\text{ЭУ}}^{\text{эфф}} = \frac{I_{\text{Э}} \cdot s_{\text{У}}}{\sqrt{3}}, \quad (1.18)$$

$$I_{\text{ЭК}}^{\text{эфф}} = \frac{I_{\text{Э}} \cdot (s_{\text{У}} + s_{\text{Н}})}{\sqrt{3}}. \quad (1.19)$$

Так как сопротивления ПС равны нулю, то ток в проводах контактной сети за пределами расчетного УОС рассчитывается согласно модели естественного токораспределения. Костюченко К.Л. отмечает, что учет сопротивлений ПС, находящихся в диапазоне 0,4–0,8 мОм, требует составления расчетной схемы, состоящей из 5 УОС. На основании того, что сопротивление звеньевых струн находится в пределах от 3 до 6 мОм, данные элементы исключены из расчета. Также в модели не учитывается изменение токораспределения, вызванное различной температурой продольных проводов.

Расчетная схема замещения контактной сети и графики тока в КП, НТ, УП и ПС при проходе токоприемника ЭПС представлены на Рисунке 1.7.



а) схема замещения контактной сети; б) графики токов в проводах контактной сети от времени или координаты ЭПС; $I_{\text{Л}}$, $I_{\text{П}}$ – ток от правой и левой тяговых подстанций, А; $V_{\text{ДВ}}$ – направление и скорость движения, м/с; ПС_П, ПС, ПС_Л – поперечные электросоединители

Рисунок 1.7 – Расчетная схема токораспределения в контактной сети постоянного тока по модели К.Л. Костюченко

В диссертации К.Л. Костюченко разработана модель нагрева проводов контактной сети на УОС. Неустановившиеся тепловые процессы рассматриваются для режимов нагрева при нахождении ЭПС на расчетном участке и нагрева транзитом тягового тока. При проходе поездов с минимальным межпоездным интервалом максимальный нагрев проводов предлагается рассчитывать по формуле

$$\vartheta = \frac{\vartheta_{\text{ПС}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ПС}}}{\tau}}\right) + \vartheta_{\text{ТР}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ПС}} - t_{\text{ДВ}}}{\tau}}\right) \cdot e^{-\frac{t_{\text{ПС}}}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_{\text{ДВ}}}{\tau}}}. \quad (1.20)$$

где $\vartheta_{\text{ПС}}$ – установившаяся температура провода при эффективном токе, возникающем при проходе ЭПС по расчетному участку, °С;

$\vartheta_{\text{ТР}}$ – установившаяся температура провода при транзитном токе, °С;

$t_{\text{ПС}}$ – время действия эффективного тока, возникающего при проходе ЭПС по расчетному участку, с;

$t_{\text{ДВ}}$ – минимальный межпоездной интервал, с;

τ – постоянная времени нагрева провода, с.

Стоит отметить, что дополнительные контуры для распределения тока между НТ и КП создают такие элементы контактной сети, как СА, РТ и струны, которые не учитываются в модели. Таким образом, согласно допущениям модели, можно сделать вывод о том, что токораспределение наиболее точно описывается для УП, так как его подключение к другим проводам контактной сети в основном происходит только через ПС, что полностью учтено в модели.

Модель с бесконечным числом струн

Для учета токопроводящих струн при расчете токораспределения между НТ и КП при участии автора разработана модель с бесконечным числом струн [102]. Согласно модели, все поперечные электрические соединения между КП и НТ учитываются в удельном поперечном сопротивлении r_c [Ом·м], которое рассчитывается по формуле

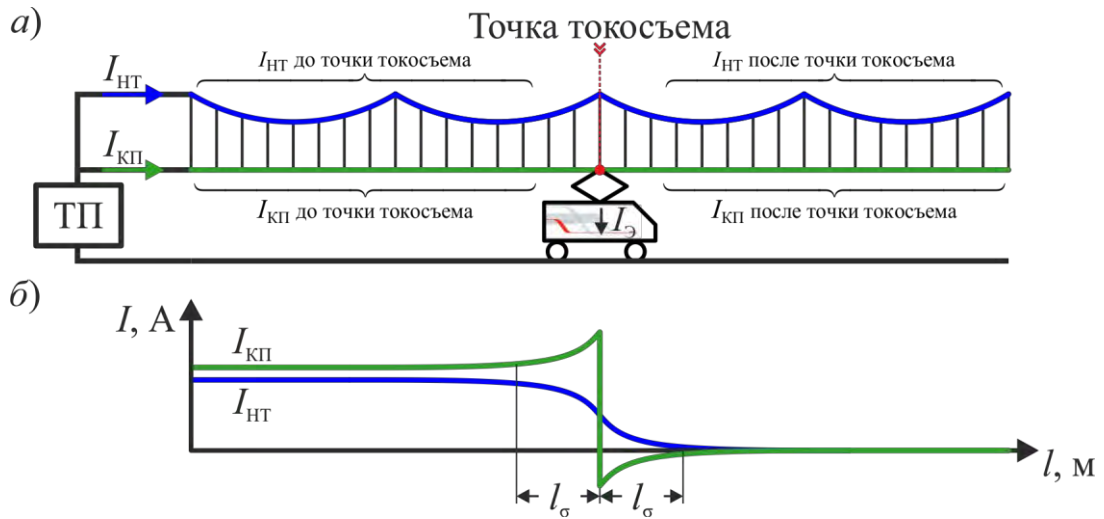
$$r_c = \frac{L}{\sum G_i \cdot n_i}, \quad (1.21)$$

где L – длина расчетного участка, м;

G_i – проводимость поперечных электропроводящих элементов на расчетном участке (струны, ПС, СА и т.п.), См;

n_i – количество однотипных поперечных электропроводящих элементов на расчетном участке (струн, ПС, СА и т.п.), шт.

На Рисунке 1.8, *a* изображена схема токораспределения при одностороннем питании контактной сети, состоящей из НТ и КП.



а) схема замещения контактной сети;
 б) графики токов в проводах контактной сети от координаты ЭПС

Рисунок 1.8 – Токораспределение в контактной сети постоянного тока по модели с бесконечным числом струн

Распределение тока в продольных проводах вдоль расчетного участка, согласно Рисунку 1.8, б, может быть описано следующим дифференциальным уравнением

$$I_{\text{НТ}}(x) \cdot r_{\text{НТ}} - (I_{\text{ЭПС}} - I_{\text{НТ}}(x)) \cdot r_{\text{КП}} = r_{\text{С}} \cdot \frac{d^2}{dx^2} I_{\text{НТ}}(x), \quad (1.22)$$

где $I_{\text{НТ}}(x)$ – функция тока в НТ от координаты, м;

$I_{\text{ЭПС}}$ – ток ЭПС, А;

$r_{\text{НТ}}$ – погонное электрическое сопротивление НТ, Ом/м;

$r_{\text{КП}}$ – погонное электрическое сопротивление КП, Ом/м.

Решение уравнения (1.22) позволяет получить зависимость тока от координаты в продольных проводах контактной сети при токосъеме. Таким образом, если координату токоприемника принять за ноль¹, то ток в НТ будет описываться следующей системой уравнений

¹ При этом отрицательные значения координаты соответствуют участку контактной сети до точки токосъема, а положительные – после точки токосъема.

$$I_{\text{НТ}}(x) = \begin{cases} \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot e^{-x \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}}{r_{\text{С}}}}} \right) & \text{при } x \leq 0; \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}} \cdot e^{x \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}}{r_{\text{С}}}}} & \text{при } x > 0, \end{cases} \quad (1.23)$$

где x – расстояние от точки токосъема, м.

Система уравнений, описывающая ток в КП, основана на системе уравнений (1.23) и выглядит следующим образом

$$I_{\text{КП}}(x) = \begin{cases} I_{\text{ЭПС}} \cdot \left[1 - \frac{r_{\text{КП}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot e^{-x \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}}{r_{\text{С}}}}} \right) \right] & \text{при } x \leq 0; \\ -\frac{1}{2} \cdot \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}} \cdot e^{x \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}}{r_{\text{С}}}}} & \text{при } x > 0. \end{cases} \quad (1.24)$$

Как видно из уравнений (1.23) и (1.24), форма тока в проводах в зависимости от координаты описывается экспоненциальной кривой. Согласно правилу трех сигм [103], практически все значения экспоненты лежат в интервале 3σ . Данный интервал будет являться зоной стягивания тягового тока l_{σ} , в которой происходит основное стекание тягового тока из НТ в КП. Зона стягивания определяется соотношением погонных продольных сопротивлений $r_{\text{НТ}}$ и $r_{\text{КП}}$ и удельного поперечного сопротивления $r_{\text{С}}$ по следующей формуле

$$l_{\sigma} = \frac{3}{\sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}}{r_{\text{С}}}}}. \quad (1.25)$$

Из формулы видно, что снижение зоны стягивания возможно за счет увеличения проводимости поперечных проводов. Таким образом, снижение токовой нагрузки на КП в зоне токосъема может быть осуществлено путем повышения сечения продольных проводов и частоты их установки.

Функция зависимости тока в точке контактного провода от времени, необходимая для определения эффективного тока в зоне стягивания, описывается следующей системой уравнений

$$I_{\text{КП}}(t) = \begin{cases} I_{\text{ЭПС}} - \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot e^{(t \cdot v - x) \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}}{r_c}}} \right), & (t \cdot v - x) \leq 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{\text{КП}} \cdot I_{\text{ЭПС}}}{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}} \cdot e^{(t \cdot v - x) \cdot \sqrt{\frac{r_{\text{КП}} + r_{\text{НТ}}}{r_c}}}, & (t \cdot v - x) > 0 \end{cases}, \quad (1.26)$$

где t – время движения ЭПС по рассчитываемому участку, с;

v – скорость движения ЭПС, м/с;

x – координата точки контактного провода на участке, м.

Анализ токовой характеристики электровоза позволяет выбрать значения тока $I_{\text{ЭПС}}$ и скорости v согласно критерию наибольшего тепловыделения по формуле

$$k_{\text{Э}} = \max \left(\frac{I_{\text{ЭПС}}^2(v)}{v} \right). \quad (1.27)$$

Подставляя значения, полученные по формуле (1.27), в формулу (1.26) можно путем численного интегрирования определить эффективное значение тока контактного провода в зоне стягивания по формуле

$$I_{\text{ЭФФ}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_{\text{ЭФФ}}} I_{\text{КП}}^2(t) dt}{t_{\text{ЭФФ}}}}, \quad (1.28)$$

где $t_{\text{ЭФФ}}$ – время движения ЭПС по зоне стягивания, с.

Расчет температуры перегрева контактного провода в зоне токосъема над температурой окружающей среды производится по формуле, основанной на нестационарном уравнении теплового баланса

$$\vartheta_t = \vartheta_{уст} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \vartheta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1.29)$$

где t – время действия тока $I_{эфф}$, с;

τ – постоянная времени нагрева провода, с.

$\vartheta_{уст}$ – установившаяся температура при токе $I_{эфф}$, °С;

ϑ_0 – начальная температура контактного провода, °С.

Модель с бесконечным числом струн позволяет учитывать допустимость применения того или иного материала контактного провода в зависимости от поперечной проводимости контактной подвески, снимаемого тока и скорости движения ЭПС. Соотношение между характеристиками материала контактного провода и параметрами железнодорожной линии, основанное на базе нестационарного уравнения теплового баланса без учета охлаждения провода, выглядит следующим образом

$$\frac{\rho_T}{c \cdot \rho} \leq \frac{\vartheta \cdot S_{кп}^2}{t_{эфф} \cdot I_{эфф}^2}, \quad (1.30)$$

где ρ_T – удельное сопротивление провода при максимальной допустимой температуре, Ом·м²/м;

ϑ – температура перегрева материала над максимальной допустимой, °С;

c – теплоемкость материала контактного провода, Вт·с/(К·кг);

ρ – плотность материала контактного провода, кг/м³;

$S_{кп}$ – площадь поперечного сечения контактного провода, м²;

$I_{эфф}$ – эффективный ток при токосъеме, А.

Таким образом, модель с бесконечным числом струн описывает ток в НТ и КП в зависимости от координаты токосъема и позволяет оценить зону стягивания тягового тока с учетом струн, ПС, а также нагрев КП вблизи точки токосъема. На основании данной модели построена методика предварительной оценки допустимости применения материала КП в зависимости от параметров железнодорожной линии [101]. Модель показывает ток, суммарно стекающий через такие элементы,

как струны, СА, ПС, и не предназначена для расчета доли тока в отдельных поперечных проводках. Кроме того, в модели не учтен УП, а расширение расчетных возможностей в эту сторону повлечет за собой существенное усложнение аналитических расчетных формул. Поэтому следующим этапом в развитии методики электротеплового расчета контактной сети постоянного тока являются численные методы решения систем алгебраических уравнений, описывающих схему соединения проводов.

Модель токораспределения «UKS-Current»

Программная реализация расчета токораспределения в проводках контактной сети постоянного тока UKS-Current, разработанная в АО «Универсал – Контактные сети» Е.В. Кудряшовым [87], основана на методе непосредственного применения правил Кирхгофа к электрической цепи. Исходными данными для модели является топологическая геометрия проводов контактной сети, погонное сопротивление и предельно допустимый длительный ток для каждого типа проводов.

Расчет топологически сложной электрической цепи подробно рассматривается в [104]. Так, в данном случае топология контактной сети представляется в виде направленного графа электрической схемы, в которой ветвями графа выступают отдельные участки проводов, а узлами – точки соединения проводов. Узловая матрица A содержит в себе информацию о топологии графа, в которой столбцы соответствуют ветвям графа, а строки – узлам. Элементы матрицы A показывают связь между ветвями и узлами графа с учетом условно-положительного направления тока в ветвях. Если узел j и ветвь i связаны между собой и стрелка ветви графа (условно-положительное направление тока) направлена к узлу, то элемент матрицы a_{ij} принимает значение, равное минус 1. Если узел j и ветвь i связаны между собой и стрелка ветви графа направлена от узла, то элемент матрицы a_{ij} принимает значение, равное плюс 1. Если узел j и ветвь i не связаны между собой, то значение элемента матрицы a_{ij} равно нулю. Учет базисного узла делает матрицу соединений неопределенной, поэтому матрица A имеет размер $N_B \times (N_U - 1)$, где N_B – количество ветвей, N_U – количество узлов.

$$\begin{array}{c}
 \text{Номера ветвей } (i = 1 \dots N_B) \\
 1 \quad 2 \quad \dots \quad N_B \\
 \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} \begin{array}{c} 1 \\ \vdots \\ N_y - 1 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Номера узлов} \\ (j = 1 \dots N_y - 1). \end{array}
 \end{array} \quad (1.31)$$

Сопротивления ветвей зависят от длины участков и удельного сопротивления проводов и задаются диагональной матрицей \mathbf{Z} с размером, соответствующим числу ветвей N_B . Схема замещения контактной сети постоянного тока не содержит в ветвях источников ЭДС, поэтому при решении вектор \mathbf{E} , как правило, задается нулевым.

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_i \end{bmatrix} \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ i \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Номера ветвей} \\ (i = 1 \dots N_B). \end{array} \quad (1.32)$$

При расчете токораспределения ток ЭПС на схеме замещения электрической цепи представляется источником тока, значение которого определяется исходя из токонесущей способности контактной сети для режима транзита или на основании тяговых расчетов для режима токосъема. Ток ЭПС учитывается при задании вектора узловых токов \mathbf{J}_y .

$$\mathbf{J}_y = \begin{bmatrix} J_1 \\ \vdots \\ J_j \end{bmatrix} \begin{array}{c} 1 \\ \vdots \\ j \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Номера узлов} \\ (j = 1 \dots N_y - 1). \end{array} \quad (1.33)$$

Запись первого правила Кирхгофа в матричном виде выглядит следующим образом

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{J}_y. \quad (1.34)$$

Запись уравнений по второму правилу Кирхгофа происходит на основании матрицы контуров C , строки которой соответствуют связям графа цепи (образующих независимые контуры), а столбцы – ветвям графа. По свойству дерева графа, количество независимых контуров определяется числом связей в каждом связном графе схемы

$$N_K = N_B - N_V + 1. \quad (1.35)$$

Если контур k содержит ветвь i и направление обхода контура совпадает с условно-положительным направлением тока ветви, то элемент матрицы s_{ik} принимает значение, равное плюс 1. Если контур k содержит ветвь i и направление обхода контура противоположно направлено с условно-положительным направлением тока ветви, то элемент матрицы s_{ik} принимает значение, равное минус 1. Если контур k не содержит ветвь i , то значение элемента матрицы s_{ik} равно нулю.

$$\begin{array}{c}
 \text{Номера ветвей } (i = 1 \dots N_B) \\
 \begin{array}{cccc}
 1 & 2 & \dots & i
 \end{array} \\
 \mathbf{C} = \begin{bmatrix}
 s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1i} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 s_{1k} & s_{2k} & \dots & s_{ik}
 \end{bmatrix} \begin{array}{l}
 1 \\
 \vdots \\
 k
 \end{array} \quad \begin{array}{l}
 \text{Номера контуров} \\
 (k = 1 \dots N_K).
 \end{array}
 \end{array} \quad (1.36)$$

При составлении матрицы C для выделения дерева графа используется метод DFS (метод поиска в глубину), а для выделения независимых контуров – метод BFS (метод поиска в ширину) [105; 106].

Запись второго правила Кирхгофа в матричном виде выглядит следующим образом

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{E}. \quad (1.37)$$

В результате решения уравнений, определяются векторы: неизвестных токов в ветвях \mathbf{I} ; неизвестных напряжений на элементах \mathbf{V} ; узловых потенциалов Φ относительно базового узла.

Совместная запись уравнений по первому и второму правилу Кирхгофа выглядит следующим образом

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{Z} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_y \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{E} \end{bmatrix}. \quad (1.38)$$

В результате решения уравнения (1.38) определяется искомый вектор токов в ветвях \mathbf{I} .

Определение векторов напряжения на элементах \mathbf{V} и узловых потенциалов $\boldsymbol{\varphi}$ происходит в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{E}; \\ \mathbf{A}^T \cdot \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{V}, \end{cases} \quad (1.39)$$

где \mathbf{A}^T – транспонированная матрица \mathbf{A} .

Программная реализация модели UKS-Current выполнена на языке программирования Fortran с применением библиотек для решения СЛАУ. Визуализация решения расчета токораспределения происходит посредством САПР AutoCAD с помощью языка программирования AutoLISP.

Уточнение нагрузочной способности контактной подвески происходит на основании анализа расчетных коэффициентов перегрузки

$$K_{\text{ПЕР}j} = \frac{I_{\text{В}j}}{I_{\text{ДОП}j}}, \quad (1.40)$$

где $I_{\text{В}j}$ – ток j -й ветви при заданной нагрузке $I_{\text{Э}}$ контактной сети, А;

$I_{\text{ДОП}j}$ – длительно допустимый ток этой ветви, А.

Модель токораспределения КОНТ-3

Решение по определению нагрузочной способности контактной сети постоянного тока, разработанное в ОАО «ВНИИЖТ» В.Е. Марским [25], представляет собой программное обеспечение КОНТ-3.

Принципы расчета токораспределения, используемые в модели КОНТ-3, аналогичны модели UKS-Current и основаны на составлении уравнений согласно первому и второму правилу Кирхгофа. Программа имеет собственный графический интерфейс. Формирование топологии контактной сети происходит внутренними средствами программы и имеет детерминированную структуру продольных и соединительных проводов. Такое решение предназначено для автоматического формирования системы линейных алгебраических уравнений без применения алгоритмов анализа геометрии с целью поиска независимых контуров.

Все провода представлены прямыми линиями. Взаимное расположение продольных проводов в пространстве автоматически определяет длину поперечных соединительных элементов по заданным координатам присоединения с возможностью ручного задания длины. Значения переходных сопротивлений зажимов струн, электрических соединителей, средней анкеровки и рессорного троса учитываются в схеме замещения последовательным включением в состав соответствующей электрической ветви.

Основными исходными данными для расчета являются параметры проводов, которые включают в себя:

- Марку и сечение провода;
- $R_{\text{ПР}}$ – электрическое сопротивление при 20 °С, Ом/км;
- Рад – радиус, см;
- $I_{\text{ДОП}}$ – номинальный (длительно допустимый) ток, А;
- $T_{\text{ДЛ}}$ – длительно допустимую температуру нагрева, °С.

Уточнение нагрузочной способности контактной сети происходит при сравнении нагрузочных коэффициентов участков проводов $K_{\text{Нj}}$, полученных в результате расчета токораспределения, со значением предельно допустимого длительного тока подвески $I_{\text{ΣКС}}$, рассчитанного по естественной модели токораспределения, на основании параметров продольных проводов, таких как НТ, КП и УП.

$$K_{\text{Нj}} = (I_{\text{ΣКС}} / I_{\text{Э}}) \cdot (I_{\text{Вj}} / I_{\text{ДОПj}}). \quad (1.41)$$

Фактический ток подвески $I_{\Sigma КС \text{ ФАКТ}}$ определяется максимальным нагрузочным коэффициентом на расчетном участке

$$I_{\Sigma КС \text{ ФАКТ}} = \frac{I_{\Sigma КС}}{K_{Н \text{ МАХ}}}. \quad (1.42)$$

Фактическое удельное сопротивление контактной сети с учетом топологии соединения проводов от шин подстанции до точки приложения нагрузки ЭПС определяется по формуле

$$R_{\Sigma КС \text{ ФАКТ}} = \frac{\Delta U}{I_{\text{Э}} \cdot x_{\text{Э}}}, \quad (1.43)$$

где ΔU – падение напряжения до точки подключения заданной нагрузки, В;

$x_{\text{Э}}$ – координата точки приложения нагрузки ЭПС, м.

Конечно-элементная модель токораспределения и нагрева проводов

Применение метода конечных элементов, зарекомендовавшего себя при механических расчетах контактной сети [24; 107; 108], было осуществлено для электротеплового расчета в работе [32]. В модели провода представляются линейными объектами. Искомая функция электрического потенциала $V = V(t, x)$ вдоль длины участков проводов определяется из решения уравнений (1.44) и (1.45), основанных на уравнении непрерывности электрического тока

$$\frac{1}{r_{\text{ПГ}}} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0; \quad (1.44)$$

$$\frac{1}{r_{\text{ПГ}}} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = I_{\text{ПР}}, \quad (1.45)$$

где $r_{\text{ПГ}}$ – погонное сопротивление провода, Ом/м.

$I_{\text{ПР}}$ – ток в проводе, А.

Искомая функция температуры $T = T(t, x)$ определяется из решения нестационарного уравнения теплового баланса

$$c \cdot m_{\text{ПГ}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k \cdot S \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = q_R^{\text{ПГ}} + q_{SH}^{\text{ПГ}} - q_N^{\text{ПГ}} - q_{ST}^{\text{ПГ}}, \quad (1.46)$$

где c – теплоемкость материала провода, Дж/(кг·К);

$m_{\text{ПГ}}$ – погонная масса провода, кг/м;

k – теплопроводность материала провода, Вт/(м·К);

$q_R^{\text{ПГ}}$ – резистивный поток тепла, Вт/м;

$q_{SH}^{\text{ПГ}}$ – поток тепла от солнечной радиации, Вт/м;

$q_N^{\text{ПГ}}$ – поток тепла от конвективной теплопередачи, Вт/м;

$q_{ST}^{\text{ПГ}}$ – поток тепла от теплопередачи лучеиспусканием, Вт/м.

Данная модель также позволяет производить расчет токораспределения для произвольной топологии контактной сети. В модели реализуется взаимосвязанный расчет токораспределения и нагрева проводов контактной сети.

Данная модель не учитывает арматуру контактной сети. Поддерживающие и крепежные элементы, зажимы контактной сети представляют собой объекты сосредоточенной массы, что влияет на температуру проводов вблизи данных элементов. Переходное сопротивление токоведущих зажимов контактной сети влияет на процесс токораспределения, а также выступает повышенным источником тепла при ослабевании затяжки болтов или появлении оксидных пленок в электрическом контакте.

В модели не учтен неравномерный по длине износ КП, а также теплообмен КП с токосъемными пластинами.

Все вышеназванные допущения учтены в усовершенствованной конечно-элементной модели, описанной в главе 2.

1.5 Сравнительный анализ электротепловых расчетов по различным математическим моделям

Разработка критериев выбора расчетной модели позволит определить наиболее подходящую модель токораспределения для применения на той или иной стадии жизненного цикла контактной сети. Анализ расчетных возможностей существующих моделей позволит выдвинуть требования для усовершенствованной модели электротепловых расчетов.

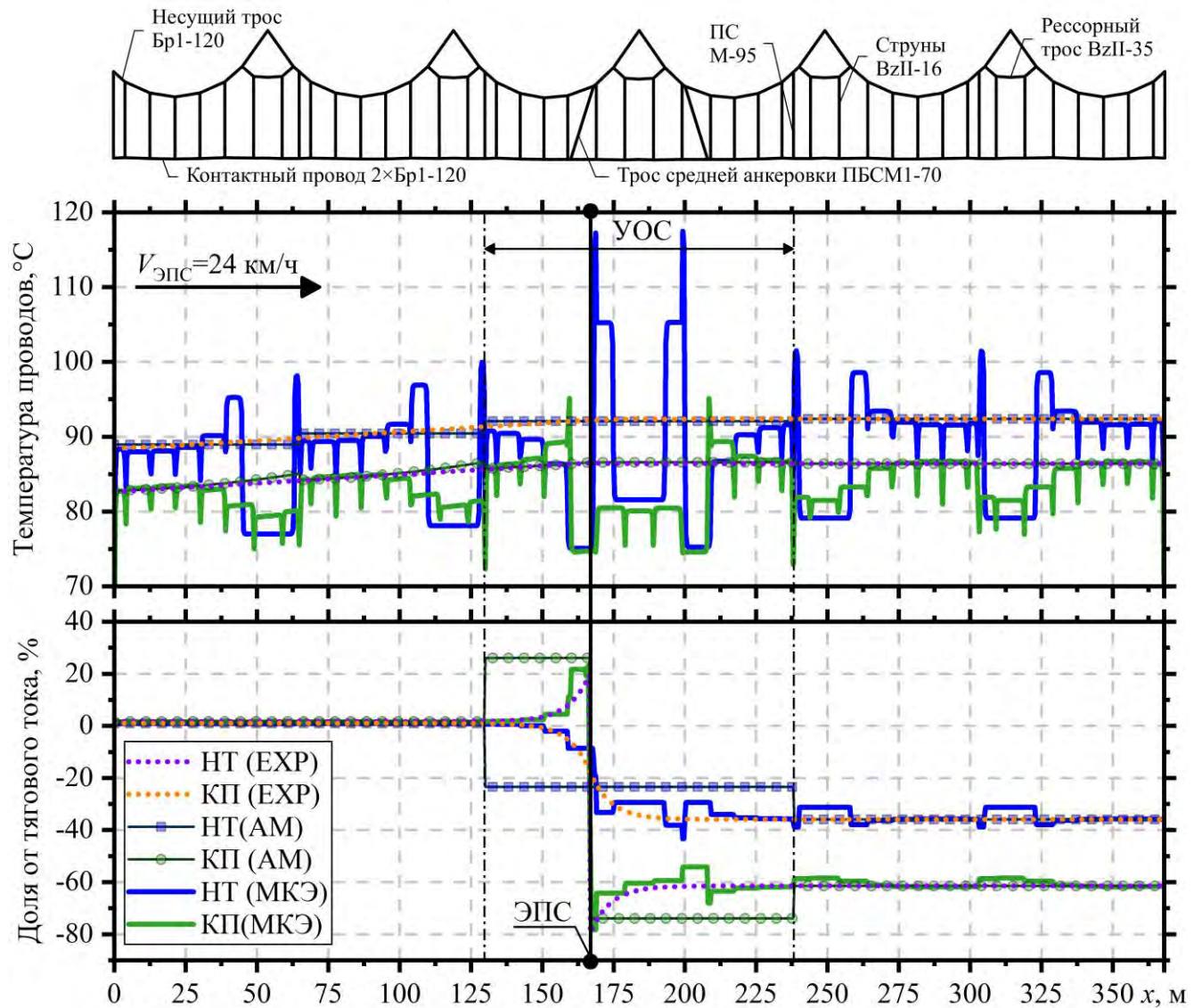
Сравнение производится для аналитических (естественной модели, модели с бесконечным числом струн, модели А.В. Воронина) и топологических моделей (КОНТ-3, UKS-Current, конечно-элементная модель). В качестве базовой выбрана конечно-элементная модель. В статье [109] представлены основные результаты сравнения моделей токораспределения.

Для сравнения моделей токораспределения выбрана контактная подвеска КС-250-3, состоящая из проводов Бр1-120 + 2Бр1Ф-120 + 2М-120. Струны выполнены токопроводящими из провода VzII-16, рессорные тросы – VzII-35, поперечные электросоединители – М-95, трос средней анкеровки выполнен из провода ПБСМ1-70.

Расчет температуры проводов для всех моделей токораспределения производился путем численного решения уравнения (1.46) при следующих условиях: температура окружающего воздуха – плюс 40 °С; скорость ветра – 1 м/с; поток солнечной радиации – 900 Вт/м². Проход ЭПС происходит после предварительного нагрева расчетного участка длительно допустимым транзитным током. Расчетный участок контактной сети имеет двухстороннее питание, но располагается в непосредственной близости к подстанции, расположенной справа. Расчетная скорость движения ЭПС равна 24 км/ч.

На Рисунке 1.9 представлены зависимости тока и температуры проводов для конечно-элементной модели (МКЭ), модели с бесконечным числом струн (ЕХР) и аналитической модели А.В. Воронина (АМ). Так как модель с бесконечным числом струн не учитывает токораспределение в контактных подвесках с УП, то сравнение

происходит на контактной подвеске, состоящей из НТ и КП. Из рисунка видно, что за пределами УОС токораспределение по аналитической модели А.В. Воронина и модели с бесконечным числом струн совпадает с естественным токораспределением, а для конечно-элементной модели характерно отклонение в зоне крепления РТ и троса СА.



EXP – модель с бесконечным числом струн; AM – модель А.В. Воронина; МКЭ – конечно-элементная модель

Рисунок 1.9 – Сравнение температуры и тока в проводах контактной сети при проходе ЭПС с током 1540 А со скоростью 24 км/ч через 25 с после начала движения по расчетному участку

Из Рисунка 1.9 видно, что ограничивающим по температуре проводом является НТ (120 °С) на участке между креплением троса СА и креплением РТ. По результатам расчетов длительно допустимый ток для данной подвески равен 1540 А.

В Таблице 1.1 представлены отклонения доли тока в проводах контактной сети на различных участках продольных проводов. При сравнении с естественной моделью учитывалось наибольшее отклонение вблизи крепления РТ, СА, ПС и струн. Так, РТ шунтирует участок НТ, тем самым снижая токовую нагрузку на этом участке на 14,9 %. Однако, увеличенное сечение участка НТ вызывает втекание в НТ части тока из КП по ближайшим к РТ струнам, снижая тем самым ток в КП на 3,3 % и повышая на 5,1 % ток в НТ. На отклонения тока вблизи СА и ПС также оказывает влияние рессорный узел, что вызывает суммирование эффектов перераспределения тока вблизи данных элементов. На УОС производилась усредненная оценка относительного отклонения тока. Из Рисунка 1.9 видно, что ток в НТ, рассчитанный по модели А.В. Воронина, имеет постоянное значение на всем УОС, в то время как модель с бесконечным числом струн описывает кривую тока, качественно совпадающую с расчетом по конечно-элементной модели, в том числе и для КП. Таким образом, модель с бесконечным числом струн описывает зависимость тока в продольных проводах в среднем в 3,8 раза точнее модели А.В. Воронина, относительно базовой МКЭ модели.

Таблица 1.1 – Отклонение доли тока от МКЭ модели

Провод	Отклонение доли тока					
	Естественная модель				Модель с ∞ числом струн УОС, avr(%) ¹	Модель А.В. Воронина УОС, avr(%)
	РТ, %	СА, %	СТР, %	ПС, %		
НТ	-14,9	18,2	5,1	7,3	15,2	-62,6
КП	-5,4	9,1	-3,3	-4,9	9,6	33,2

Для контактной подвески с УП сравнение производилось с моделью К.Л. Костюченко. На Рисунке 1.10 представлены зависимости тока и температуры

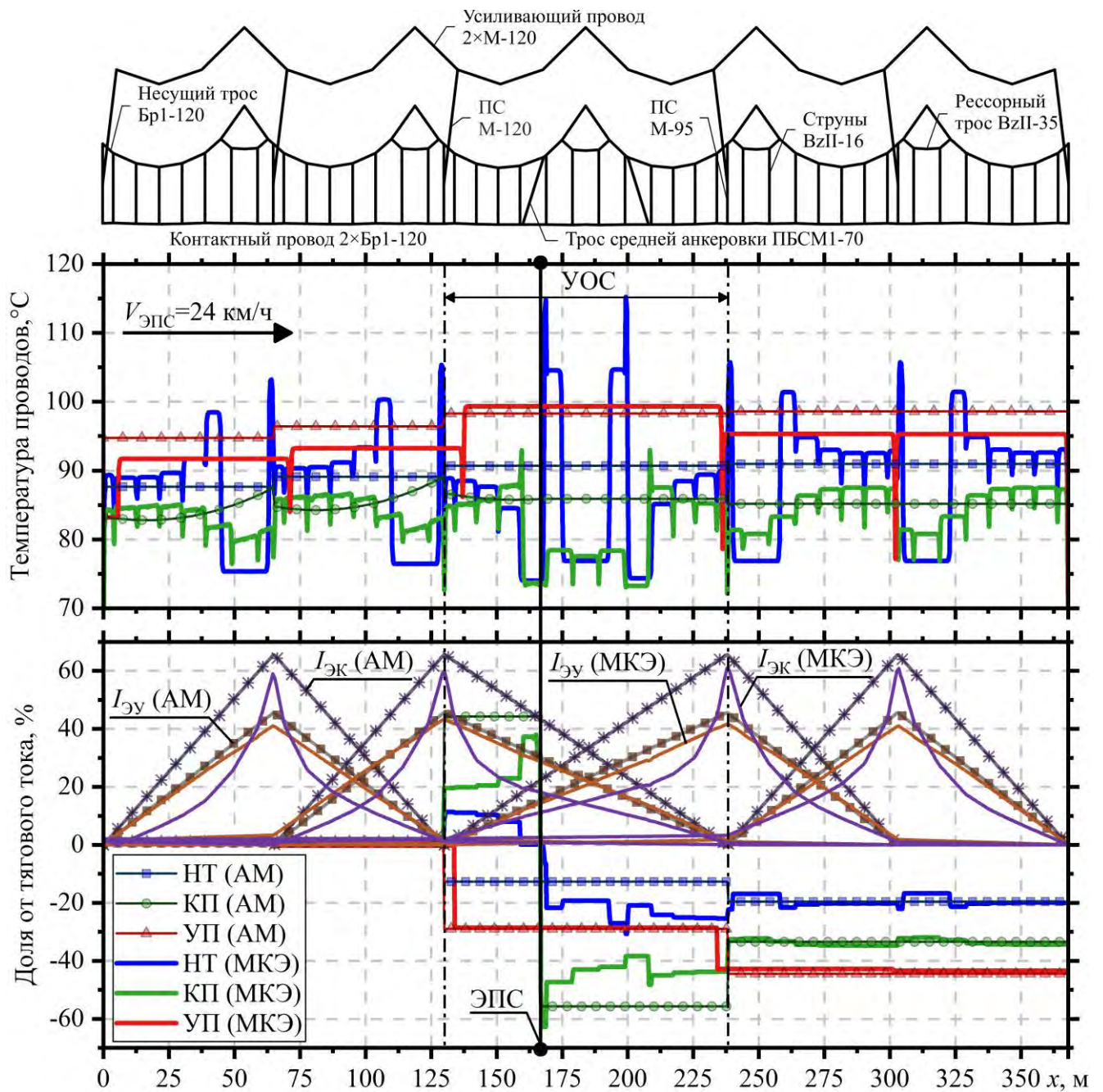
¹ Здесь avr(%) – усредненное значение отклонения тока.

проводов для модели МКЭ и модели К.Л. Костюченко. Подключение ПС к УП незначительно изменяет перераспределения тока вблизи других элементов контактной сети (РТ, СА, ПС). Также изменение перераспределения тока происходит из-за снижения температуры КП и НТ вследствие изменения ограничивающего провода. Из Рисунка 1.10 видно, что ограничивающим по температуре проводом является УП (100 °С) в середине анкерного участка. Длительно допустимый ток для данной подвески равен 2798 А.

На Рисунках 1.9 и 1.10 виден пик температуры НТ на участке между креплением СА и ближайшей в сторону РТ струной. Согласно [110], данное расстояние равняется 0,25 м. Как показывают экспериментальные исследования, приведенные в главе 3, а также, согласно [76], можно сделать вывод о том, что токоведущая и поддерживающая арматура оказывает влияние на температуру продольных проводов на расстоянии порядка 1–1,5 м. Таким образом, при учете арматуры в методике электротеплового расчета контактной сети постоянного тока следует ожидать существенное снижение температуры на этом участке. Также пик температуры НТ присутствует на участке между креплениями РТ и ПС, расстояние которого, согласно [110], составляет 0,5 м. На данном участке также следует ожидать соответствующее влияние соединительных зажимов на температуру НТ и РТ.

Сглаживание температурных пиков на КП следует ожидать на участке между креплением троса СА и креплением ближайшей к нему струны. Данное расстояние, согласно [110], также составляет 0,5 м.

Температура проводов вблизи мест крепления арматуры определяются теплообменом с телом соответствующего зажима и охлаждением его поверхности, в то время как в статье [109] контактное соединение не учитывается, а между проводами происходит чисто кондуктивный теплообмен, что не соответствует реальному физическому процессу, происходящему в местах установки арматуры контактной сети.



AM – модель К.Л. Костюченко; МКЭ – конечно-элементная модель; значения токов $I_{ЭК}$ и $I_{ЭУ}$ указаны за все время движения ЭПС по расчетному участку

Рисунок 1.10 – Сравнение температуры и тока в проводах контактной сети при проходе ЭПС с током 2798 А со скоростью 24 км/ч через 25 с после начала движения по расчетному участку

В Таблице 1.2 представлены отклонения доли тока в проводах контактной сети на различных участках продольных проводов и ПС.

Таблица 1.2 – Отклонение доли тока в различных участках контактной сети по результатам расчета токораспределения

Провод	Отклонение доли тока				
	Естественная модель (режим транзита)				Модель К.Л. Костюченко (режим токосъема)
	РТ, %	СА, %	СТР, %	ПС, %	УОС, avr(%)
НТ	-16,8	18,3	8,3	11,2	-60,1
КП	-4,9	8,2	-2	-4,3	39,8
УП	0	0	0	3,5	-4,8
ПС (УП-НТ)	–	–	–	–	-7,4
ПС (НТ-КП)	–	–	–	–	-70,3

На Рисунке 1.11 представлен результат расчета токораспределения по методике КОИТ-3.

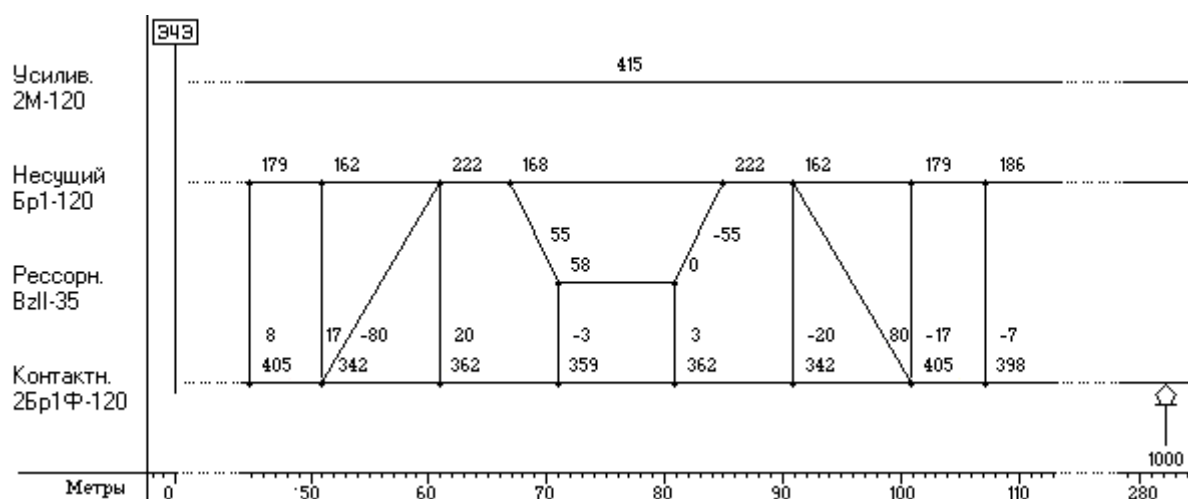


Рисунок 1.11 – Токораспределение участка контактной сети в зоне СА в программе КОИТ-3

Из рисунка видно, что учитывается топология контактной сети, но при этом упрощена ее геометрия из-за особенности составления расчетных уравнений.

На Рисунке 1.12 представлены результаты расчета токораспределения по модели UKS-Current и МКЭ модели для участка контактной сети вблизи троса СА. Незначительные отличия результатов расчета вызваны различными методиками построения расчетной геометрии, а также учетом нелинейных свойств материалов в МКЭ модели.

В Таблице 1.3 представлено сравнение доли тока в проводах контактной сети по результатам расчета топологических моделей.

Таблица 1.3 – Доля тока на участках проводов контактной сети по результатам расчета токораспределения топологическими моделями

Объект контактной сети	Программный комплекс								
	COMSOL Multiphysics			UKS-Current			КОНТ-3		
	Доля Iэлс, %	Отклон. от UKS-Current, %	Отклон. от КОНТ-3, %	Доля Iэлс, %	Отклон. от COMSOL, %	Отклон. от КОНТ-3, %	Доля Iэлс, %	Отклон. от COMSOL, %	Отклон. от UKS-Current, %
КП	40,3	-0,25	0,49	40,2	0,25	0,74	40,5	-0,5	-0,75
	34,3	0,29	-0,29	34,4	-0,29	-0,58	34,2	0,29	0,58
	36,5	0,54	-0,83	36,7	-0,55	-1,38	36,2	0,82	1,36
НТ	18,1	-1,69	-1,12	17,8	1,66	0,56	17,9	1,10	-0,56
	16,2	-1,89	0,00	15,9	1,85	1,85	16,2	0,00	-1,89
	21,9	-2,34	1,35	21,4	2,28	3,60	22,2	-1,37	-3,74
	17,8	-1,14	-5,95	17,6	1,12	-4,76	16,8	5,62	4,55
УП	41,6	-0,95	-0,24	42,0	-0,96	-1,20	41,5	0,24	-1,19
РТ	4,0	-8,11	27,3	3,7	7,50	32,7	5,5	-37,5	-48,7
	4,0	-5,26	31,3	3,8	5,00	34,5	5,8	-45,0	-52,6
СА	8	3,9	0	7,7	3,75	3,75	8,0	0	-3,90
Струны	1,9	0,00	-11,8	1,9	0,00	-11,8	1,7	10,5	10,5
	2,2	4,35	-10,0	2,3	-4,55	-15,0	2,0	9,09	13,1

Каждая из моделей имеет ряд допущений и расчетных особенностей, которые приводят к отклонениям в результатах расчета. Так, при расчете по модели UKS-Current использована геометрия контактной сети, импортированная из специализированной программы UKS-FEM 3D, а характеристики проводов взяты из соответствующей нормативно-технической документации [76–78].

При расчете по модели КОНТ-3 использована упрощенная геометрия контактной сети, построенная внутренними возможностями программы, с сохранением соответствующей топологии. Характеристики проводов также взяты из нормативно-технической документации на провода.

При расчете по МКЭ модели использована параметризованная геометрия контактной сети, построенная внутренними возможностями программы COMSOL

Multiphysics. При этом характеристик проводов, представленных в нормативно-технической документации, недостаточно, поэтому использованы свойства материалов, из которых изготовлены провода контактной сети, с зависимостями от температуры.

Из Таблицы 1.3 видно, что наибольшее отклонение в модели КОИТ-3 наблюдается для участков РТ, что объясняется упрощенной геометрией рессорного узла. Среднее отклонение для остальных продольных проводов составляет менее 2 %, что свидетельствует о корректной работе вычислительных алгоритмов моделей.

В Таблице 1.4 представлено сравнение расчетных возможностей рассмотренных моделей, а также модернизированной МКЭ модели, устраняющей допущения существующей МКЭ модели. Модернизированная МКЭ модель учитывает нагрев КП от токосъемных пластин, неравномерный по длине износ КП, токоведущие зажимы и их переходное сопротивление, а также арматуру контактной сети, участвующую в теплообмене с проводами контактной сети.

С добавлением новых расчетных возможностей, как правило, значительно растут требуемые вычислительные ресурсы. Так, в случае расчета по естественной модели токораспределения количество неизвестных токов равно количеству продольных проводов. Расчет по модели А.В. Воронина со значительными упрощениями позволяет рассчитать ток в ПС и КП при токосъеме на УОС. Модель К.Л. Костюченко позволяет рассчитать УОС с изолированными струнами для контактных подвесок с УП по шести аналитическим уравнениям. Модель с бесконечным числом струн описывает токораспределение в КП и НТ системой из четырех уравнений, но при этом требует расчета поперечного сопротивления r_c и численного интегрирования при расчете эффективного значения тока в КП при токосъеме. В топологических моделях КОИТ-3 и UKS-Current неизвестными являются значения токов в ветвях топологической схемы контактной сети. В конечно-элементных моделях число неизвестных определяется количеством конечных элементов. При этом, помимо тока, неизвестными являются значения температуры проводов, а в случае модернизированной МКЭ модели – тока и температуры зажимов, а также температуры токосъемных пластин.

Таблица 1.4 – Сравнение расчетных возможностей моделей расчета токораспределения в контактной сети постоянного тока

Расчетные возможности		№ модели расчета								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
		Естественная модель	Модель А.В. Воронина	Модель К.Л. Костюченко	Модель с ∞ числом струн	Модель в КОНТ-3	Модель в UKS-Current	Модель МКЭ	Модель МКЭ модерн.	
1	Поперечные провода	СТР	–	–	–	✓	✓	✓	✓	✓
2		ПС	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	Продольные провода	НТ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4		КП	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5		УП	✓	–	✓	–	✓	✓	✓	✓
6		РТ	–	–	–	–	✓	✓	✓	✓
7	Мгновенное положение ЭПС		–	–	–	–	✓	✓	✓	✓
8	Местный износ контактного провода		–	–	–	–	✓	✓	✓	✓
9	Топология контактной сети		–	–	–	–	✓	✓	✓	✓
10	Сопротивление зажимов		–	–	–	–	✓	–	–	✓
11	Импорт произвольной геометрии контактной сети из CAD		–	–	–	–	–	✓	✓	✓
12	Расчет температуры проводов		–	–	–	–	–	–	✓	✓
13	Температурный коэффициент электрического сопротивления		–	–	–	–	–	–	✓	✓
14	Движение ЭПС		–	–	–	–	–	–	✓	✓
15	Арматура контактной сети		–	–	–	–	–	–	–	✓
16	Неравномерный по длине износ контактного провода		–	–	–	–	–	–	–	✓
17	Нагрев контактного провода токосъемными пластинами		–	–	–	–	–	–	–	✓
Итого			3	3	4	4	10	10	13	17
Количество переменных, подлежащих определению										
		1	2	3	4	5	6	7	8	
		№ модели расчета								

В Таблице 1.5 представлены области применения моделей токораспределения в порядке сложности выполнения расчетов.

Таблица 1.5 – Области применения расчетных моделей

Расчетная модель	Область применения
Естественная модель	Предварительная оценка доли тока в продольных проводах контактной сети. Предварительная оценка токонесущей способности контактной сети.
Модель А.В. Воронина	Предварительная оценка токовой нагрузки на контактный провод вблизи мест установки поперечных электросоединителей. Предварительный выбор расположения поперечных электросоединителей.
Модель К.Л. Костюченко	Расчет токораспределения на участке, ограниченном двумя соседними поперечными электросоединителями для контактной сети постоянного тока с изолированными струнами.
Модель с бесконечным числом струн	Предварительная оценка зоны стягивания тягового тока в контактных подвесках, состоящих из НТ и КП, с токопроводящими струнами. Предварительная оценка нагрева контактного провода при токосъеме.
Модель в КОИТ-3	Предварительный расчет распределения тока с учетом топологии, характерной для контактной сети постоянного тока и переходного сопротивления в узлах соединения проводов. Расчет токораспределения для мгновенного расположения ЭПС на расчетном участке.
Модель в UKS-Current	Полный расчет токораспределения в контактной сети с любой топологией с учетом геометрии проводов, но без учета переходного сопротивления в узлах соединения проводов. Расчет токораспределения для мгновенного расположения ЭПС на расчетном участке.
Модель МКЭ	Полный расчет токораспределения и нагрева проводов контактной сети с любой топологией с учетом геометрии проводов, но без учета переходного сопротивления в узлах соединения проводов. Расчет токораспределения и нагрева проводов при проходе ЭПС по расчетному участку. Определение «узких мест» в контактной сети. Проектирование новых и совершенствование существующих конструкций контактной сети. Оценка пропускной способности участка по условию нагрева проводов.
Модель МКЭ модернизированная	Полный расчет токораспределения и нагрева проводов контактной сети с любой топологией с учетом геометрии проводов, с учетом арматуры контактной сети и переходного сопротивления в узлах соединения проводов. Расчет токораспределения и нагрева проводов при проходе ЭПС с неограниченным количеством токоприемников по расчетному участку. Определение «узких мест» в контактной сети. Проектирование новых и совершенствование существующих конструкций контактной сети. Оценка возможности обнаружения дефектных элементов контактной сети при тепловизионной диагностике. Учет неравномерного по длине износа контактного провода при оценке пропускной способности участка по условию нагрева проводов. Оценка нагрева контактного провода токосъемными пластинами.

Наиболее широким расчетным функционалом обладают конечно-элементные модели. МКЭ модели не имеют аналогов при расчете нагрева проводов контактной сети в режиме токосъема, но при этом имеют наибольшие требования к вычислительным ресурсам.

Скорость расчетов и возможность их проведения определяется вычислительной мощностью процессора [111]. По результатам проведения вычислений по конечно-элементной модели электротеплового расчета на компьютере с вычислительной мощностью порядка 30 гигафлопс можно сделать вывод о том, что такой мощности достаточно для проведения научных исследований для одного анкерного участка, однако для удобства при систематическом решении задач, связанных с эксплуатацией, и масштабных параметрических исследованиях при проектировании контактной сети может потребоваться увеличение вычислительной мощности компьютера. При этом МКЭ модели могут быть использованы широким кругом специалистов в таких программных продуктах, как COMSOL Multiphysics или аналогичных.

1.6 Выводы по первой главе

1. Анализ тепловых повреждений контактной сети постоянного тока показал, что с ростом токовой нагрузки происходит увеличение количества отказов, вызванных тепловым воздействием электрического тока. Так, усиление существующих участков контактной сети для пропуска поездов повышенной массы путем установки поперечных электросоединителей не приводит к снижению числа отказов звеньевых струн по причине электромеханического износа. В применяемых на сегодняшний день математических моделях электротеплового расчета контактной сети постоянного тока используются допущения, не позволяющие произвести комплексный анализ причин возникновения тепловых отказов, а также электротепловых режимов работы во всех элементах контактной сети.

2. Применение находящихся в эксплуатации контактных подвесок постоянного тока для целей обеспечения современных потребностей в объеме перевозок

допустимо, но влечет за собой массовое повышение количества отказов тех элементов контактной сети, которые не учитывались в методиках электротепловых расчетов при ее проектировании.

3. Выполнен обзор существующих методик расчета токораспределения и нагрева проводов контактной сети постоянного тока. По результатам анализа расчетных возможностей определены области применения моделей.

На основании количества переменных, подлежащих определению, выявлено, что применение современных конечно-элементных моделей для электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока становится возможным при вычислительной мощности персональных компьютеров, которая уже доступна для специалистов по разработке и проектированию контактной сети. Так, для возможности проведения проектных исследований вычислительная мощность процессора должна составлять порядка 30 гигафлопс.

4. Произведен сравнительный анализ существующих моделей электротепловых расчетов. Произведено сопоставление рассмотренных математических моделей с областями их возможного применения. По результатам выявленных критериев становится возможен выбор наиболее подходящей модели токораспределения и нагрева проводов в зависимости от поставленных перед расчетом задач. По результатам сравнительного анализа можно сделать вывод, что математические модели, основанные на методе конечных элементов, обладают наиболее широким спектром вычислительных возможностей, которые отвечают уровню современных потребностей в проведении анализа электротепловых процессов, происходящих в контактной сети постоянного тока. Таким образом, при совершенствовании методик электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока за основу принята математическая модель, основанная на методе конечных элементов.

2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1 Постановка задачи для разработки математической модели электротеплового расчета контактной сети постоянного тока

Разработка модели, отражающей реальные токовые нагрузки, возникающие в проводах контактной сети в процессе эксплуатации, необходима для оптимального выбора конструктивного исполнения узлов контактной сети по критерию токовой и тепловой нагрузки, а также для определения картины токораспределения, позволяющей рассчитывать режимы работы элементов контактной сети в процессе эксплуатации.

Отличительной особенностью токораспределения в контактной сети от воздушной линии электропередач являются множественные электрические соединения между проводами, в результате чего возникают перераспределения токов в узлах контактной сети, которые могут вызывать локальные увеличения температуры проводов.

Контактная сеть включает в себя соединительную и поддерживающую арматуру [96], которая может участвовать в процессе протекания тягового тока и теплоотвода от проводов. Места соединения и поддержки проводов выступают в роли сосредоточенных масс и имеют повышенную тепловую инерцию относительно аналогичного свободного участка провода, что необходимо учитывать при расчете.

Разрабатываемая математическая модель должна учитывать возможность расчета прохода токоприемника после предварительного разогрева контактной сети транзитным током, так как для контактной сети характерна попеременная работа в режимах транзита и токосъема. Температура проводов влияет на их электрическое сопротивление, которое в свою очередь влияет на токораспределение между проводами контактной сети, поэтому расчет распределения тока и температуры должен происходить совместно в рамках одной математической модели.

Таким образом, в математической модели электротепловых расчетов необходимо учитывать:

- топологию электрических соединений контактной сети;
- арматуру контактной сети;
- движение одного или нескольких токоприемников;
- неравномерный по длине износ контактного провода;
- неравномерные по длине контактной сети и меняющиеся во времени потоки воздуха и солнечной радиации;
- нелинейные свойства материалов с зависимостью от температуры;
- изменяющееся во времени значение тока транзита или токосъема;
- теплообмен контактного провода с токосъемными пластинами токоприемника.

2.2 Геометрия контактной сети и расчетная сетка

Геометрия расчетного участка контактной сети представляется линейными отрезками, длины которых определяются по результатам механических расчетов [24]. Для решения уравнения (2.7) на области, определенной геометрией, отрезки проводов, из которых состоит контактная подвеска разбиваются на конечные элементы – элементы значительно меньшие по размерам, чем расчетная область, соединенные между собой в узлах. Пример геометрии двух пролетов со средней анкерровкой компенсированной контактной подвески и их разбиение на конечные элементы изображен на Рисунке 2.1.

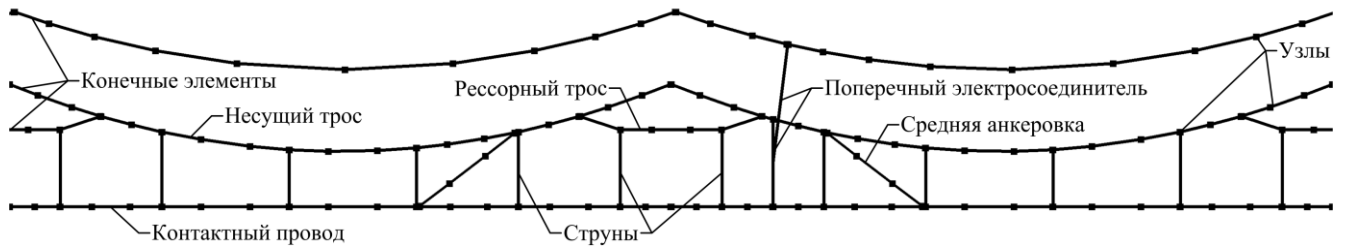
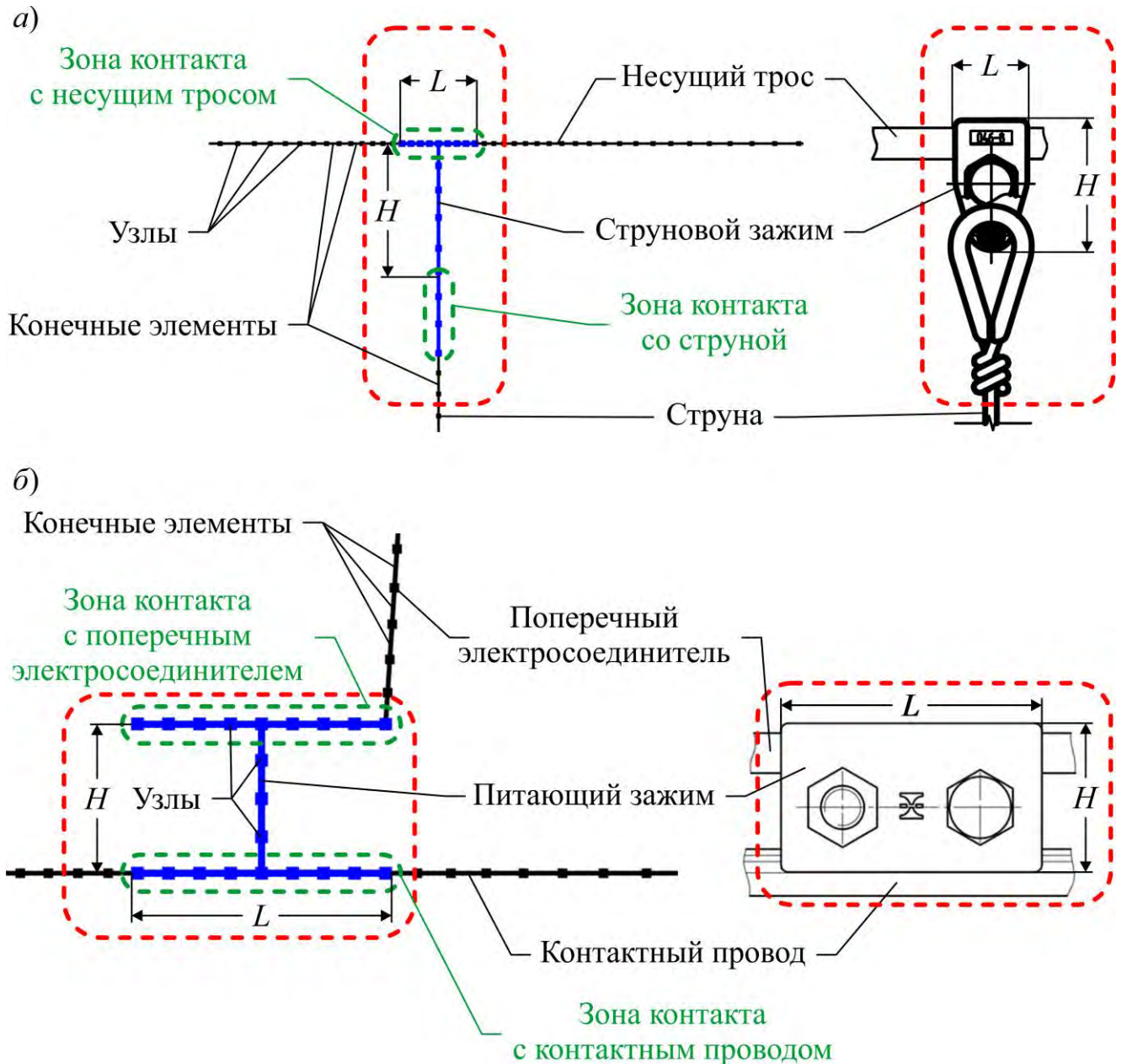


Рисунок 2.1 – Геометрия контактной сети постоянного тока с разбиением на линейные конечные элементы

Для наглядности на рисунке 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 следует оценивать минимальную длину участка локального износа и разбивать контактный провод в месте износа на такое количество элементов, чтобы данный участок описывался минимум четырьмя конечными элементами. Также разбиение контактного провода при расчете в режиме токосъема необходимо производить конечными элементами минимум в четыре раза меньшими, чем расчетная ширина пластины токоприемника.

При учете арматуры контактной сети на уровне геометрии каждый крепежный элемент контактной сети представляется в виде линейного участка на проводах, которые он соединяет или крепит. Каждый линейный элемент арматуры контактной сети разбивается минимум четырьмя конечными элементами. На Рисунке 2.2, а изображено преобразование струнового зажима в линейные элементы при креплении струны к НТ. На Рисунке 2.2, б изображено преобразование питающего зажима в линейные элементы при его креплении к КП.

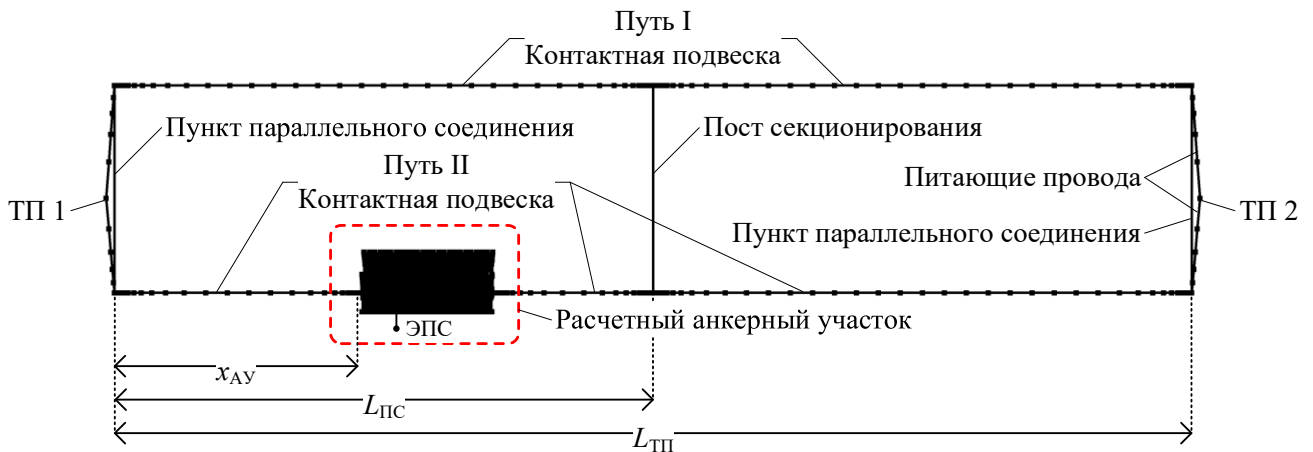


L – длина зажима, м; H – высота зажима, м

Рисунок 2.2 – Расчетная геометрия струнового зажима в месте крепления струны к несущему тросу (а) и питающего зажима в месте крепления поперечного электросоединителя к контактному проводу (б)

Длина отрезков зажима на каждом проводе соответствует геометрическим габаритам зажима в проекции на ось соответствующего провода. Свойства, применяемые к отрезкам, имеют параметры, эквивалентные моделируемому зажиму по массе, теплоемкости, теплопроводности и электрическому сопротивлению.

Для расчета контактной сети в режиме токосъема при двухстороннем питании необходимо учитывать топологию соединения контактных подвесок на межподстанционной зоне. Путь тягового тока может протекать по контактной подвеске соседнего пути в случае узловой или параллельной схемы соединения. Упрощение топологии межподстанционной зоны заключается в представлении контактной сети вне расчетного участка в виде линии с эквивалентными параметрами. Аналогично задаются элементы геометрии с параметрами, соответствующими пунктам параллельного соединения и посту секционирования. На Рисунке 2.3 представлена упрощенная топология межподстанционной зоны с расчетным анкерным участком [112].



x_{AY} – расстояние от ТП 1 до расчетного участка; $L_{ПС}$ – расстояние от ТП 1 до поста секционирования; $L_{ТП}$ – длина межподстанционной зоны

Рисунок 2.3 – Упрощенная топология межподстанционной зоны при расчете контактной сети в режиме токосъема при двухстороннем питании

Для электротеплового расчета режима токосъема в случае одностороннего питания или режима транзита построение упрощенной топологии межподстанционной зоны не требуется.

2.3 Математическая модель токораспределения

2.3.1 Уравнение распределения тока

Расчет распределения тока в контактной сети основан на дифференциальной форме записи уравнений Максвелла, а именно на системе уравнений (2.1), включающую в себя закон Гаусса и теорему о циркуляции магнитного поля

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_q; \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где ρ_q – объемная плотность стороннего электрического заряда, Кл/м³;

\mathbf{j} – плотность электрического тока, А/м²;

\mathbf{H} – напряженность магнитного поля, А/м;

\mathbf{D} – электрическая индукция, Кл/м²;

∇ – оператор набла,

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{e}_z,$$

где $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ – единичные векторы по осям x, y, z соответственно.

Взяв дивергенцию от обеих частей уравнения теоремы о циркуляции магнитного поля, получим

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = \nabla \cdot \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \mathbf{D}. \quad (2.2)$$

Учитывая, что дивергенция ротора равняется нулю и, подставляя уравнение закона Гаусса в уравнение (2.2), получаем уравнение непрерывности электрического тока (2.3)

$$\nabla \cdot \mathbf{j} + \frac{\partial \rho_q}{\partial t} = 0. \quad (2.3)$$

Полученное уравнение общеизвестно и справедливо для тока, протекающего в объемном теле. Второе слагаемое представляет собой объемный источник электрического тока.

Контактная сеть является протяженным объектом, состоящим из множества последовательно соединенных анкерных участков. Диаметры продольных проводов $d_{\text{ПР}}$ контактной сети много меньше протяженности одного анкерного участка $L_{\text{АУ}}$

$$d_{\text{ПР}} \leq L_{\text{АУ}}. \quad (2.4)$$

Таким образом, при решении провода контактной подвески могут быть представлены одномерными объектами. В соответствии с принятыми допущениями на основании неравенства (2.4) преобразуем уравнение (2.3) для применения к одномерным объектам, умножая обе части уравнения на площадь поперечного сечения провода $S_{\text{ПР}}$, и перенесем второе слагаемое в правую часть

$$\nabla \cdot I = -f, \quad (2.5)$$

где I – ток в проводе, А;

f – линейный источник тока, А/м.

Выразим ток I через искомую функцию напряжения V

$$I = \frac{1}{R_{\text{ПР}}(T)} \nabla \cdot V, \quad (2.6)$$

где $R_{\text{ПР}}$ – погонное сопротивление провода, Ом/м.

Подставляя уравнение (2.6) в уравнение (2.5), получим дифференциальное уравнение для расчета токораспределения в контактной сети постоянного тока

$$\frac{1}{R_{\text{ПР}}(T)} \cdot \Delta V = -f, \quad (2.7)$$

где Δ – оператор Лапласа ($\Delta = \nabla^2$).

2.3.2 Граничные условия для расчета токораспределения

Для решения дифференциального уравнения (2.7) при расчете токораспределения необходимо задать граничные условия – узлы, соответствующие источникам транзитного тока, базовые узлы с нулевым потенциалом, а также начальные значения.

Для базовых узлов используем граничное условие Дирихле

$$V_3 = 0, \quad (2.8)$$

где V_3 – электрический потенциал на базовых узлах, В.

В дальнейшем от базовых узлов заземления будет рассчитываться искомая функция электрического потенциала V . Граничное условие Дирихле учитывается на этапе сборки матрицы жесткости, из которой исключаются строки и столбцы, соответствующие узлам с данным граничным условием. Базовые узлы являются стоками для транзитного тока или тока токосъема, поэтому в качестве базовых выбраны узлы на концах питающих проводов расчетного участка. В случае одностороннего питания тяговой сети расчетный участок контактной подвески имеет базовый узел только с одной стороны, а в случае двухстороннего питания – с обеих сторон. Для двухстороннего питания важно учитывать положение расчетного участка на межподстанционной зоне, а также схему соединения контактных подвесок на двухпутных или многопутных участках. Поэтому электротепловой расчет для случая двухстороннего питания происходит с заданием упрощенной топологии соединения контактных подвесок на межподстанционной зоне (Рисунок 2.3).

Работа контактной сети в режиме транзита характеризуется протеканием тягового тока до удаленной точки токосъема. Моделирование режима работы контактной сети в режиме транзита осуществляется путем задания базового узла с одной стороны расчетного участка на концах питающих проводов (ПП), согласно условию Дирихле, а также заданием транзитного тока на концах ПП с противоположного конца расчетного участка, согласно граничному условию Неймана

$$\mathbf{n} \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{III}}(T)} \cdot \nabla V \right) = I_{\text{ТРАНЗИТ}}, \quad (2.9)$$

где $I_{\text{ТРАНЗИТ}}$ – расчетный транзитный ток контактной сети, А;

\mathbf{n} – вектор нормали.

Граничное условие Неймана не влияет на формирование матрицы жесткости.

Работа контактной сети в режиме токосъема характеризуется движением ЭПС, а, следовательно, и перемещением полза токоприемника по контактному проводу. Таким образом, основываясь на уравнении (2.7), запишем значение линейного источника тока f на контактном проводе, характеризующее движущийся полз токоприемника

$$f = I_{\text{ЭПС}}(t, S(t)), \quad (2.10)$$

где $I_{\text{ЭПС}}(t, S(t))$ – функция тока ЭПС в зависимости от координаты токосъема и времени, А/м;

$S(t)$ – функция передвижения координаты ЭПС в зависимости от времени (координата первого токоприемника), м.

Запись функции тока ЭПС $I_{\text{ЭПС}}(t, S(t))$ в зависимости от координаты и времени осуществляется с помощью кусочно-постоянной функции действительного аргумента $\text{sgn}(x)$, с помощью которой определяется координата приложения линейного источника тока f на контактном проводе. Для случая токосъема с количеством токоприемников, равным $N_{\text{ТОКОПР}}$, функция $I_{\text{ЭПС}}(t, S(t))$ выглядит следующим образом

$$I_{\text{ЭПС}}(t, S(t)) = \frac{I_{\text{ЭПС}}(t)}{b_{\text{ПОЛ}}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{ТОКОПР}}} n_{\text{ТОКОПР } i} \cdot \text{sgn}_i(S(t)), \quad (2.11)$$

где $I_{\text{ЭПС}}(t)$ – заданная функция тока ЭПС в зависимости от времени, А;

$b_{\text{ПОЛ}}$ – суммарная ширина токосъемных пластин токоприемника, м;

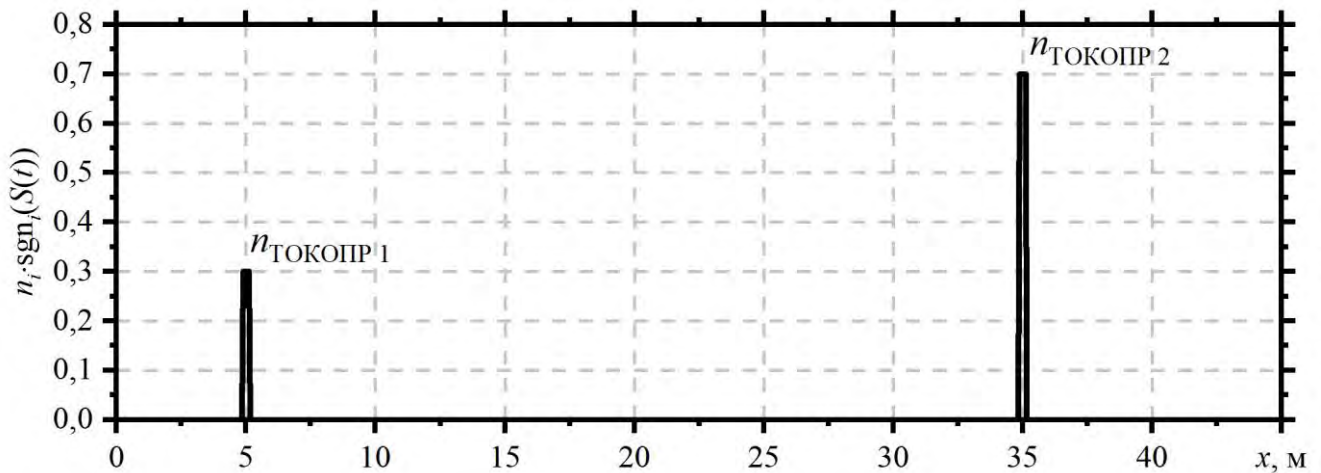
$n_{\text{ТОКОПР } i}$ – доля тока ЭПС, приходящаяся на i -ый токоприемник.

В общем виде функция $\text{sgn}_i(S(t))$ записывается следующим выражением

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}_i(S(t)) = 0,5 \cdot \left(\operatorname{sgn} \left(x - S(t) - L_{\text{ТОКОПР } i} + \frac{b_{\text{ПОЛ}}}{2} \right) - \right. \\ \left. - \operatorname{sgn} \left(x - S(t) - L_{\text{ТОКОПР } i} - \frac{b_{\text{ПОЛ}}}{2} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.12)$$

где $L_{\text{ТОКОПР } i}$ – расстояние между i -ым и первым токоприемником.

Пример функции $\operatorname{sgn}_i(S(t))$ изображен на Рисунке 2.4. для случая токосъема двумя токоприемниками.



$$N_{\text{ТОКОПР}} = 2; L_{\text{ТОКОПР } 2} = 30 \text{ м}; S(t) = 5 \text{ м}; n_{\text{ТОКОПР } 1} = 0,3; n_{\text{ТОКОПР } 2} = 0,7; b_{\text{ПОЛ}} = 0,3 \text{ м}$$

Рисунок 2.4 – Функция координаты источника тока f для режима токосъема двумя токоприемниками

Доли тока $n_{\text{ТОКОПР } i}$ могут быть заданы функциями с зависимостями от координаты ЭПС $n_{\text{ТОКОПР } i}(x)$ при регистрации этих данных в эксплуатации или при выполнении соответствующих расчетов [28].

При электротепловом расчете для случая, когда напряжение на шинах тяговых подстанций рассматриваемой межподстанционной зоны не равны в точках подключения тяговых подстанций, задается следующее граничное условие Неймана

$$I_{\text{ТП}} = \frac{E_{\text{ТП}} - V}{R_{\text{ТП}}}, \quad (2.13)$$

где $I_{ТП}$ – расчетный ток тяговой подстанции, А;

$E_{ТП}$ – ЭДС тяговой подстанции, В;

V – расчетный потенциал в точке приложения тока, В;

$R_{ТП}$ – внутреннее сопротивление тяговой подстанции, Ом.

Таким образом, ток будет определяться потенциалом в этой точке, который в свою очередь будет определяться падением напряжения на внутреннем сопротивлении подстанции.

2.4 Математическая модель распределения температуры

2.4.1 Уравнение нагрева и охлаждения проводов

Уравнение теплового баланса

Достаточно часто для определения неизвестной температуры может быть использован первый закон термодинамики, который, согласно [113, с. 15], может быть записан в следующем виде

$$E_{ST} = \frac{dE_{ST}}{dt} = E_{IN} - E_{OUT} + E_G, \quad (2.14)$$

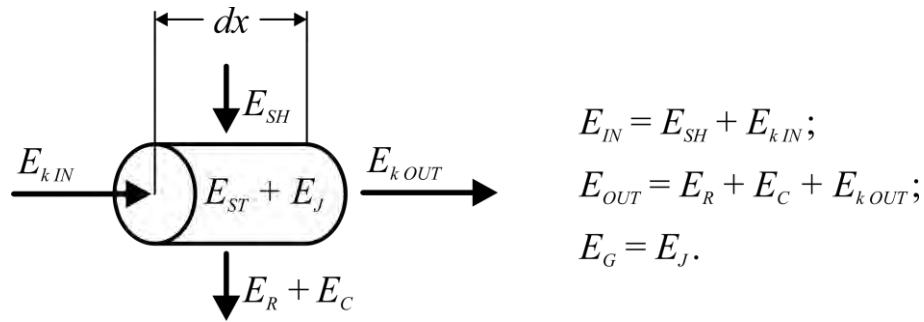
где E_{ST} – сохраненная тепловая энергия, Дж;

E_{IN} – поступающая тепловая энергия, Дж;

E_{OUT} – отбираемая тепловая энергия, Дж;

E_G – тепловая энергия, сгенерированная внутри тела, Дж.

Согласно [19, с. 721], провода контактной сети подвержены нагреву солнечной радиацией, резистивному нагреву, а также процессам конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой. Схематично баланс тепловой энергии для участка провода контактной сети dx представлен на Рисунке 2.5.



$E_{k IN}$ ($E_{k OUT}$) – энергия поступающая (отбираемая) в результате кондуктивного теплообмена, Дж;
 E_{SH} – энергия нагрева от солнечной радиации, Дж; E_C , (E_R) – энергия конвективного (лучистого) теплообмена, Дж; E_J – энергия, выделяемая при резистивном нагреве, Дж

Рисунок 2.5 – Баланс тепловой энергии для участка провода контактной сети

Кондуктивный поток тепла

Кондуктивный теплообмен возникает при наличии градиента температуры вдоль провода. Данное условие возникает в местах крепления арматуры контактной сети к проводам, а также в локальных местах износа контактного провода. Вычислительные исследования показывают, что разница температуры провода вблизи соединительной и поддерживающей арматуры в среднем на 10–20 °С ниже температуры провода на расстоянии 1–1,5 м от рассматриваемой точки. Данный факт учитывается в [76, с. 10] при испытаниях на ползучесть. Неравномерность температуры в поперечном сечении провода создает градиент температуры. Согласно [31, с. 90], разность между максимальной и минимальной температурой провода в поперечном сечении составляет 0,35 °С для фасонных контактных и одножильных проводов; 0,45 °С для многопроволочных семижильных проводов и 0,9 °С для многопроволочных девятнадцатижильных проводов. Поток тепла направлен к наветренной стороне в случае вынужденной конвекции, а в случае естественной конвекции – вертикально вниз. В последующих электротепловых расчетах контактной сети постоянного тока кондуктивный поток тепла в поперечном направлении провода считается равным нулю ввиду его малозначительности по сравнению с кондуктивным потоком вдоль провода.

Кондуктивный поток тепла Q_k в твердом теле описывается законом Фурье [114, с. 176], который для участка провода dx может быть записан как

$$Q_k = -k(T) \cdot A \cdot \nabla \cdot T, \quad (2.15)$$

где A – площадь поперечного сечения провода, м².

Минус в правой части уравнения (2.15) означает, что тепловой поток направлен в противоположную сторону от направления градиента температуры.

Дифференциальное уравнение нагрева и охлаждения проводов

На основании Рисунка 2.5, уравнений (2.14) и (2.15) запишем уравнение нестационарного теплового баланса для проводов контактной сети, выраженное в потоке тепла на единицу длины провода

$$A \left(c(T) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \cdot \Delta T \right) = Q_J + Q_{SH} - Q_C - Q_R, \quad (2.16)$$

где c – теплоемкость материала провода, Дж/(кг·К);

k – теплопроводность материала провода, Вт/(м·К);

ρ – плотность материала провода, кг/м³;

Q_J – погонный поток тепла от резистивного нагрева, Вт/м;

Q_{SH} – погонный поток тепла от солнечной радиации, Вт/м;

Q_C – погонный поток тепла от конвективного охлаждения, Вт/м;

Q_R – погонный поток тепла от лучеиспускания, Вт/м;

T – температура, К;

t – время, с;

Δ – оператор Лапласа ($\Delta = \nabla^2$).

Материалы, из которых изготовлены провода контактной сети, обладают пренебрежимо малыми коэффициентами изотермической сжимаемости k_T и объемного расширения α . Так, например, согласно [115, с. 90], для меди $\alpha = 5 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, $k_T = 7,35 \cdot 10^{-7} \text{ атм}^{-1}$. В последующих электротепловых расчетах контактной сети постоянного тока считается, что площадь поперечного сечения провода A и плотность материала провода ρ являются постоянными величинами и не зависят от температуры и атмосферного давления. При этом плотность воздуха $\gamma_{\text{возд}}(T)$ является

функцией от температуры, что учитывается при расчете потока тепла от конвективного теплообмена.

Конвективный теплообмен

Погонный конвективный поток тепла Q_C для участка провода dx , согласно закону Ньютона – Рихмана [116], может быть описан выражением

$$Q_C = \pi \cdot D_{ROD} \cdot h_{ПГ} \cdot (T - T_{\infty}), \quad (2.17)$$

где $h_{ПГ}$ – погонный коэффициент конвективной теплоотдачи с провода, Вт/(м·К);
 T_{∞} – температура удаленного воздуха, К.

Коэффициент конвективной теплоотдачи зависит от формы провода, температуры и скорости окружающей среды, а также ее давления. В случае, когда скорость невозмущенного потока воздуха равняется нулю $v_{\infty} = 0$, возникает естественная конвекция. Так как плотность воздуха зависит от температуры $\gamma_{AIR}(T)$, то при наличии градиента температур возникает градиент плотности и пропорциональная ему объемная сила в поле действия силы гравитации. Стоит также отметить, что конвекционное движение воздуха возникает также под действием центробежных сил и силы Кориолиса. Однако для определения коэффициента свободной конвективной теплоотдачи для проводов контактной сети учитывается движение воздуха вследствие градиента температуры в поле действия сил гравитации.

Естественная конвекция

На определение конвективного коэффициента теплоотдачи $h_{ПГ}$ при естественной конвекции, исходя из принципов ее возникновения, существенное влияние оказывает положение провода контактной сети в пространстве. Так, при аналитических расчетах различают вертикальное и горизонтальное расположение провода. На Рисунке 2.6 изображено распределение температуры воздуха для двух вариантов расположения провода при свободной конвекции.

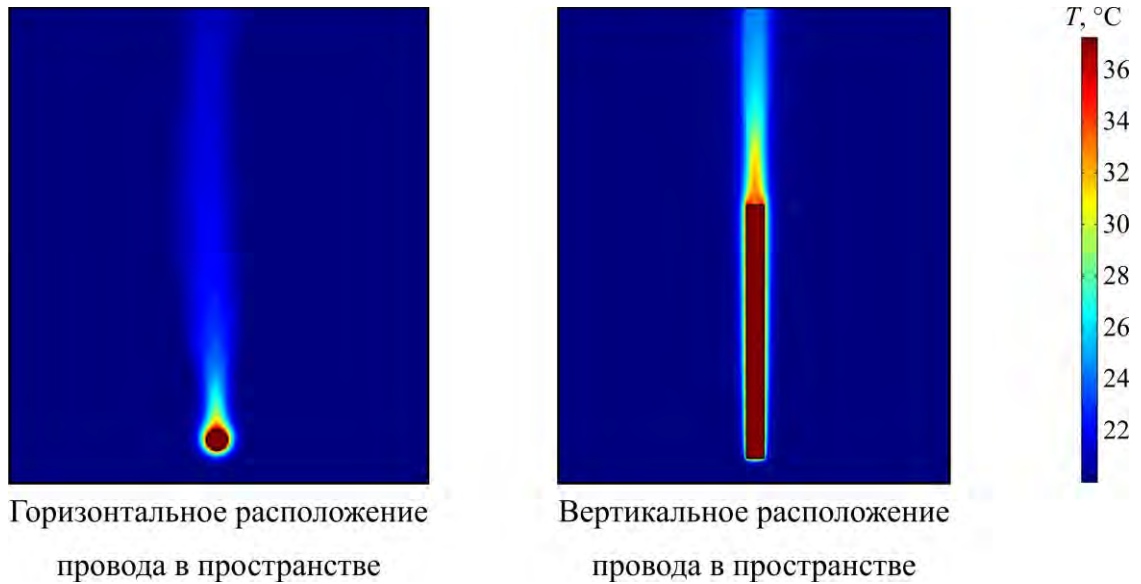


Рисунок 2.6 – Свободная конвекция при горизонтальном и вертикальном расположении цилиндрического объекта

В контактной сети постоянного тока применяются одножильные, многопроволочные и фасонные провода (Рисунок 2.7). При вычислении коэффициента конвективного охлаждения провода представляются цилиндрическими объектами с расчетным диаметром, равным описанной окружности по поперечному сечению.



Рисунок 2.7 – Поперечное сечение различных типов проводов, применяемых в контактной сети

Согласно [117, с. 546], для вертикально расположенного цилиндрического тела коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции вычисляется по следующей формуле

$$h_{III} = \frac{k_{AIR}}{H_{ROD}} \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \left(\frac{7 \cdot Ra_H \cdot Pr}{5 \cdot (20 + 21 \cdot Pr)} \right)^{1/4} + \frac{4 \cdot (272 + 315 \cdot Pr) \cdot H_{ROD}}{35(64 + 63 \cdot Pr) \cdot D_{ROD}} \right), \quad (2.18)$$

где Ra_H – число Рэлея для вертикального цилиндра;

Pr – число Прандтля;

H_{ROD} – высота провода, м;

D_{ROD} – диаметр провода, м;

k_{AIR} – теплопроводность воздуха, Вт/(К·м).

Число Рэлея Ra_H является критерием подобия для процессов теплопередачи, характеризует поведение воздуха под воздействием градиента температуры [118, с. 538], зависит от свойств среды, характеристического размера расчетной области и рассчитывается по следующей формуле

$$Ra_H = \frac{g \cdot \beta \cdot \gamma_{AIR}(T_f)^2 \cdot C_p(T_f) \cdot |T - T_\infty| \cdot H^3}{k_{AIR}(T_f) \cdot \mu(T_f)}, \quad (2.19)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

H – высота провода, м;

μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с;

C_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);

γ_{AIR} – плотность воздуха, кг/м³;

T_f – температура пограничного слоя $(T + T_\infty)/2$, К;

β – коэффициент теплового расширения воздуха, К⁻¹.

Температура пограничного слоя в расчетах принимается равной среднему значению между температурой провода и температурой удаленного воздуха

$$T_f = \frac{T + T_\infty}{2}. \quad (2.20)$$

Коэффициент теплового расширения воздуха β характеризует относительное изменение объема воздуха с увеличением температуры при постоянном давлении и может быть рассчитан по следующей формуле

$$\beta = \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \gamma_{AIR}}{\partial T} \right)_p. \quad (2.21)$$

Число Прандтля Pr также является одним из критериев подобия в процессах теплопередачи, учитывает влияние свойств теплоносителя на теплоотдачу и рассчитывается по формуле

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k}. \quad (2.22)$$

Свободная конвекция для горизонтально расположенных проводов вычисляется, согласно [113, с. 580], по следующей формуле

$$h_{III} = \frac{k_{AIR}}{D_{ROD}} \cdot \left(0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra_D^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2, \quad (2.23)$$

где Ra_D – число Рэлея для горизонтального цилиндра.

Уравнение (2.23) справедливо для $Ra_D \leq 10^{12}$. Число Рэлея для горизонтального цилиндра рассчитывается по формуле, аналогичной (2.19), при этом в качестве характеристического размера выступает диаметр провода D_{ROD}

$$Ra_D = \frac{g \cdot \beta \cdot \gamma_{AIR}(T_f)^2 \cdot C_p(T_f) \cdot |T - T_\infty| \cdot D_{ROD}^3}{k_{AIR}(T_f) \cdot \mu(T_f)}. \quad (2.24)$$

Вынужденная конвекция

В случае вынужденной конвекции влияние пространственного расположения проводов становится малозначительным. Движение воздуха в пристеночных слоях обеспечивается внешним потоком, а не градиентом температуры и силой гравитации. Таким образом, согласно [113, с. 427], расчет коэффициента конвективного охлаждения при вынужденной конвекции проводов производится по формуле

$$h_{\text{III}} = \frac{k_{\text{AIR}}}{D_{\text{ROD}}} \cdot \left(0,3 + \frac{0,62 \cdot \text{Re}_D^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{\text{Pr}}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \cdot \left(1 + \left(\frac{\text{Re}_D}{282000}\right)^{5/8}\right)^{4/5} \right), \quad (2.25)$$

где Re_D – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса является безразмерной величиной, характеризующей инерционные и вязкие составляющие потока воздуха в уравнении Навье – Стокса. Уравнение (2.25) рекомендуется применять при соотношении $\text{Re}_D \cdot \text{Pr} \geq 0,2$. Число Рейнольдса, согласно [119, с. 938], рассчитывается по формуле

$$\text{Re}_D = \frac{\rho(T_f) \cdot V_{\text{AIR}} \cdot D_{\text{ROD}}}{\mu(T_f)}, \quad (2.26)$$

где V_{AIR} – скорость удаленного потока воздуха, м/с.

Свободно-вынужденная конвекция

При условиях, когда конвективный теплообмен от естественной и вынужденной конвекций сопоставимы, т.е. $(\text{Ra}/(\text{Pr} \cdot \text{Re}^2)) \approx 1$, возникает режим свободно-вынужденной конвекции. Общепринятая практика для расчета конвекции при свободно-вынужденном потоке воздуха, согласно [120], основывается на формуле

$$\text{Nu}_{\text{FN}}^n = \text{Nu}_F^n \pm \text{Nu}_N^n, \quad (2.27)$$

где Nu_{FN}^n – число Нуссельта при свободно-вынужденной конвекции;

Nu_F^n – число Нуссельта при естественной конвекции;

Nu_N^n – число Нуссельта при вынужденной конвекции.

Согласно [113, с. 594], наилучшие корреляционные данные при свободно-вынужденной конвекции достигаются при $n = 3$.

Число Нуссельта является критерием подобия, характеризующим соотношение интенсивности конвективного теплообмена и теплообмена за счет

теплопроводности. Соотношение между числом Нуссельта и коэффициентом конвективного теплообмена провода, согласно [121], выглядит следующим образом

$$h_{\text{ПГ}} = \frac{\text{Nu} \cdot k_{\text{AIR}}}{D_{\text{ROD}}}. \quad (2.28)$$

Лучистый теплообмен по закону Стефана – Больцмана

Согласно закону Стефана – Больцмана, все тела излучают тепловую энергию [122, с. 704]. Лучистый погонный поток тепла Q_R для проводов контактной сети вычисляется по следующей формуле

$$Q_R = \pi \cdot D_{\text{ROD}} \cdot \varepsilon \cdot \sigma_{\text{СБ}} \cdot (T^4 - T_{\infty}^4), \quad (2.29)$$

где ε – степень черноты поверхности материала провода;

$\sigma_{\text{СБ}}$ – постоянная Стефана – Больцмана $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Резистивный нагрев

Согласно закону Джоуля – Ленца [123], при протекании тока происходит выделение тепловой энергии, пропорциональное омическому сопротивлению участка провода и квадрату силы тока. Погонная мощность Q_J , выделяемая в проводе при протекании тока, рассчитывается по формуле

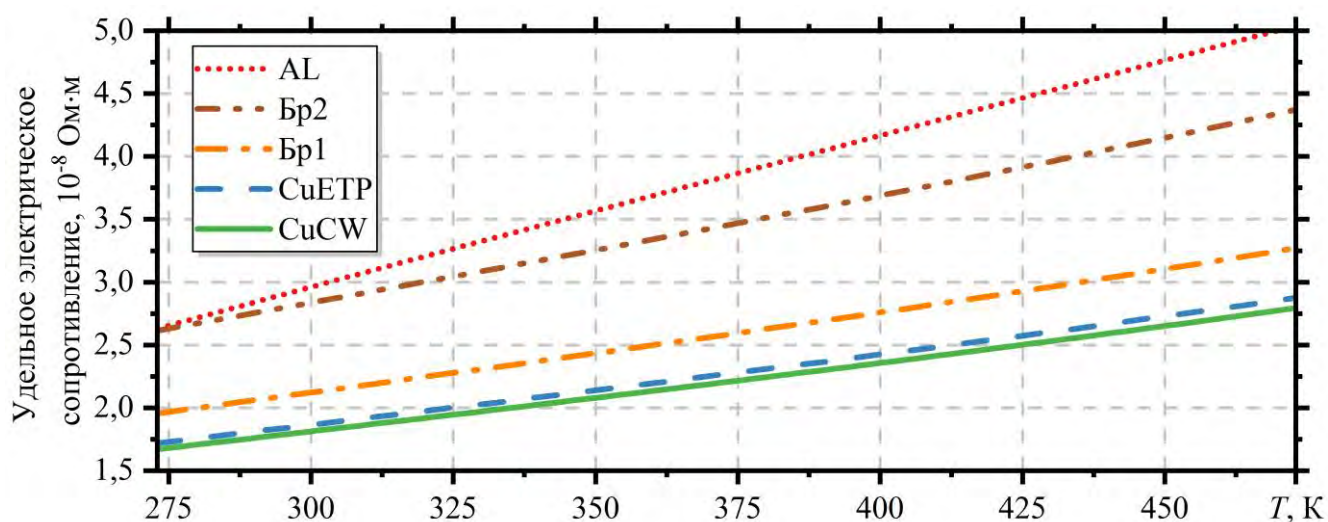
$$Q_J = I^2 \cdot R_{\text{ПГ}}(T), \quad (2.30)$$

где I – сила тока в проводе, А;

T – температура провода, К;

$R_{\text{ПГ}}$ – погонное сопротивление провода, Ом/м.

На Рисунке 2.8 представлены зависимости удельного электрического сопротивления от температуры для некоторых материалов контактной сети.



AL – алюминий; Бр1 – магниевая бронза CuMg0,2; Бр2 – магниевая бронза CuMg0,5;
CuETP – медь многопроволочных проводов; CuCW – медь контактного провода

Рисунок 2.8 – Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры для некоторых материалов проводов контактной сети

2.4.2 Теплообмен контактного провода и токоъемных пластин

Параметры контактирующих поверхностей

Дополнительно для контактного провода характерен нагрев от тепловыделения в скользящем контакте с токоприемником. Тепловыделение в контакте характеризуется протеканием тягового тока через переходное электрическое сопротивление и механической работой силы трения. Различная температура токоъемных пластин и контактного провода вызывает контактный теплообмен, характеризующийся контактным термическим сопротивлением.

Контактное термическое и электрическое сопротивления, согласно [117], характеризуются шероховатостью контактирующих поверхностей (Рисунок 2.9).

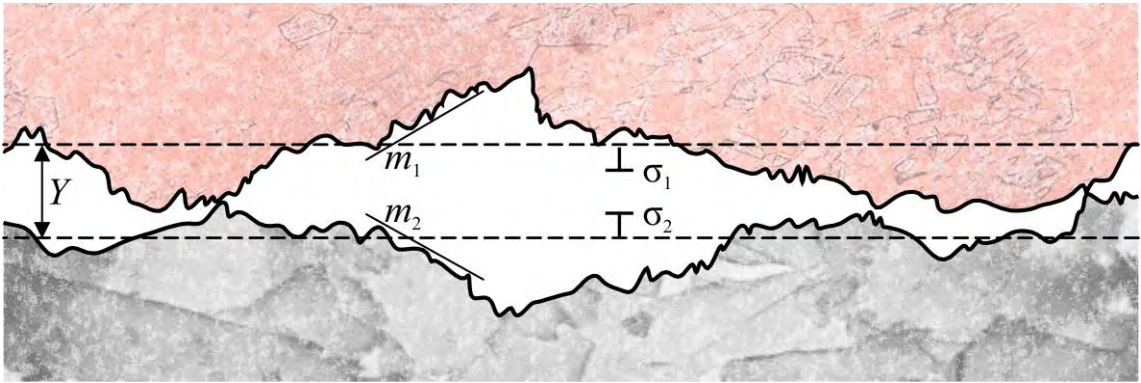


Рисунок 2.9 – Типичное представление контактирующих поверхностей твердых тел

Поверхность контактного провода и токосъемной пластины характеризуются средней высотой σ_1 , σ_2 и средним уклоном шероховатости m_1 , m_2 , которые определяются выражениями

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx; \quad (2.31)$$

$$m_i = \frac{1}{L} \int_0^L \left| \frac{dy(x)}{dx} \right| dx, \quad (2.32)$$

где L – длина участка, содержащего достаточное количество неровностей, м;
 $y(x)$ – расстояние от точки на поверхности до средней линии, м.

Среднеквадратичные значения σ_{asp} и m_{asp} , принимаемые для расчета, рассчитываются по выражениям

$$\sigma_{asp} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (2.33)$$

$$m_{asp} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2}. \quad (2.34)$$

Расстояние между контактирующими поверхностями определяется из выражения

$$Y = \sqrt{2} \cdot \sigma_{asp} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{\sqrt{2} \cdot P}{m_{asp} \cdot E_{CONTACT}} \right), \quad (2.35)$$

где erf^{-1} – обратная функция Лапласа.

В рамках рассматриваемой математической модели при тепловом расчете контакта между контактным проводом и токосъемной пластиной контактирующие поверхности считаются твердыми с изотропными свойствами и предполагают только упругую деформацию шероховатостей, согласно [117, с. 349; 124]. Подробное исследование электротепловых процессов контакта между контактным проводом и токосъемной пластиной осуществляется в рамках отдельной конечно-элементной модели [28].

Расчет контактной теплопроводности

Контактная теплопроводность $h_{CONTACT}$ состоит из теплопроводности контактных пятен h_C и теплопроводности воздушного промежутка h_G , а также включает в себя поток тепла за счет лучеиспускания h_R

$$h_{CONTACT} = h_C + h_G + h_R. \quad (2.36)$$

Профессор Боривое Микич (Borivoje V. Mikic) [125] из Массачусетского технологического института приводит следующее уравнение для расчета теплопроводности контактных пятен при упругой деформации твердых изотропных тел

$$h_C = 1,54 \cdot k_{CONTACT} \cdot \frac{m_{asp}}{\sigma_{asp}} \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot P}{m_{asp} \cdot E_{CONTACT}} \right)^{0,94}, \quad (2.37)$$

где P – контактное давление, Па;

$E_{CONTACT}$ – эффективный модуль Юнга, Па;

$k_{CONTACT}$ – эффективная контактная теплопроводность, Вт/(м·К).

Эффективный модуль Юнга определяется согласно выражению

$$\frac{1}{E_{CONTACT}} = \frac{1 - \nu_{КП}^2(T_{КП})}{E_{КП}(T_{КП})} + \frac{1 - \nu_{ПОЛ}^2(T_{ПОЛ})}{E_{ПОЛ}(T_{ПОЛ})}, \quad (2.38)$$

где $E_{\text{КП}}$, $E_{\text{ПОЛ}}$ – модуль Юнга материала контактного провода и токосъемной пластины соответственно, Па;

$\nu_{\text{КП}}$, $\nu_{\text{ПОЛ}}$ – коэффициент Пуассона материала контактного провода и токосъемной пластины соответственно;

$T_{\text{КП}}$, $T_{\text{ПОЛ}}$ – температура материала контактного провода и токосъемной пластины соответственно, К.

Эффективная контактная теплопроводность определяется через соотношение теплопроводностей материалов

$$k_{\text{CONTACT}} = \frac{2 \cdot k_{\text{КП}}(T_{\text{КП}}) \cdot k_{\text{ПОЛ}}(T_{\text{ПОЛ}})}{k_{\text{КП}}(T_{\text{КП}}) + k_{\text{ПОЛ}}(T_{\text{ПОЛ}})}, \quad (2.39)$$

где $k_{\text{КП}}$, $k_{\text{ПОЛ}}$ – теплопроводность материала контактного провода и токосъемной пластины соответственно, Вт/(м·К).

Контактная теплопроводность воздушного промежутка, согласно [117, с. 353], определяется из выражения

$$h_G = \frac{k_{\text{AIR}}(T_G)}{Y + \alpha \cdot \beta \cdot \frac{k_B \cdot T_G}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot D_G^2 \cdot P_{\text{AIR}}}}, \quad (2.40)$$

где Y – среднее расстояние между контактными поверхностями, м;

P_{AIR} – атмосферное давление воздуха, Па;

D_G – средний диаметр частицы газа (для воздуха принимается равным 0,37 нм);

α , β – коэффициенты аккомодации газа, которые для воздуха принимаются равными 1,7;

β – атмосферное давление воздуха, Па;

k_B – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$, Дж/К;

T_G – температура воздуха в промежутке, определяемая по формуле

$$T_G = \frac{T_{\text{КП}} + T_{\text{ПОЛ}}}{2}. \quad (2.41)$$

Из формул (2.35) и (2.40) видно, что среднее расстояние между контактными поверхностями Y является функцией от контактного давления P . При малом нажатии токоприемника F теплопроводность воздушного промежутка стремится к бесконечности, выступая в роли теплоизоляции. Напротив, с увеличением контактного нажатия и снижением расстояния Y до нуля тепловой контакт рассматривается как идеальный.

Теплообмен лучеиспусканием между токосъемными пластинами и контактным проводом происходит согласно закону Стефана – Больцмана и рассчитывается аналогично уравнению (2.29) по формуле

$$h_R \cdot (T_{\text{ПОЛ}} - T_{\text{КП}}) = \frac{\varepsilon_{\text{КП}} \cdot \varepsilon_{\text{ПОЛ}}}{\varepsilon_{\text{КП}} + \varepsilon_{\text{ПОЛ}} - \varepsilon_{\text{КП}} \cdot \varepsilon_{\text{ПОЛ}}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{ПОЛ}}^4 - T_{\text{КП}}^4), \quad (2.42)$$

где $\varepsilon_{\text{ПОЛ}}$, $\varepsilon_{\text{КП}}$ – степень черноты поверхности материала токосъемных пластин и контактного провода соответственно.

Расчет контактного электрического сопротивления

Переходное электрическое сопротивление контакта между контактным проводом и токосъемной пластиной определяется по формуле, аналогичной уравнению (2.37), где вместо эффективной контактной теплопроводности используется эффективная электрическая проводимость

$$r_{\text{CONTACT}} = 1,54 \cdot \sigma_{\text{CONTACT}} \cdot \frac{m_{\text{asp}}}{\sigma_{\text{asp}}} \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot P}{m_{\text{asp}} \cdot E_{\text{CONTACT}}} \right)^{0,94}, \quad (2.43)$$

где r_{CONTACT} – эффективная контактная электрическая проводимость, С/м².

Эффективная контактная электрическая проводимость определяется через соотношение электропроводимости материалов

$$\sigma_{\text{CONTACT}} = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{КП}}(T_{\text{КП}}) \cdot \sigma_{\text{ПОЛ}}(T_{\text{ПОЛ}})}{\sigma_{\text{КП}}(T_{\text{КП}}) + \sigma_{\text{ПОЛ}}(T_{\text{ПОЛ}})}, \quad (2.44)$$

где $\sigma_{\text{кп}}$, $\sigma_{\text{пол}}$ – электрическая проводимость материала контактного провода и токосъемной пластины соответственно, См/м.

Тепловыделение в контакте

Тепловыделение в контакте при протекании тягового тока через переходное контактное сопротивление, согласно закону Джоуля – Ленца, определяется из уравнения

$$Q_{J, \text{CONTACT}} = I_{\text{ЭПС}}^2 \cdot r_{\text{CONTACT}}, \quad (2.45)$$

где $I_{\text{ЭПС}}$ – ток ЭПС, А.

Тепловыделение от трения скольжения рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{ТР}} = \mu \cdot F \cdot V_{\text{ЭПС}}, \quad (2.46)$$

где μ – коэффициент трения между контактным проводом и токосъемной пластиной;

F – сила нажатия токоприемника, Н;

$V_{\text{ЭПС}}$ – скорость движения электроподвижного состава, м/с.

Распределение тепла, вызванного трением скольжения, а также протеканием тока $I_{\text{ЭПС}}$ через электрическое контактное сопротивление r_{CONTACT} происходит согласно уравнениям

$$r_{\text{кп}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_{\text{пол}} \cdot C_{\text{пол}} \cdot k_{\text{пол}}}{\rho_{\text{кп}} \cdot C_{\text{кп}} \cdot k_{\text{кп}}}}}, \quad (2.47)$$

$$r_{\text{пол}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_{\text{кп}} \cdot C_{\text{кп}} \cdot k_{\text{кп}}}{\rho_{\text{пол}} \cdot C_{\text{пол}} \cdot k_{\text{пол}}}}}, \quad (2.48)$$

где кп , пол – индексы, соответствующие материалу контактного провода и токосъемных пластин соответственно;

r_i – доля тепла, приходящаяся на контактирующий материал;

ρ_i – плотность материала, кг/м³;

C_i – теплоемкость материала, Дж/(кг·К);

k_i – теплопроводность материала, Вт/(м·К).

Расчет температуры токосъемных пластин

Расчет температуры токосъемных пластин происходит согласно уравнению теплового баланса для токосъемных пластин

$$m_{\text{ПОЛ}} \cdot C_{\text{ПОЛ}}(T_{\text{ПОЛ}}) \cdot \frac{\partial T_{\text{ПОЛ}}}{\partial t} = (Q_{J, \text{CONTACT}} + Q_{\text{ТР}}) \cdot r_{\text{ПОЛ}} + Q_{J, \text{ПОЛ}} + Q_{SH, \text{ПОЛ}} - Q_{C, \text{ПОЛ}} - Q_{R, \text{ПОЛ}} - Q_{\text{КП}}, \quad (2.49)$$

где $T_{\text{ПОЛ}}$ – температуры токосъемных пластин, К;

$m_{\text{ПОЛ}}$ – эквивалентная масса токосъемных пластин, кг;

$Q_{\text{КП}}$ – тепловой поток, направленный в контактный провод, Вт;

$Q_{J, \text{ПОЛ}}$ – тепловыделение от протекания тока в токосъемных пластинах, Вт.

В процессе движения поверхность токосъемных пластин подвергается конвективному охлаждению $Q_{C, \text{ПОЛ}}$. При вынужденной конвекции горизонтальной поверхности коэффициент конвективного охлаждения считается в соответствии с системой уравнений

$$h_{\text{ПОЛ}} = \begin{cases} 2 \cdot \frac{k_{\text{AIR}}(T_{\infty})}{b_{\text{ПОЛ}}} \cdot \frac{0,3387 \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \text{Re}_L^{1/2}}{\left(1 + \left(\frac{0,0468}{\text{Pr}}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} & \text{при } \text{Re}_L \leq 5 \cdot 10^5; \\ 2 \cdot \frac{k_{\text{AIR}}(T_{\infty})}{b_{\text{ПОЛ}}} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot (0,037 \cdot \text{Re}_L^{4/5} - 871) & \text{при } \text{Re}_L > 5 \cdot 10^5, \end{cases} \quad (2.50)$$

где $b_{\text{ПОЛ}}$ – суммарная ширина токосъемных пластин, м;

Re_L – число Рейнольдса для потока воздуха, вызванного движением ЭПС,

$$\text{Re}_L = \frac{\gamma_{\text{AIR}}(T_{\infty}) \cdot V_{\text{ЭПС}} \cdot b_{\text{ПОЛ}}}{\mu(T_{\infty})}. \quad (2.51)$$

Значения конвективного теплообмена токосъемных пластин от вертикально расположенных фронтальной и тыловой поверхностями по [126] оказывается пренебрежимо малым относительно конвективного теплообмена от горизонтальных пластин. Таким образом, учитывая, что конвективный теплообмен осуществляется с верхней и нижней поверхностями токосъемных пластин, поток тепла $Q_{C, \text{пол}}$ рассчитывается по формуле

$$Q_{C, \text{пол}} = 2 \cdot A_{\text{пол}} \cdot h_{\text{пол}} \cdot (T_{\text{пол}} - T_{\infty}), \quad (2.52)$$

где $h_{\text{пол}}$ – погонный коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности токосъемных пластин, Вт/(м²·К);

T_{∞} – температура удаленного воздуха, К;

$A_{\text{пол}}$ – площадь поверхности токосъемных пластин, м²,

$$A_{\text{пол}} = L_{\text{пол}} \cdot b_{\text{пол}}, \quad (2.53)$$

где $L_{\text{пол}}$ – длина токосъемных пластин, м.

Верхняя поверхность токосъемных пластин подвержена нагреву солнечной радиацией $Q_{SH, \text{пол}}$, которая рассчитывается по формуле

$$Q_{SH, \text{пол}} = W_{SH} \cdot A_{\text{пол}} \cdot \epsilon_{\text{пол}}, \quad (2.54)$$

где W_{SH} – тепловой поток солнечной радиации, Вт/м².

Охлаждение лучеиспусканием с верхней и нижней поверхностей токосъемных пластин $Q_{R, \text{пол}}$ рассчитывается аналогично уравнению (2.29) по формуле

$$Q_{R, \text{пол}} = 2 \cdot A_{\text{пол}} \cdot \epsilon_{\text{пол}} \cdot \sigma_{\text{сб}} \cdot (T_{\text{пол}}^4 + T_{\infty}^4). \quad (2.55)$$

Поток тепла в контактный провод $Q_{\text{кп}}$ через тепловое сопротивление h_{CONTACT} рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{кп}} = h_{\text{CONTACT}} \cdot A_{\text{CONTACT}} \cdot (T_{\text{пол}} - T_{\text{кп}}). \quad (2.56)$$

Нагрев токосъемных пластин протекающим тяговым током рассчитывается для наихудшего режима протекания тока

$$Q_J = I^2 \cdot \frac{\rho_{\text{пол}}(T_{\text{пол}}) \cdot L_{\text{пол}}}{b_{\text{пол}} \cdot t_{\text{пол}}}, \quad (2.57)$$

где $\rho_{\text{пол}}$ – удельное сопротивление материала токосъемных пластин, Ом/м;
 $t_{\text{пол}}$ – высота токосъемных пластин, м.

2.4.3 Граничные условия для расчета температуры

Для решения дифференциальных уравнений (2.16) и (2.49) при расчете температуры элементов контактной сети необходимо установить начальную температуру элементов T_{0i} .

При расчете в режиме транзита начальная температура для всех элементов в расчете равняется температуре удаленного воздуха $T_{0i} = T_{\infty}$.

При расчете прохода ЭПС по анкерному участку, как правило, элементы контактной сети имеют предварительный нагрев транзитным током. Таким образом, начальная температура элементов контактной сети T_0 берется на основании предварительного расчета в режиме транзита тягового тока

$$T_{0i}^{\text{ТОКОСЪЕМ}} = T_i^{\text{ТРАНЗИТ}}, \quad (2.58)$$

где i – индекс, соответствующий элементу контактной сети;

$T_{0i}^{\text{ТОКОСЪЕМ}}$ – начальная температура i -ого элемента контактной сети в режиме токосъема, К;

$T_i^{\text{ТРАНЗИТ}}$ – функция температуры i -ого элемента контактной сети по результатам расчета в режиме транзита тягового тока, К.

Также начальное значение температуры для любого элемента контактной сети при расчете может быть установлено вручную.

2.5 Алгоритм проведения электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока

Рассмотренные в предыдущих разделах математические модели, направленные на описание распределения температуры и тока в контактной сети постоянного тока, следует использовать при проведении электротепловых расчетов по алгоритму, представленному на Рисунке 2.10.

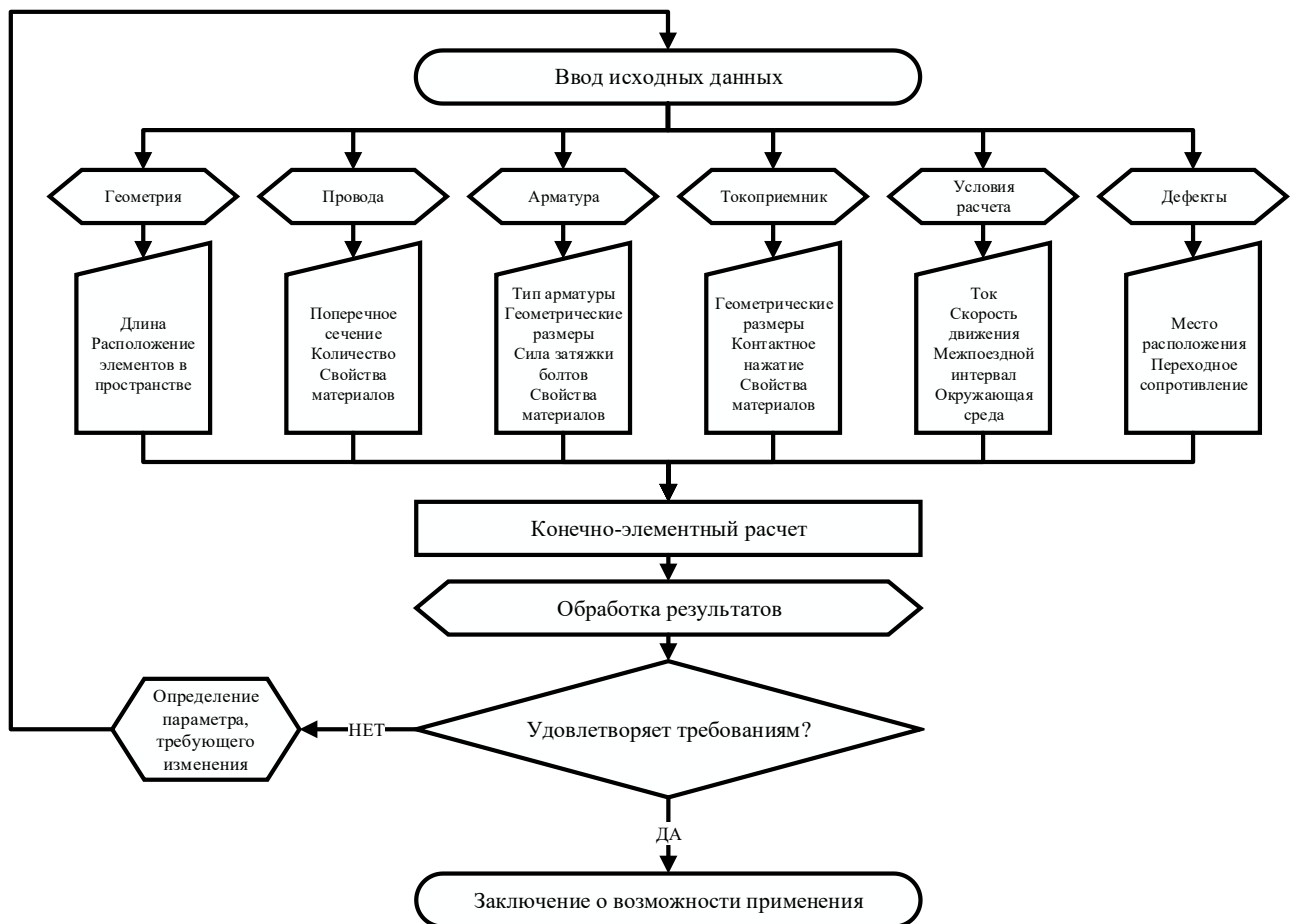


Рисунок 2.10 – Схема алгоритма электротеплового расчета контактной сети постоянного тока

В общепринятой практике конечно-элементного моделирования принято разделение на этапы, которые для случая электротеплового расчета представляют собой:

- подготовительный этап;
- этап решения;
- заключительный этап.

В Таблице 2.1 представлены подпункты, соответствующие расчетным этапам, с пояснениями о необходимых для выполнения действиях.

Таблица 2.1 – Алгоритм проведения электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока

	Последовательность действий	Пояснения
Подготовительный этап	Построение расчетной геометрии	Построение расчетной геометрии по проектным или фактическим данным. В работе используется параметрическая трехмерная модель контактной сети постоянного тока с возможностью быстрого изменения конструктивных особенностей контактной сети, с автоматическим разделением на расчетные подобласти и предустановленные параметры, с возможностью гибкой настройки.
	Задание параметров элементов и их материалов	Установка значений сечений проводов, их количества, внесение параметров зажимов и поддерживающей арматуры, задание параметров токоприемника, выбор и установка значений переходных сопротивлений дефектных элементов, внесение условий окружающей среды.
	Установка граничных условий	Установка граничных условий в соответствии с выбранным режимом: транзит, транзит током с зависимостью от времени, токосъем с максимальным тепловыделением, стоянка, троганье, движение поездов по заданному графику и результатам тяговых расчетов.
Расчет	Проведение расчетов	Непосредственное решение заданных уравнений. Установка параметрического решения с зависимостью от тока, окружающей среды, конструктивного исполнения, сечения и количества проводов, и т.п.
Заключительный этап	Обработка результатов	Вывод результатов в форме зависимостей выбранной физической величины от расстояния, времени, переходных сопротивлений, условий окружающей среды. При выводе используются стандартные приемы усреднения, интегрирования по длине расчетной геометрии.
	Анализ полученных результатов	Анализируя информацию, полученную при выводе результатов, делается заключение о возможности использования контактной сети с заданными параметрами в выбранном расчетном режиме в соответствии с нормативно-технической документацией по эксплуатации контактной сети и ее элементов.

В диссертационной работе применение разработанного алгоритма выполнено с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics в

интерфейсе Coefficient Form Edge PDE, позволяющим численно решать дифференциальные уравнения методом конечных элементов. Также создана программа для ЭВМ под названием ELTECAT AB УрГУПС, в которой реализована предложенная методика расчета.

2.6 Выводы по второй главе

1. Разработана математическая модель электротеплового расчета таких элементов контактной сети постоянного тока, как провода, токоведущие зажимы, поддерживающая нетоковедущая арматура, а также токосъемные пластины токоприемника. В модели учитываются нелинейные характеристики материалов элементов контактной сети постоянного тока с зависимостями от температуры, неравномерный по длине износ контактного провода, а также такие факторы, как нагрев расчетных элементов солнечной радиацией и теплообмен конвекцией и лучеиспусканием. Модель позволяет рассчитывать режимы стационарного и нестационарного протекания электрического тока и описать такие варианты эксплуатационной нагрузки, как транзит тягового тока, токосъем, потребление тока при стоянке, перегрузка и короткое замыкание.

2. Математическая модель контактных соединений проводов с арматурой контактной сети и токосъемными пластинами основана на теории контакта твердых изотропных тел при упругой деформации. Расчет электрического и теплового контактного сопротивления осуществляется на основании данных о силе, с которой контактирующие тела взаимодействуют между собой, и параметров шероховатости их поверхностей. Также предусмотрен ручной ввод значений контактных сопротивлений. Таким образом, становится возможным произвести электротепловой расчет контактной сети постоянного тока с учетом дефектных элементов и определить возможность их выявления при проведении тепловизионной диагностики.

3. Разработана математическая модель расчета средней температуры токосъемных пластин, позволяющая производить оценку работы токоприемников электроподвижного состава с точки зрения тепловой нагрузки, в том числе при

токоусьеме несколькими токоприемниками. Таким образом, анализ токораспределения в контактной сети осуществляется с учетом распределения тока между токоприемниками. Математическая модель учитывает теплообмен между контактным проводом и токоусьемными пластинами, который определяется контактным нажатием, а также свойствами контактирующих поверхностей и их материалов.

4. Комплексный расчет электротепловых процессов, протекающих в контактной сети постоянного тока, позволяет произвести анализ контактной сети на наличие «узких мест» с точки зрения токовой и тепловой нагрузок. В разработанной конечно-элементной модели устранены допущения, принятые в ранее разработанных моделях электротепловых расчетов. Таким образом, предложенная в работе модель отвечает современным потребностям в анализе электротепловых процессов, происходящих в контактной сети постоянного тока. Данный анализ необходим при усилении и модернизации контактной сети в связи с возрастающими токовыми нагрузками, вызванными потребностью в повышении объемов перевозок, пропуске тяжеловесных поездов и поездов повышенной массы.

5. На основании разработанных математических моделей усовершенствована методика электротеплового расчета контактной сети постоянного тока.

6. Создана программа для ЭВМ под названием ELTECAT АВ УрГУПС, в которой реализована предложенная методика расчета. Рабочее окно программы представлено в Приложении А.

3 ВАЛИДАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

3.1 Постановка задачи для валидации методики

При валидации происходит подтверждение соответствия разработанной методики электротеплового расчета реальному физическому процессу, происходящему в контактной сети постоянного тока. Условия применения математической модели, рассмотренной во второй главе, предполагают расчет нагрева и токораспределения в топологически сложной цепи постоянного тока, состоящей из проводов круглого сечения. Таким образом, экспериментальное подтверждение соответствия результатов расчета реальным физическим процессам может быть осуществлено в лабораторных условиях на масштабной модели контактной сети.

В процессе валидации необходимо оценить влияние конструктивных особенностей контактной сети постоянного тока на распределение тока и температуры, рассмотреть режимы транзита и токосъема. При исследовании необходимо учитывать крепежные и поддерживающие элементы лабораторной установки, выступающие в качестве арматуры контактной сети. Кроме того, места локального износа контактного провода в реальной контактной сети могут быть смоделированы искусственным снижением сечения на участках контактного провода в масштабной модели.

Рассмотрение различных вариантов конструктивного исполнения контактной сети на масштабной модели контактной сети постоянного тока позволяет сократить техническое обеспечение, материальные затраты и исключить организационно-технические мероприятия, необходимые для проведения валидации на участке реальной контактной сети, без потери качества исследования. На основании испытаний масштабной модели контактной сети постоянного тока возможно сокращение числа испытаний участков реальной контактной сети, а также проведение этих испытаний в лабораторных условиях.

Уточненное исследование распределения температуры вблизи токоведущих и нетокведущих элементов контактной сети возможно только с использованием реальной арматуры и проводов контактной сети.

На основании поставленных задач проведение валидации математической модели осуществляется в два этапа:

1. Валидация на базе масштабной модели контактной сети постоянного тока, включающая в себя исследование процессов токораспределения и влияния на них различных конструктивных элементов контактной сети; исследование процессов нагрева проводов масштабной модели с учетом поддерживающих и питающих элементов лабораторного стенда;

2. Валидация на базе участка реальной контактной сети постоянного тока в лабораторных условиях, включающего в себя токоведущую и нетокведущую арматуру, а также провода контактной сети с учетом местного износа контактного провода.

Кроме того, необходимо произвести сравнение результатов расчета математической модели с уже известными экспериментальными исследованиями, произведенными ранее в области нагрева элементов контактной сети.

3.2 Лабораторная установка на базе масштабной модели для экспериментального исследования распределения тока и температуры в контактной сети постоянного тока

Лабораторная установка по исследованию процессов токораспределения и нагрева проводов контактной сети состоит из масштабной модели контактной сети, силового и измерительного оборудования.

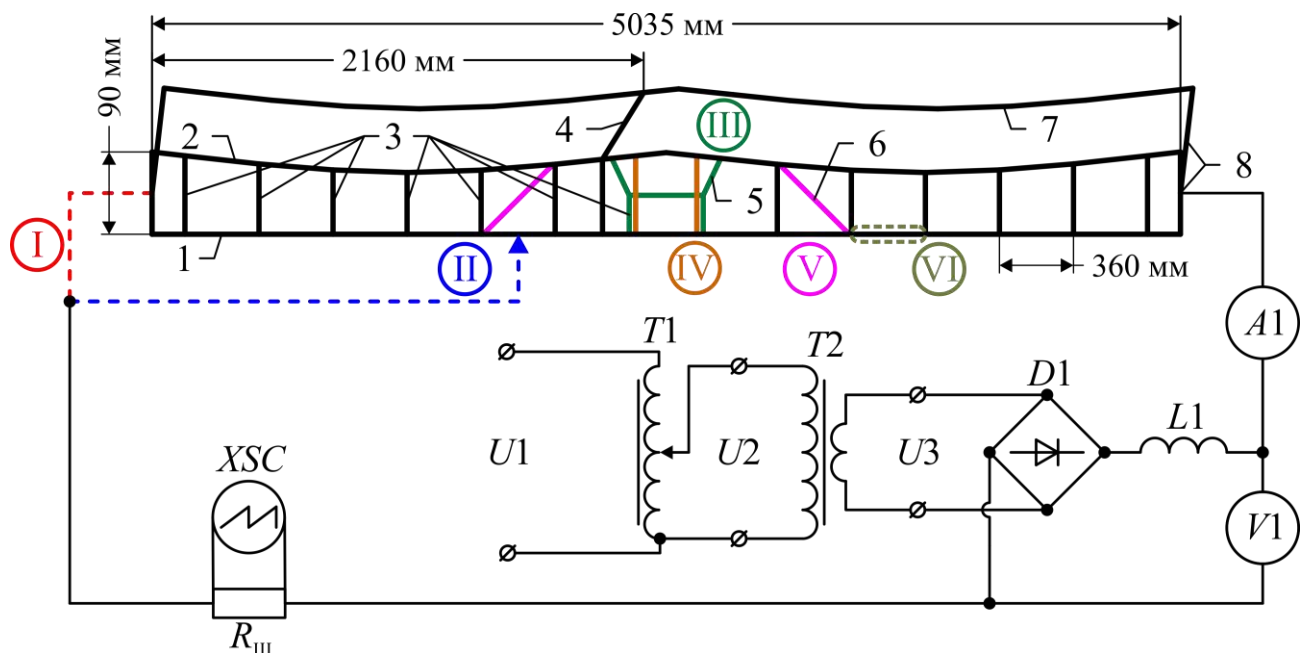
Масштабная модель контактной сети состоит из медных проводов марки ПЭТВ-2, выполненных по ТУ 16-705.110-79. Параметры проводов масштабной модели представлены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Сечения и длины проводов масштабной модели

Моделируемый провод		Количество, шт.	Диаметр, мм	Сечение, мм ²	Длина, мм
Контактный провод	КП	1	1,7	2,27	5035
Несущий трос	НТ	1	1,9	2,84	5036
Усиливающий провод	УП	1	1,9	2,84	5035
Рессорный трос	РТ	1	1,12	0,98	519
Струны	СТР	14	0,45	0,16	72..92
Трос средней анкеровки	СА	2	1,12	0,98	37
Электросоединитель	ПС	1	1,9	2,84	317
Питающие провода	ПП	2	2x1,9	4,54	90..94

Подбор сечений проводов масштабной модели осуществлялся с учетом соотношения между сечениями проводов реальной контактной сети, а также максимально допустимыми размерами лабораторного стенда, доступного для размещения в помещении лаборатории, и возможностями силового оборудования.

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на Рисунке 3.1.



I) режим транзита тягового тока; II) режим токосъема; III) конструктивное исполнение с РТ; IV) конструктивное исполнение с разнесенными струнами; V) конструктивное исполнение со СА; VI) межструновой пролет с местным износом КП; 1 – контактный провод; 2 – несущий трос; 3 – струны; 4 – поперечный электросоединитель; 5 – рессорный трос; 6 – средняя анкеровка; 7 – усиливающий провод; 8 – питающие провода

Рисунок 3.1 – Принципиальная схема лабораторной установки

Цепь питания включает в себя следующее оборудование: $T1$ – лабораторный автотрансформатор регулируемый РНО-250-2-М для регулировки тока, протекающего через масштабную модель; $T2$ – понижающий трансформатор ТДМ-401У2; $D1$ – мост из диодов ВЛ200; $L1$ – катушка индуктивности для сглаживания выпрямленного тока.

Для измерения значений электрических величин применено следующее оборудование: R_{III} – шунт 75ШСММ3 300А 0,5 для измерения общего тока, протекающего через масштабную модель; XSC – осциллограф GW Instek GDS-2102 для измерения падения напряжения на шунте R_{III} ; $A1$ – амперметр (токоизмерительные клещи) S-line EM405; $V1$ – мультиметр цифровой APPA 305. Для измерения температуры проводов применяется тепловизор Testo 881-1. Измерение температуры окружающего воздуха производится контактным термометром ТК-5.

Соединение проводов между собой осуществлено пайкой. Для проведения тепловизионных измерений на все исследуемые провода и их паяные соединения нанесено термостойкое покрытие Dali толщиной порядка 1 мкм с коэффициентом излучения $\varepsilon = 0,85$. Влияние данного покрытия на процесс охлаждения провода считается пренебрежимо малым.

Различные точки подключения питания моделируют режимы работы контактной сети в режиме транзита I или токосъема II. Исполнение масштабной модели имеет несколько вариантов топологического соединения проводов, которые отражают основные конструкционные особенности контактной сети постоянного тока. Так, под номером III представлено исполнение с рессорным тросом, IV – с разнесенными опорными струнами, V – со средней анкерровкой. Моделирование контактной подвески с участком местного износа происходит с искусственным уменьшением сечения КП в межструновом пролете IV.

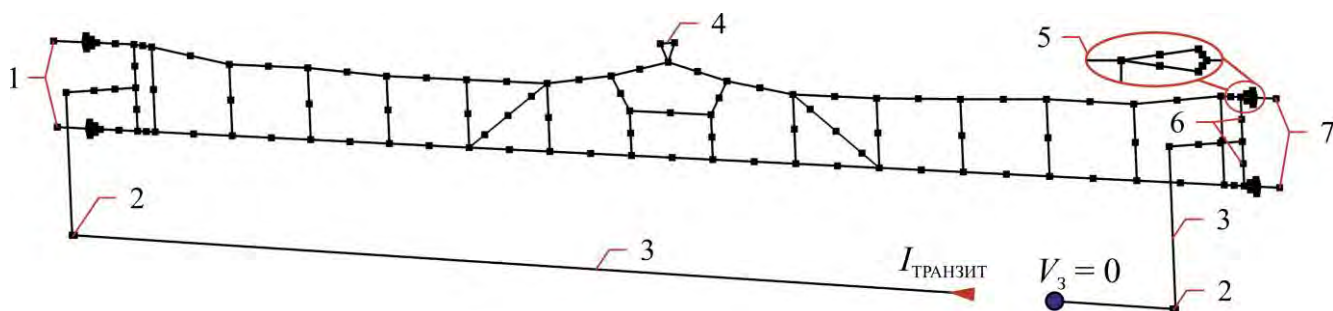
Масштабная модель содержит два пролета контактной сети. Анкерровка проводов происходит на деревянных опорах с помощью анкерных крюков HS 4x40. Натяжение проводов осуществляется талрепами, выполненными по DIN 34828. Несущий трос имеет одну точку поддержки между анкерными креплениями.

Максимальная температура проводов во время испытаний ограничена температурным индексом полиэфирного лака провода ПЭТВ-2, равного 130 °С.

Лабораторная установка предполагает естественное охлаждение проводов масштабной модели при комнатной температуре 25 ± 10 °С.

3.3 Формирование параметров масштабной модели для расчета

Провода масштабной модели при монтаже контактируют с крепежными и поддерживающими элементами, а также с питающими проводами лабораторной установки, что влияет на распределение температуры исследуемых проводов. Согласно математической модели, изложенной во второй главе, зажимы и другие элементы сосредоточенной массы при расчете преобразуются в одномерные линейные объекты с эквивалентными параметрами. На Рисунке 3.2 представлен вариант геометрии масштабной модели с РТ и СА, в которой содержатся крепежные и поддерживающие элементы, а также соединительные зажимы питающих лабораторных проводов.



- 1 – талрепы; 2 – соединительные зажимы; 3 – лабораторные провода питания; 4 – подвес несущего троса; 5 – петля анкеровки провода; 6 – питающие провода масштабной модели; 7 – анкерные крюки

Рисунок 3.2 – Расчетная геометрия масштабной модели

Граничные условия заземления $V_3 = 0$ и транзитного тока $I_{\text{ТРАНЗИТ}}$ для расчета токораспределения устанавливаются на свободных концах питающих проводов 4. Для всех проводов начальная температура T_0 задается равной температуре

окружающего воздуха T_{∞} . Величины $I_{\text{ТРАНЗИТ}}$ и T_{∞} задаются значениями, полученными в результате экспериментальных исследований.

Расчетные и экспериментальные исследования производятся в установившемся режиме.

3.4 Сравнение экспериментальных и расчетных результатов исследования масштабной модели

В ходе лабораторных испытаний были исследованы характерные конструкционные особенности контактной сети постоянного тока, согласно Рисунку 3.1, в режимах транзита и токосъема. Исследование в режиме токосъема производилось для случая одностороннего питания. Проведение исследования распределения тока в режиме токосъема производилось путем переключения одного из питающих проводов на провод, моделирующий контактный провод, с последующим измерением тока на всех участках проводов масштабной модели контактной сети. Значение тока в режим токосъема снижено до 40 А с целью обеспечения протекания тока длительное время, которое необходимо для проведения измерений. Таким образом, исследования распределения температуры в проводах масштабной модели производилось только в режиме транзита.

Измерения в режиме транзита происходят для установившегося значения температуры проводов при заданном токе $I_{\text{ТРАНЗИТ}}$. Установившимся значением температуры считается такое значение, при котором дальнейшее протекание тока вызывает изменение температуры не более чем на $\Delta T = 0,5$ °С за 10 минут [76].

Сравнению с результатами расчета подвергались значения температуры и тока в зависимости от пространственной координаты. Варианты лабораторных испытаний сведены в Таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Варианты лабораторных испытаний

№ опыта	Режим работы	Конструктивное исполнение					Основные регистрируемые параметры			
		СА	РТ	ОС	УП	ПС	Общий ток ΣI , А	ΔI , А	Температура T_{MAX} , °С	ΔT , °С
1	Транзит	✓	✓	–	✓	✓	102,6	0,2	74,8	1,74
2		✓	–	✓	✓	✓	123,6	0,24	–	–
3		–	✓	–	–	–	80	0,08	94,3	1,53
4		✓	–	✓	–	–	80,8	0,29	101,3	2,72
5		✓	✓	–	–	–	81	0,24	97,1	2,06
6		–	–	✓	–	–	80	0,09	89,5	2,3
7	Токосяем	✓	✓	–	–	–	40,5	0,16	–	–
8		✓	–	✓	–	–	40,2	0,16	–	–
9		✓	✓	–	✓	✓	40	0,26	–	–
Общее количество измерений, шт.						1090		281		
Средняя абсолютная погрешность:						0,19		2,1		

Значение температуры проводов масштабной модели определялось по анализу термограмм. На Рисунке 3.3 представлена термограмма установившейся температуры вблизи узла крепления СА к НТ для варианта конструктивного исполнения с РТ и СА при токе 80 А и температуре окружающего воздуха 25,5 °С.

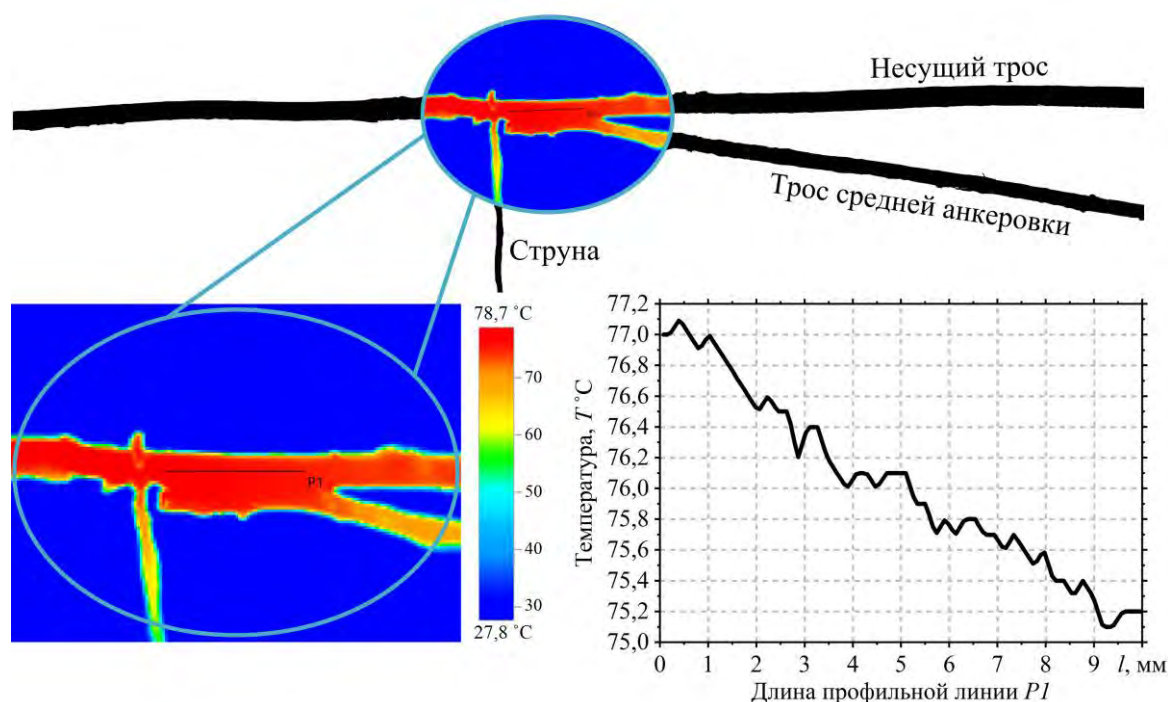


Рисунок 3.3 – Термограмма и температурный профиль НТ в зоне крепления СА

На Рисунках 3.4–3.10 представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных тока и температуры проводов масштабной модели для различных конструктивных исполнений контактной сети в режимах транзита и токосъема.

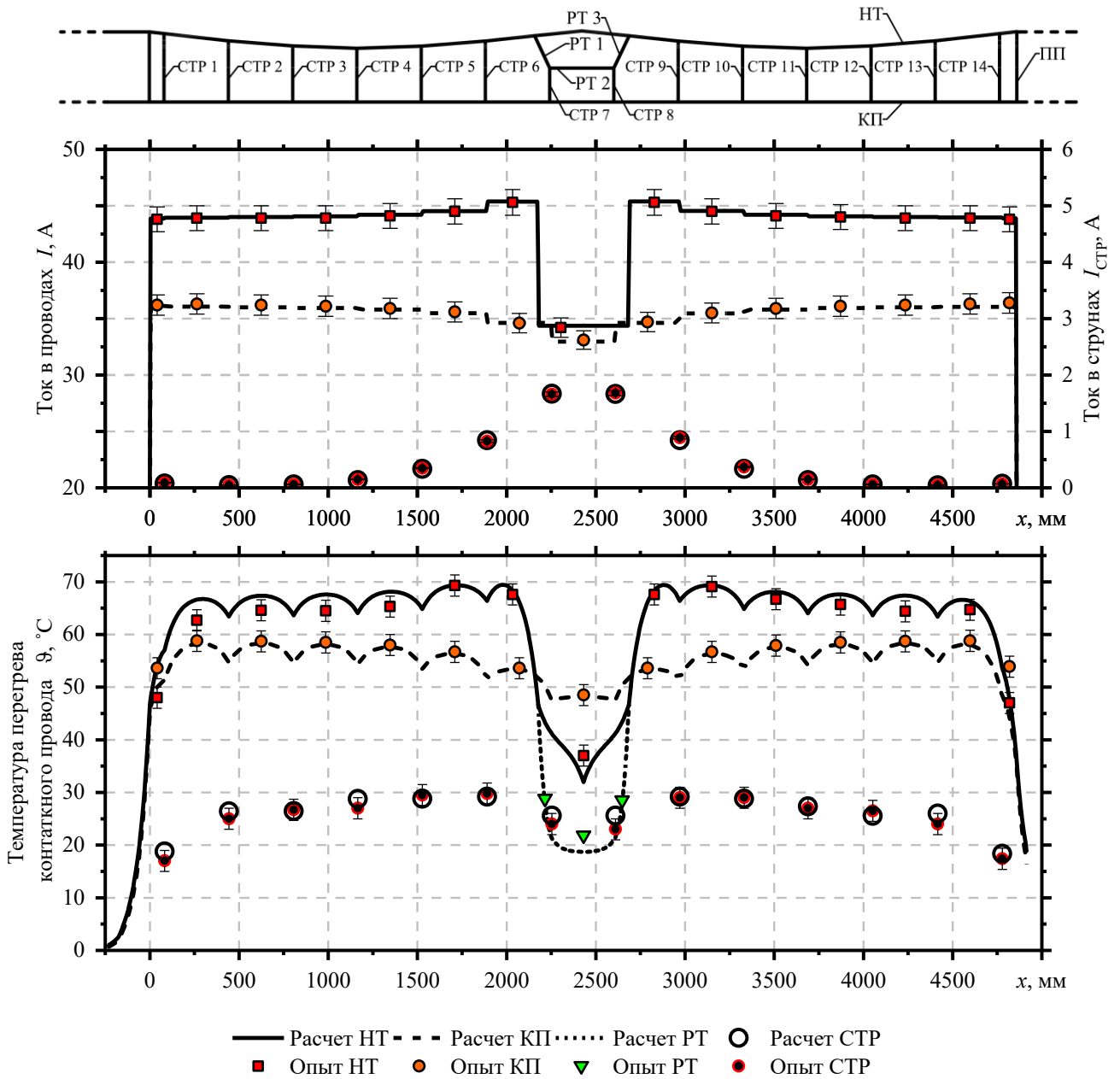


Рисунок 3.4 – Ток и температура перегрева проводов для конструктивного исполнения с РТ в режиме транзита 80 А

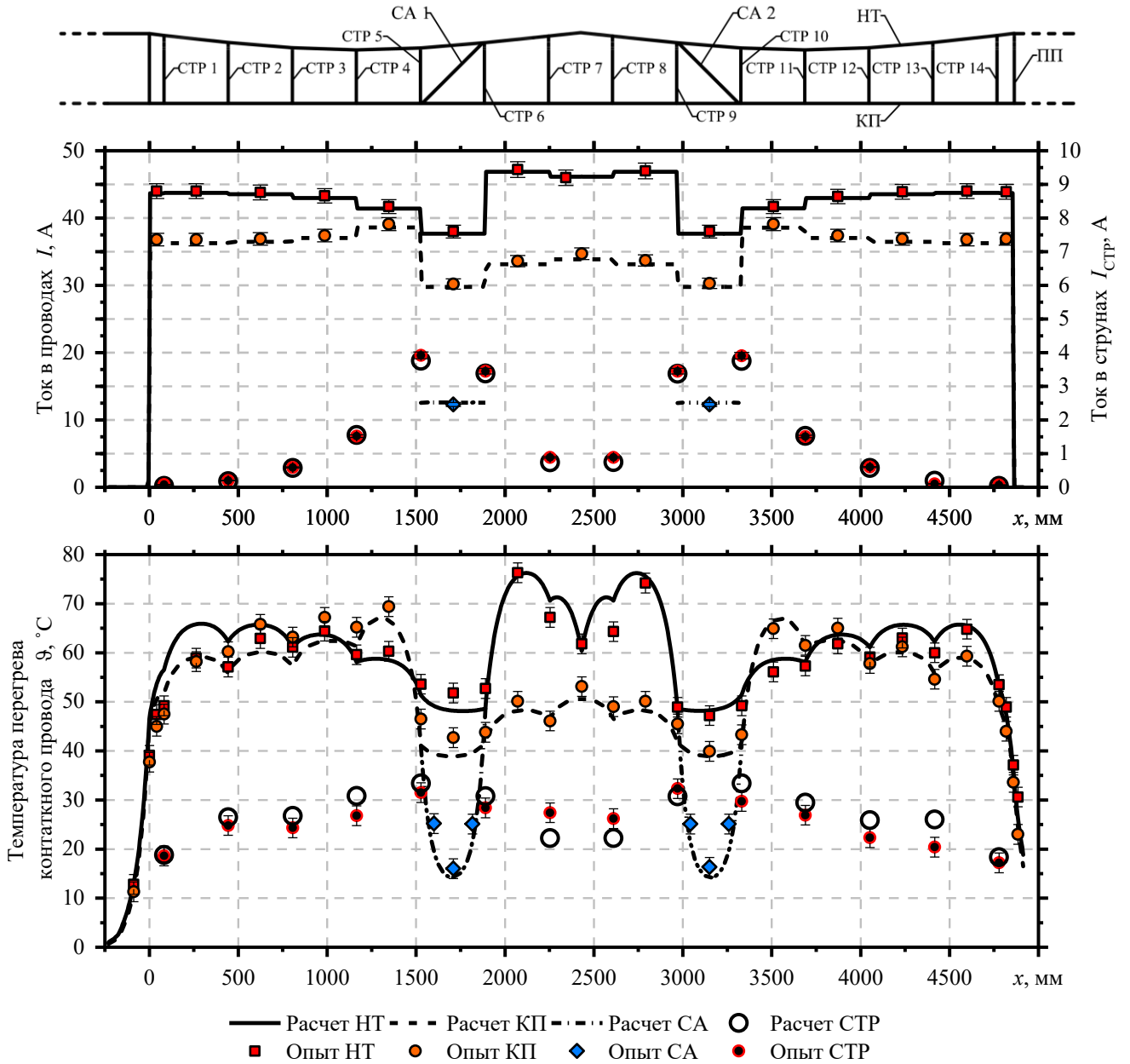


Рисунок 3.5 – Ток и температура перегрева проводов для конструктивного исполнения со СА в режиме транзита 80,8 А

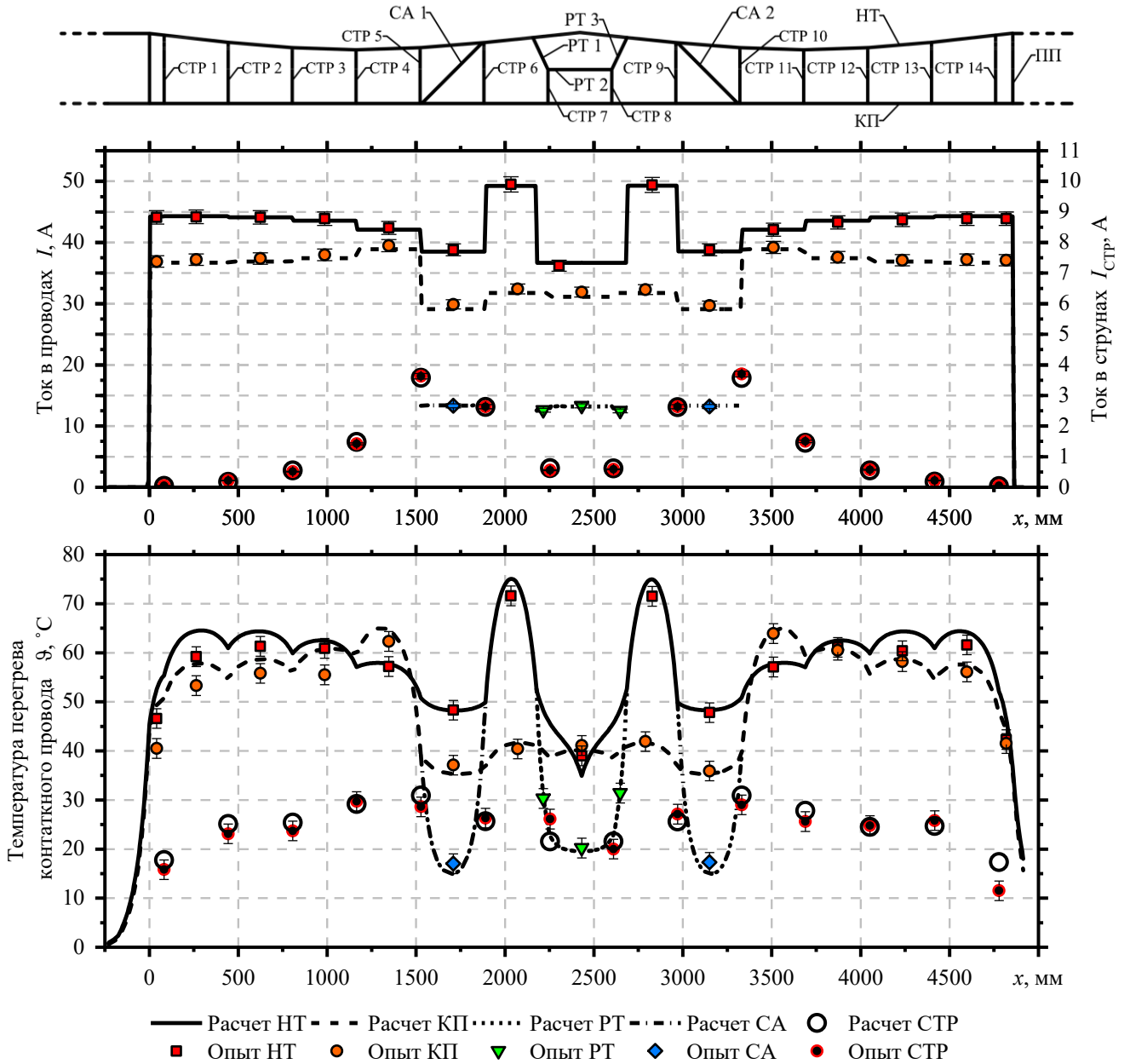


Рисунок 3.6 – Ток и температура перегрева проводов для конструктивного исполнения с РТ и СА в режиме транзита 81 А

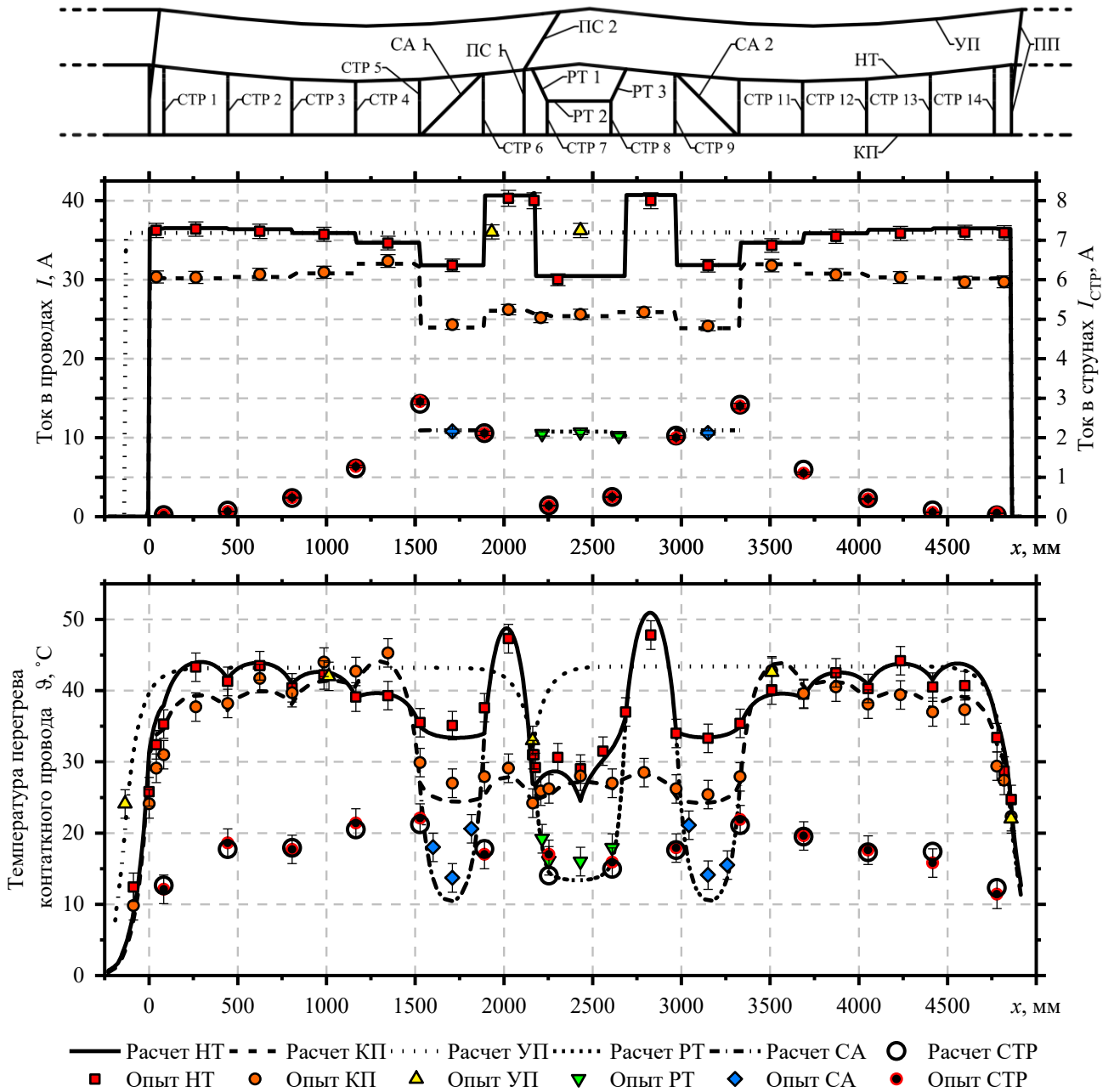


Рисунок 3.7 – Ток и температура перегрева проводов для конструктивного исполнения с PT, CA и УП в режиме транзита 102,62 А

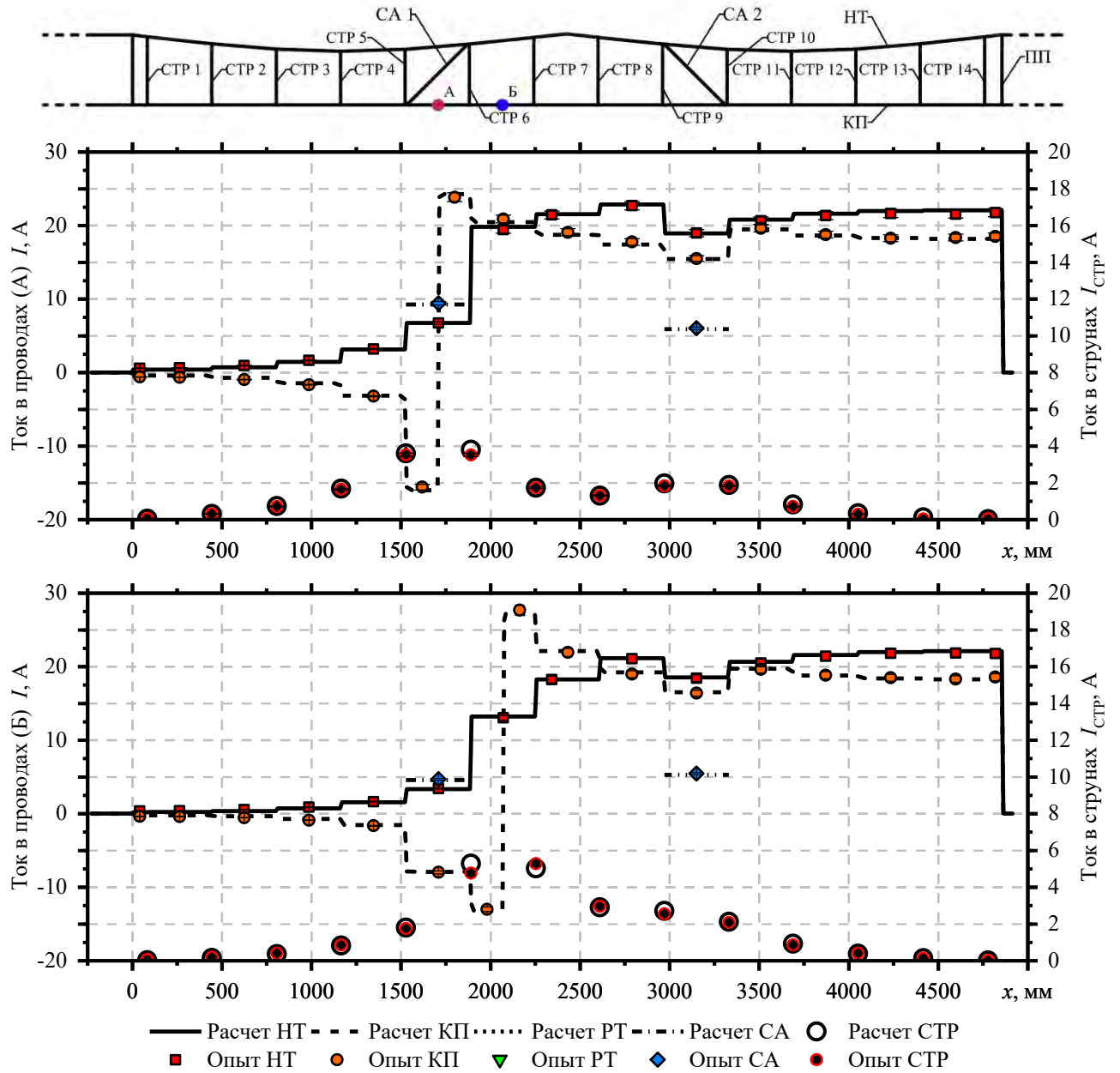


Рисунок 3.8 – Ток в продольных проводах и струнах для конструктивного исполнения со СА в режиме токосяема 40,3 А

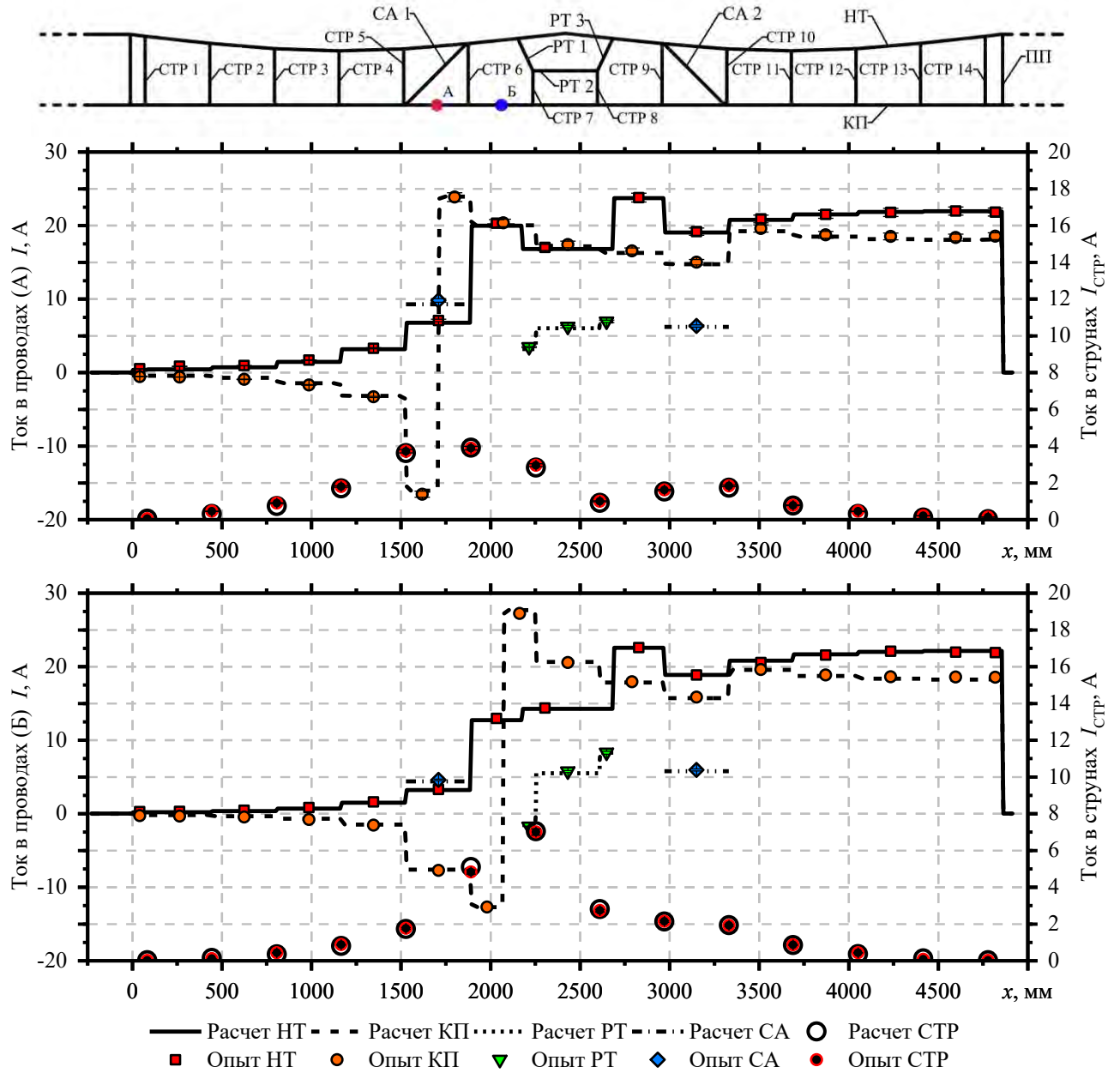


Рисунок 3.9 – Ток в продольных проводах и струнах для конструктивного исполнения с РТ и СА в режиме токосяема 40,3 А

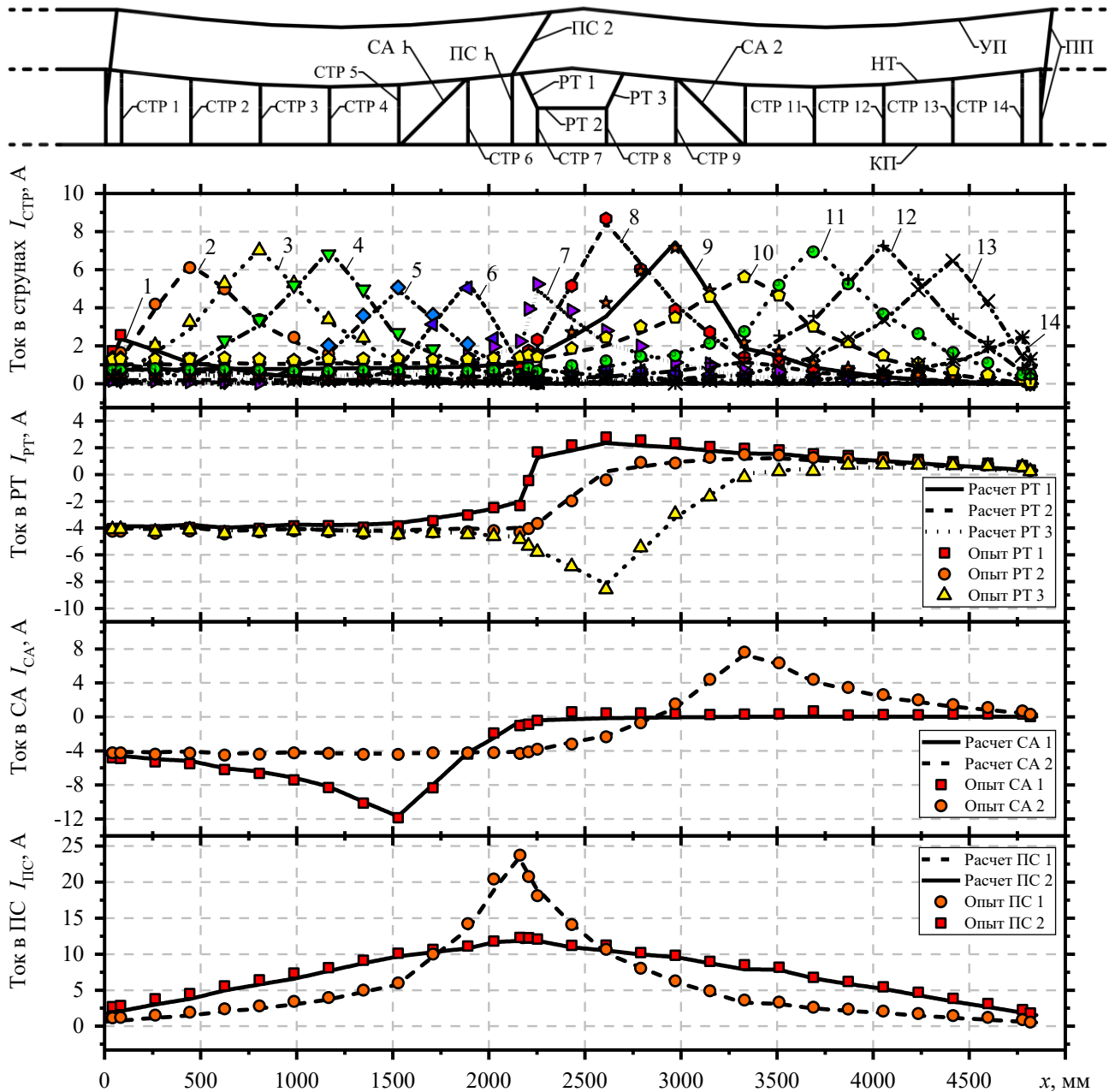


Рисунок 3.10 – Ток в поперечных проводах в режиме токосяема 40 А

Сравнение температуры струн производилось для точки в середине струны.

Для конструктивного исполнения масштабной модели с разнесенными опорными струнами, состоящей из КП и НТ, распределение тока стремится к естественному токораспределению. При общем токе 80 А значение тока в струнах не превышает 72 мА, что меньше 0,1 %.

При добавлении РТ (Рисунок 3.4) происходит шунтирование НТ с соответствующим увеличением поперечного сечения подрессоренного участка НТ. Данное увеличение поперечного сечения влечет за собой перераспределение тока, при котором часть тока из КП по струнам перетекает в НТ. Данное локальное перераспределение тока вызывает увеличение тока в НТ до 3,42 %. Ток в рессорных струнах достигает 2,08 % от транзитного тока. Так как участок НТ с повышенной токовой нагрузкой находится вблизи РТ, то поток тепла направлен в менее нагретые участки РТ и в зашунтированную часть НТ. В результате изменение температуры участка с увеличенной токовой нагрузкой перед РТ происходит на 3 % относительно нагрева провода без РТ. Следует ожидать, что для реальной контактной сети участок НТ перед РТ будет перегреваться выше вследствие меньшего влияния теплоотвода в РТ и зашунтированную часть НТ из-за различного соотношения длин и диаметров проводов.

При конструктивном исполнении контактной сети со СА (Рисунок 3.5) участок КП зашунтирован НТ и часть тока из КП через СА перетекает в НТ. Увеличение токовой нагрузки НТ на участке между креплениями СА составляет 7,28 %, а увеличение температуры перегрева происходит на 14,76 %. При этом для реальной контактной сети температуру перегрева также, как и в случае с РТ, следует ожидать выше, чем на масштабной модели из-за различного соотношения длин и диаметров проводов.

Конструктивное исполнение контактной подвески с РТ и СА (Рисунок 3.6) объединяет в себе особенности токораспределения участков с РТ и СА по отдельности. На участке НТ между креплениями РТ и СА происходит увеличение токовой нагрузки на 11,34 %, а температура перегрева увеличивается на 16,43 %.

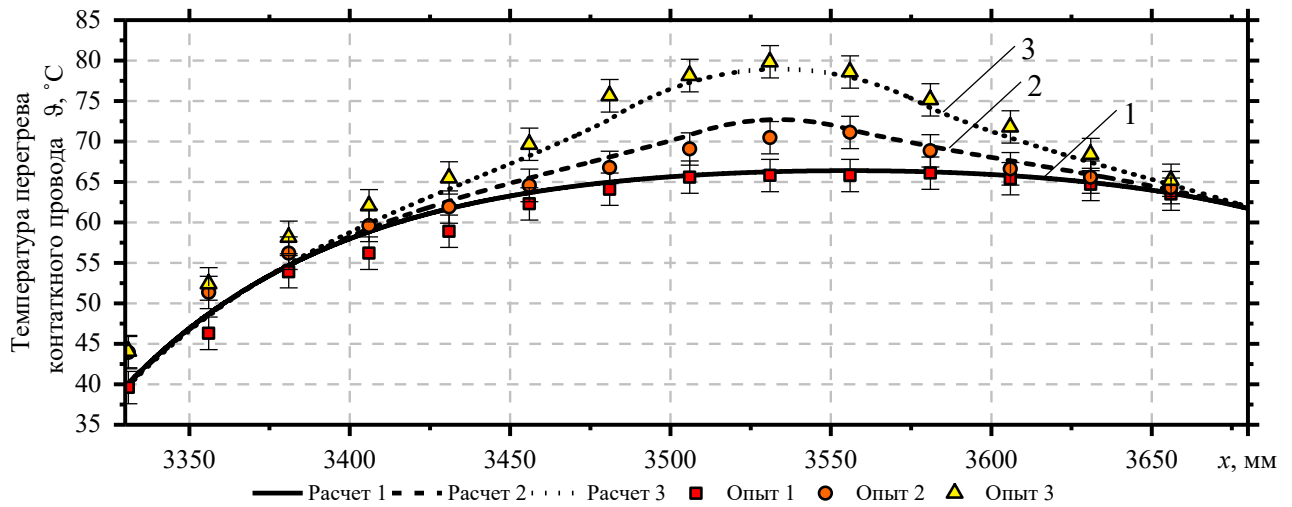
В режиме транзита наличие УП (Рисунок 3.7) незначительно влияет на токораспределение. Часть тепла из НТ, КП и УП направлена к ненагруженному ПС. В месте крепления ПС наблюдается снижение температуры проводов, в том числе участка НТ с увеличенной токовой нагрузкой. Данное явление характерно для масштабной модели. В реальной контактной сети теплоотвод от продольных проводов в ненагруженный ПС будет оказывать влияние на относительно меньшем участке

длины проводов из-за отличного соотношения длин и диаметров проводов от аналогичных в масштабной модели.

Из Рисунков 3.8–3.10 видно, что в режиме токосъема трос СА шунтирует струну, ближайшую к месту крепления СА на КП. Из Рисунка 3.10 видно, что пик токовой нагрузки в тросе СА и ПС сопровождается снижением нагрузки на ближайшие струны. Наличие РТ в масштабной модели снижает длину и сопротивление рессорных струн и тем самым повышает их токовую нагрузку. В масштабной модели длина рессорной струны составляет 47 мм, а длина ближайшей не рессорной струны – 72 мм. Так, из Рисунка 3.10 видно, что ток в рессорной струне под номером 8 является максимальным, при этом ток в струнах удаленных от РТ и СА в среднем на 16 % ниже. Снижение тока в струнах под номером 5 и 10 обусловлено шунтированием тросом СА. Струны под номером 6 и 7 шунтированы ПС. Следует обратить внимание, что расстояние от ПС до струны 7 составляет порядка трети межструнового пролета (91 мм), а до струны 6 – две трети межструнового пролета (272 мм), при этом максимальная токовая нагрузка струны 7 составляет 90 % от максимальной токовой нагрузки струны 6. Это также свидетельствует о повышенной нагрузке на рессорные струны относительно не рессорных струн. Следует ожидать, что нагрузка на рессорные струны в реальной контактной сети будет ниже, чем в масштабной модели, так как геометрия рессорного узла реальной контактной сети предполагает длину струн, сопоставимую с длиной ближайшей струны. Из Рисунков 3.8 и 3.9 видно, что нагрузка при токосъеме в точке Б на разнесенную опорную струну 7 ниже, чем на аналогичную рессорную струну вследствие большей длины и большего сопротивления. Для реальной контактной сети следует ожидать аналогичное снижение нагрузки на разнесенные опорные струны из-за их повышенной длины относительно других струн в пролете.

Наибольшая токовая нагрузка на КП приходится на межструновой пролет перед креплением троса СА, что следует из Рисунков 3.5–3.7. Согласно схеме, изображенной на Рисунке 3.1, рассмотрим влияние локального износа КП на данном участке (конструктивное исполнение VI) при различном износе. Локальный участок износа КП имеет характерные параметры по длине участка износа и

оставшемуся сечению КП. На Рисунке 3.11 представлена зависимость температуры КП в межструновом пролете с различным износом.



1 – износ 14 % на участке длиной $l_{и} = 10$ мм; 2 – износ 20 % на участке длиной $l_{и} = 50$ мм;
3 – износ 23 % на участке длиной $l_{и} = 100$ мм

Рисунок 3.11 – Сравнение температуры перегрева КП в межструновом пролете с локальным износом

Перегрев КП на участке локального износа малой длины оказывается незначительным из-за кондуктивного отвода тепла к неизношенным участкам провода. Так, по результатам расчета при 14 %-ном местном износе КП длиной 10 мм, что составляет 2,8 % длины межструнового пролета, отличие превышения температуры по сравнению с аналогичным неизношенным участком КП составляет 0,9 °C. Таким образом, перегрев малого участка износа скомпенсирован кондуктивным теплоотводом. При увеличении длины износа происходит повышение тепла, выделяемого на изношенном участке, что ведет к большим значениям температуры перегрева.

Локальный износ КП увеличивает сопротивление участка, что влияет на токораспределение в контактной сети. В случае 1 (износ 23 % на участке 100 мм) доля тока в НТ на межструновом пролете с износом увеличилась на 0,7 А (на 1,6 %) с соответствующим увеличением температуры перегрева на 2,2 °C (на 3,6 %).

Отклонения между расчетными и экспериментальными значениями тока и температуры в масштабной модели были объединены в выборки для определения закона распределения величины отклонения данных эксперимента от данных расчета по разработанной математической модели. В результате проверки гипотезы об экспоненциальном законе распределения с помощью критерия Пирсона с уровнем значимости 0,05 были получены следующие значения: при числе степеней свободы $k = 8$ наблюдаемое значение для тока $\chi^2_{\text{набл}} = 10,07$ ($\chi^2_{\text{крит}} = 15,51$); при числе степеней свободы $k = 7$ для температуры $\chi^2_{\text{набл}} = 9,12$ ($\chi^2_{\text{крит}} = 14,07$). Гистограммы распределения отклонений для тока и температуры, а также теоретические кривые распределения величины отклонений представлены на Рисунке 3.12. Математическое ожидание выборки полученных значений расхождения по температуре и току составило 2,1 °С и 0,19 А соответственно, а среднеквадратическое отклонение – 1,79 °С и 0,17 А. Полученные отклонения измеренных значений от результатов расчета сопоставимы с погрешностями измерений приборов. Проверка выборки отклонений тока для поперечных проводов (Рисунок 3.10) на нормальный закон распределения осуществлялась с помощью обобщенного критерия Д'Агостино K^2 [127–129], показатель которого для выборки равен 3,91 при p -значении 0,14 (Рисунок 3.13).

Для токовых клещей EM-405 точность измерений при температуре 23 ± 5 °С составляет $\pm (2,5 \%$ отсчета + 5 единиц счета) при разрешении 0,1 А в диапазоне от 40 до 100 А и с разрешением 0,01 А в диапазоне до 40 А. Продольные провода СА и РТ имеют минимальное значение тока в режиме транзита, которое достигает 10 А (опыт №1, Рисунок 3.7). Таким образом, минимальная токовая погрешность для продольных проводов составляет $\pm 0,2-0,3$ А, что в пределах полученных статистических отклонений. Для поперечных проводов в режиме токосъема (Рисунок 3.10) ток в струнах достигает значений 8 А ($\pm 0,15-0,25$ А), а в поперечном электросоединителе и средней анкеровке – 25 А ($\pm 0,575-0,675$ А) и 12 А ($\pm 0,25-0,35$ А) соответственно. Среднее значение отклонения тока для поперечных проводов в режиме токосъема составило 0,256 А, что также в пределах погрешности измерительного прибора.

Для тепловизора Testo 881-1 погрешность измерений составляет $\pm 2^\circ\text{C}$ или $\pm 2\%$ (большее значение), что в пределах полученного отклонения – $2,1^\circ\text{C}$ для всех вариантов опытов. Следует отметить, что дополнительная погрешность возникает вследствие сложности тепловизионной съемки проводов малого диаметра.

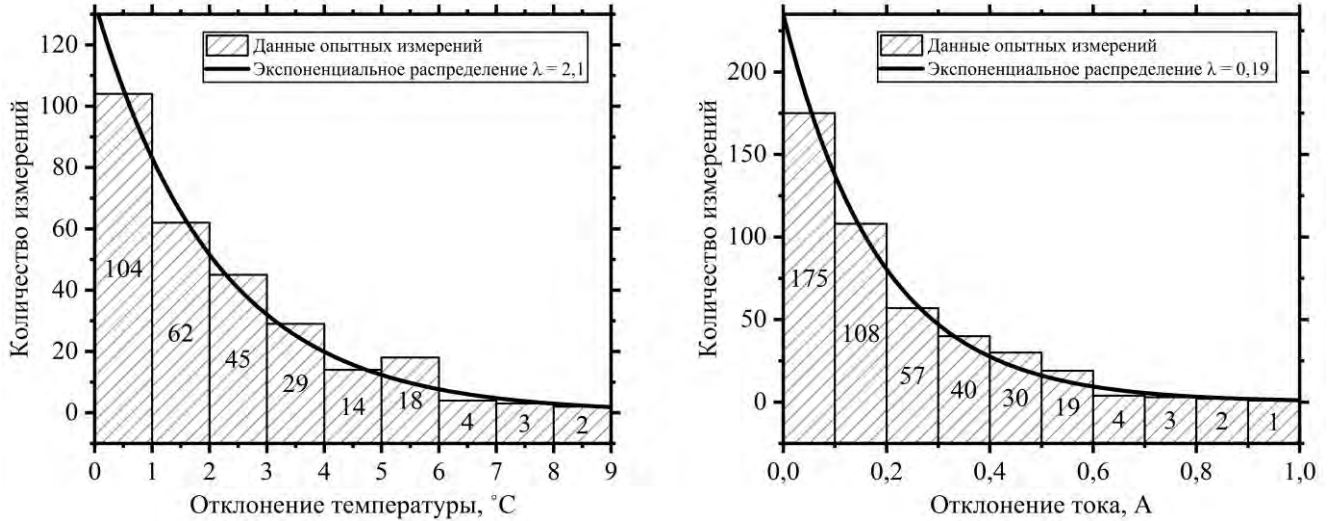


Рисунок 3.12 – Распределение отклонений экспериментальных значений от расчетных для тока и температуры проводов масштабной модели

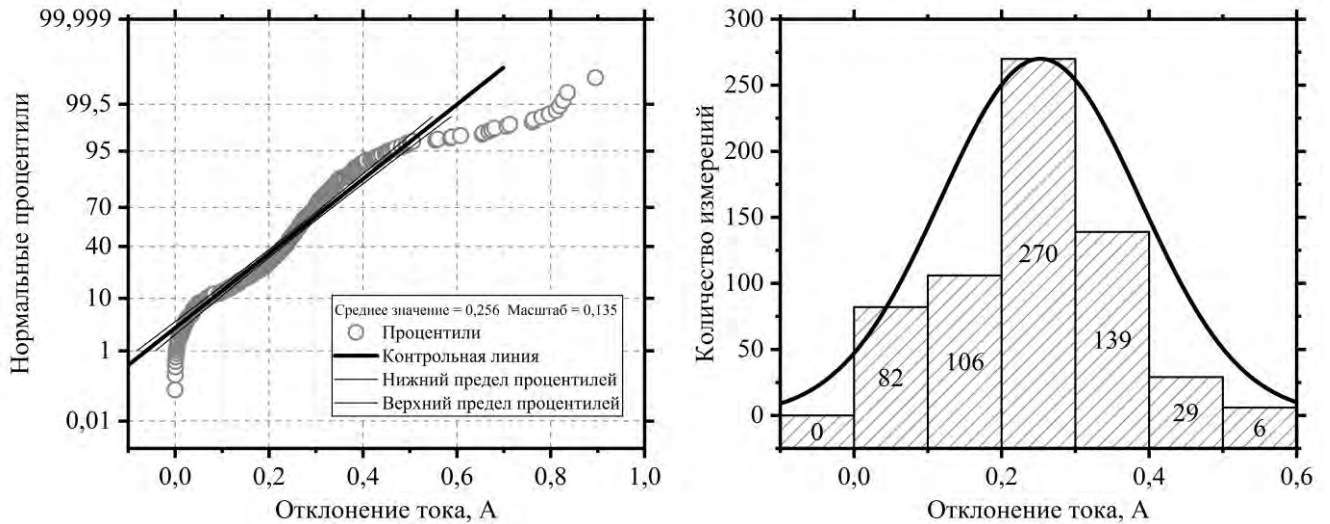


Рисунок 3.13 – Распределение отклонений экспериментальных значений от расчетных для поперечных проводов масштабной модели в режиме токосъема

Экспоненциальный закон распределения выборок отклонений результатов экспериментальных данных от расчетных с математическим ожиданием, близким к инструментальной погрешности приборов, свидетельствуют о преобладании инструментальной погрешности над другими типами погрешностей. Погрешности, вызванные иными причинами (неправильной установкой приборов, влиянием внешних величин, погрешностями метода, субъективными систематическими погрешностями), присутствуют в результатах испытаний в меньшей мере, а их выявление и устранение не представляется возможным.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что математическая модель электротеплового расчета соответствует реальному физическому объекту в рамках области предполагаемого использования данной модели, а именно электротепловому расчету контактной сети постоянного тока.

3.5 Лабораторная установка для экспериментального исследования распределения тока и температуры в элементах контактной сети

Исследуемый участок цепной контактной подвески состоит из проводов ПБСМ-70 + МФ-100. Звеньевые струны выполнены из проволоки БСМ-4, поперечный электросоединитель выполнен проводом МГ-95. Питающие провода выполнены двойными из провода МГ-70 и подключаются с помощью питающих зажимов GPH 16-150 2KU. На участке содержится следующая арматура контактной сети: седло одинарное под серьгу КС-008, зажим соединительный КС-055, зажим питающий КС-053, зажим струновой КС-046, зажим фиксирующий КС-049, зажим стыковой контактного провода КС-059.

На Рисунке 3.14 изображен исследуемый участок контактной сети.

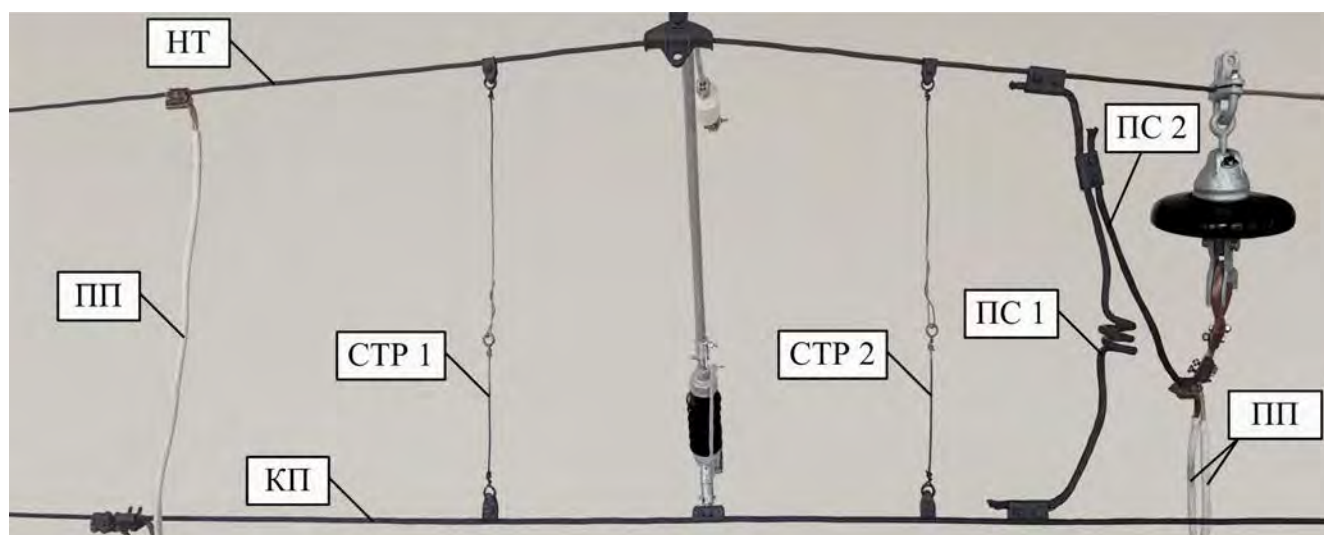


Рисунок 3.14 – Исследуемый участок контактной сети

На исследуемом участке выполнена изоляция струн. В звенья струн установлены изолирующие пластины из полиэтилентерефталата. Аналогичная операция выполнена для фиксатора изолированной консоли. Данная процедура позволяет исключить процессы перераспределения тока в рассматриваемых элементах при исследовании распределения температуры вблизи токоведущей и нетокведущей арматуры контактной сети при заданных значениях тока. В процессе эксперимента по исследованию распределения температуры участок несущего троса и участок контактного провода исследовались отдельно. Разделение участков исследования обусловлено различными значениями длительно допустимого тока проводов для нагрева их до максимально допустимой температуры, а также ограничением мощности питающего оборудования. Принципиальная схема лабораторной установки по исследованию распределения температуры вблизи арматуры контактной сети изображена на Рисунке 3.15.

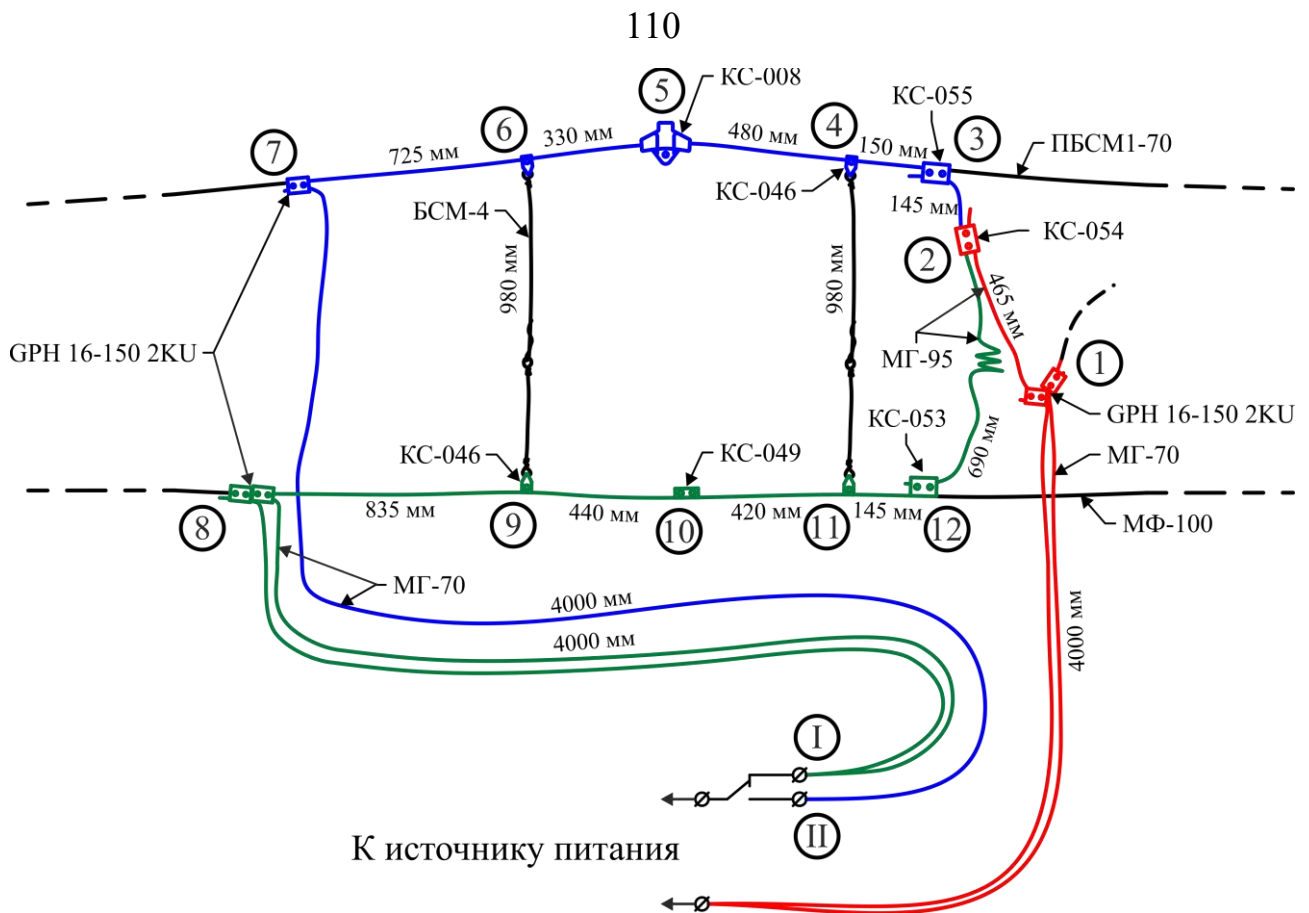


Рисунок 3.15 – Принципиальная схема участка контактной сети при исследовании распределения температуры

Цепь питания включает в себя лабораторный автотрансформатор регулируемый РНО-250-2-М для регулировки тока и понижающий трансформатор ТДМ-401У2.

Для измерения значений электрических величин применено следующее оборудование: миллиомметр цифровой GW Instek GOM-802 для измерения переходного сопротивления зажимов; токоизмерительные клещи Sonel CMP-1000; мультиметр цифровой APPA 305. Измерение температуры проводов осуществляется тепловизором Testo 881-1. Измерение температуры окружающего воздуха производится контактным термометром ТК 5.

Исследование распределения тока осуществлялось согласно схеме, изображенной на Рисунке 3.16.

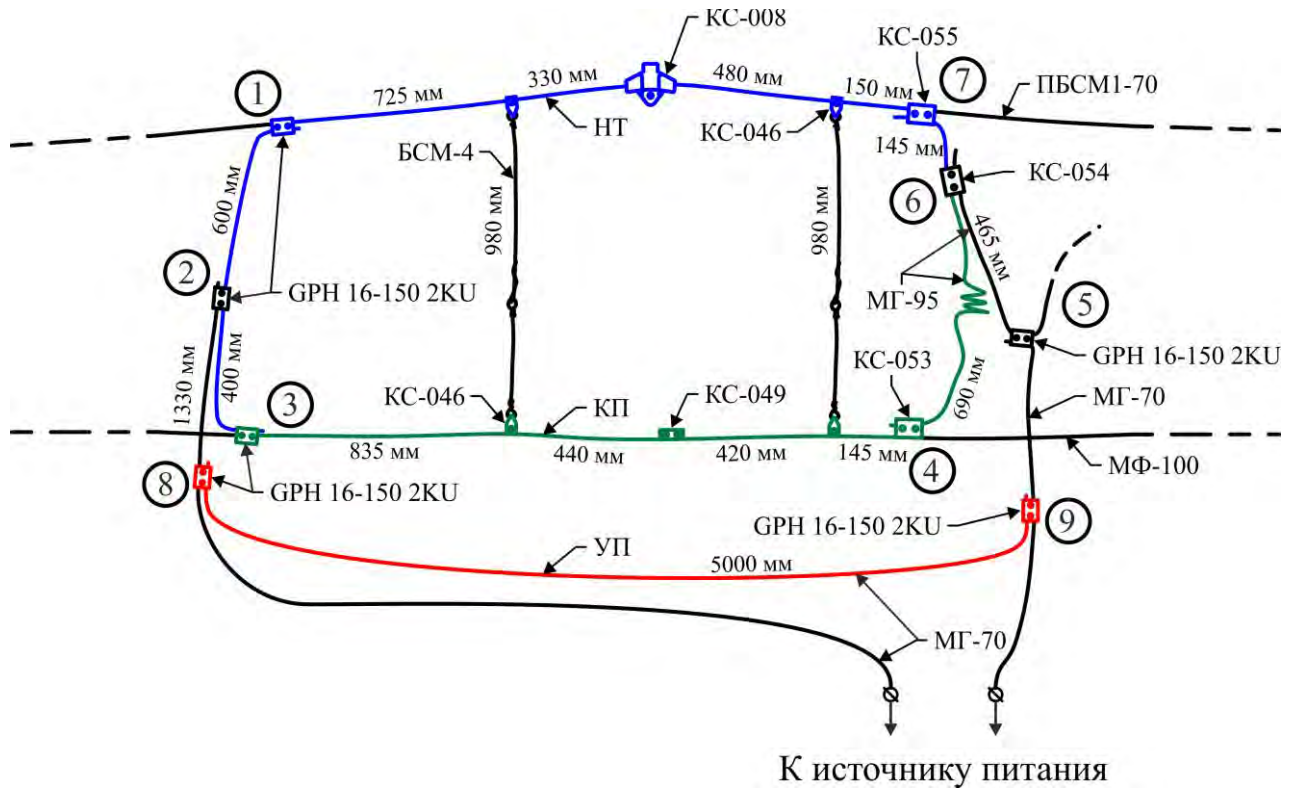


Рисунок 3.16 – Принципиальная схема участка контактной сети при исследовании распределения тока

Исследование распределения тока производилось с учетом УП и без него. Включение УП в схему осуществлялось соответствующими зажимами 8 и 9.

Принципиальная схема исследования нагрева контактного провода вблизи места местного износа изображена на Рисунке 3.17.

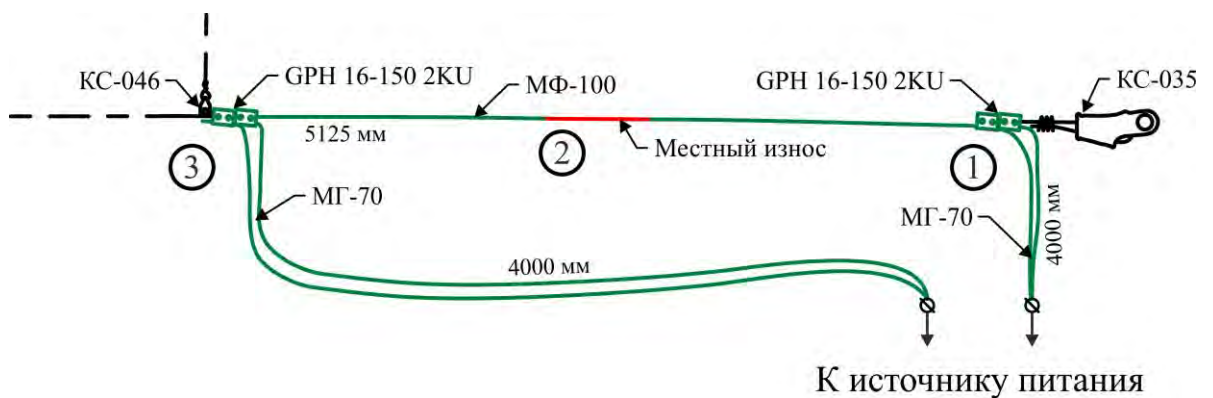


Рисунок 3.17 – Принципиальная схема исследуемого участка контактного провода с местным износом

Проведение испытаний производится для несущего троса, состоящего из участков 1-2-3-4-5-6-7, и контактного провода, состоящего из участков 1-2-8-9-10-11-12 (Рисунок 3.15). Переход между испытаниями осуществляется посредством переключения между режимами I и II. Испытания нагрева контактного провода вблизи места местного износа происходит на участке 1-2-3 (Рисунок 3.17).

Из принципиальных схем, изображенных на Рисунках 3.15 и 3.17, а также на основании режимов их работы видно, что на исследуемых участках не происходит процесса распределения тока между проводами контактной сети, так как струны являются изолированными. В связи с отсутствием процесса токораспределения исследование нагрева проводов и арматуры контактной сети может быть осуществлено без выпрямительной установки при измерении действующего значения тока I_{RMS} , протекающего в цепи вторичной обмотки понижающего трансформатора.

Для проведения тепловизионных измерений на исследуемые провода и арматуру контактной сети нанесено термостойкое покрытие Dalі толщиной 1 мкм с коэффициентом излучения $\varepsilon = 0,85$. Влияние данного покрытия на процесс охлаждения провода считается пренебрежимо малым.

Максимальная температура проводов ограничена требованиями соответствующей нормативно технической документации [74; 76; 78; 79] и составляет для НТ и струн – 120 °С, для КП – 80 °С, для ПС и ПП – 90 °С.

Лабораторная установка предполагает естественное охлаждение проводов масштабной модели при комнатной температуре 25 ± 10 °С.

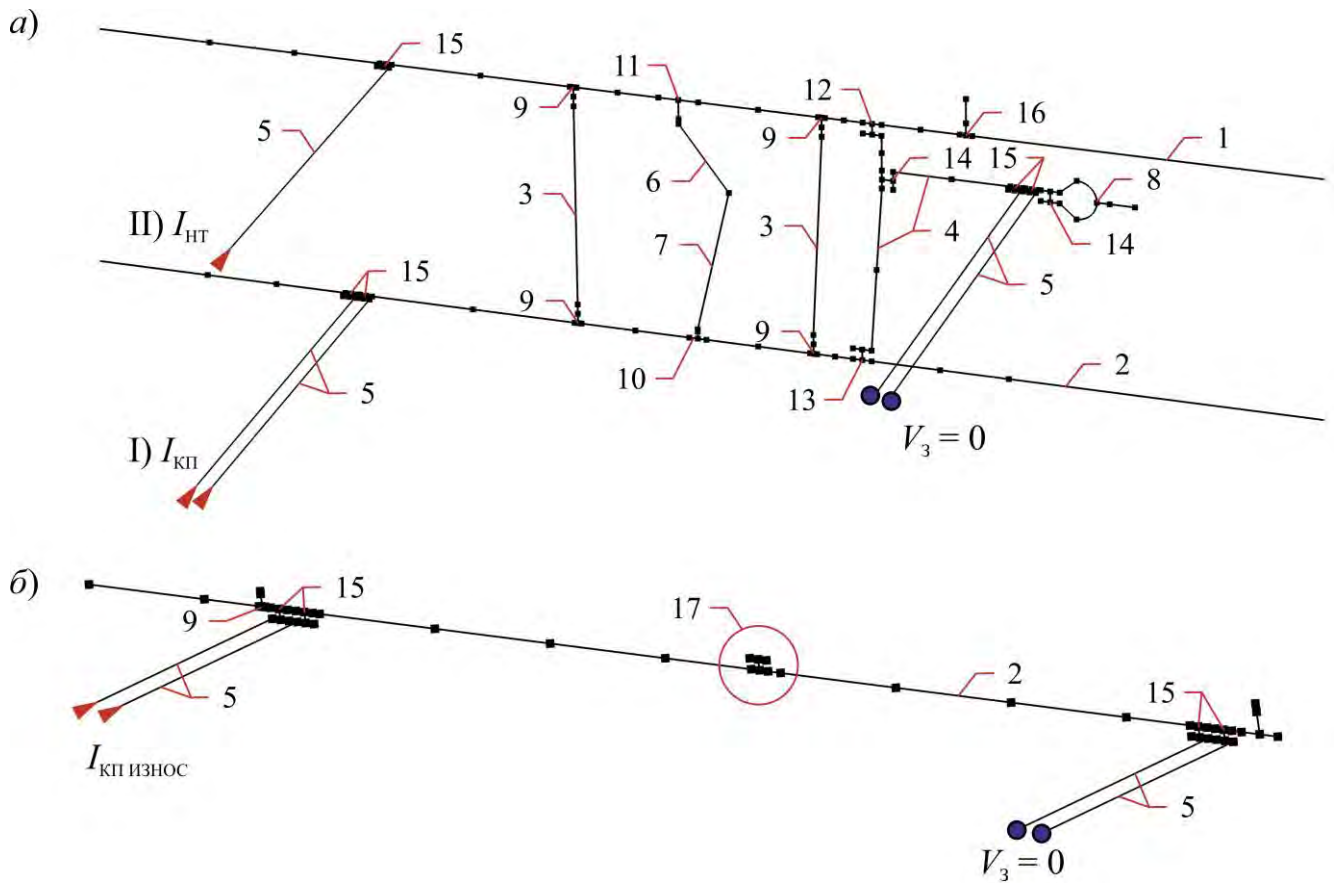
3.6 Формирование параметров модели участков контактной сети для проведения расчета

Формирование геометрии расчетного участка происходит с учетом токоведущей и нетокведущей арматуры контактной сети. На Рисунке 3.14 видно, что вблизи питающего зажима несущего троса расположен хомутовый зажим для крепления изолятора, а вблизи лабораторных питающих зажимов находится коуш вилочный под серьгу для крепления отходящего провода ПС. Несмотря на то, что

данные элементы располагаются вне участка, по которому протекает электрический ток, они учувствуют в процессе нагрева проводов, принимая часть тепла от нагретого участка контактной сети, находящейся под токовой нагрузкой. Также в расчете учтены конструктивные элементы консоли, участвующие в отводе тепла от нагретых элементов. В звеньях струн и ушке фиксатора задано повышенное электрическое сопротивление, соответствующее установленным изоляционным вставкам. Для контактного провода с местным износом задана функция зависимости сечения контактного провода от его длины, которая описывает износ на заданном участке. Участок износа имеет два характерных параметра: величину износа контактного провода и длину участка износа, заданные по результатам экспериментальных значений данных параметров. Расчетная геометрия исследуемых участков контактной сети изображена на Рисунке 3.18.

Граничные условия заземления $V_3 = 0$ и токов I_{HT} и $I_{КП}$ для нагрева проводов задаются на свободных концах питающих проводов 5. Переключение между режимами нагрева контактного провода I или несущего троса II осуществляется сменой приложения источника токовой нагрузки. Для всех проводов начальная температура T_0 задается равной температуре окружающего воздуха T_∞ . Величины I_{HT} , $I_{КП}$ и T_∞ задаются в соответствии с измеренными значениями по результатам испытаний.

Расчет производится как в установившемся режиме, так и во временной области с учетом нагрева и охлаждения проводов и зажимов.



а) участок контактной сети; б) участок КП с местным износом; 1 – НТ; 2 – КП; 3 – струны; 4 – ПС; 5 – ПП; 6 – кронштейн консоли; 7 – фиксатор; 8 – коуш вилочный под серьгу КС-006; 9 – зажим струновой КС-046; 10 – зажим фиксирующий КС-049; 11 – седло одинарное под серьгу КС-008; 12 – зажим питающий для несущего троса КС-055; 13 – зажим питающий для контактного провода КС-053; 14 – зажим соединительный КС-054; 15 – питающий зажим ГРН 16-150 2КУ; 16 – зажим хомутовый КС-039; 17 – участок местного износа КП с зажимом КС-053; 18 – зажим клиновой для серьги КС-035

Рисунок 3.18 – Расчетная геометрия масштабной модели

3.7 Сравнение экспериментальных и расчетных результатов исследования участка контактной сети

Исследование распределения тока производилось согласно схеме, изображенной на Рисунке 3.16, с учетом УП (опыт №3) и без него (опыты №1 и №2). При исследовании в опыте №1 были выявлены повышенные переходные сопротивления у зажимов 3 и 7, вызванные оксидными пленками. В опыте №2 представлены результаты распределения тока после переборки болтовых соединений 2, 3 и 7 с

зачисткой контактных поверхностей, после чего произошло изменение в перераспределении тока между продольными проводами.

В Таблицах 3.3 и 3.4 представлены результаты распределения тока в проводах контактной сети и измерений переходных сопротивлений соответственно.

Таблица 3.3 – Распределение тока в проводах контактной сети

Провод	Опыт №1	Расчет №1	Опыт №2	Расчет №2	Опыт №3	Расчет №3
НТ	40,4	40,25	32,8	31,25	16,3	15,95
КП	60,5	59,75	68,9	68,81	35,4	35,13
УП	–	–	–	–	50,9	51,73

Таблица 3.4 – Результаты измерения переходных сопротивлений на участке контактной сети

Номер зажима (рис. 3.16)	Опыт №1			Опыт №2			Опыт №3		
	$I_{зжм},$ А	$U_{зжм},$ мВ	$R_{пер},$ мкОм	$I_{зжм},$ А	$U_{зжм},$ мВ	$R_{пер},$ мкОм	$I_{зжм},$ А	$U_{зжм},$ мВ	$R_{пер},$ мкОм
1	40,4	0,5	12,4	32,8	0,4	12,2	16,3	0,2	12,3
2	100,7	3,2	31,8	100,6	2,7	26,8	51,7	1,4	27,1
3	60,5	29,7	490,9	68,9	2,5	36,3	35,4	1,3	36,7
4	60,5	1,3	21,5	68,9	1,45	21,0	34,4	0,7	20,3
5	100,7	2,3	22,8	100,6	2,2	21,9	51,7	1,1	21,3
6	100,7	3,7	36,7	100,6	3,8	37,8	51,7	1,9	36,8
7	40,4	11	272,3	32,8	2,8	85,4	16,3	1,4	85,9
8	–	–	–	–	–	–	102,8	1,76	17,1
9	–	–	–	–	–	–	102,8	1,66	16,1

Среднее отклонение измеренных значений тока от расчетных составило 1,6 %, а максимальное – 4,95 %.

В Таблице 3.5 представлены режимы, при которых производилось исследование нагрева проводов и арматуры контактной сети.

Таблица 3.5 – Испытания участка контактной сети

Режим	Время t , мин	Участок		Ток I , А	Температура T_{MAX} , °С	ΔT , °С
Установившийся режим	>50	НТ (рис. 3.15)		230	102,6	0,46
		КП (рис. 3.15)		425	74,4	1,46
		Износ (рис. 3.17)	0 %	387	70,1	0,3
			5 %		71,9	0,7
			10 %		73,1	0,42
			15 %		76,7	0,73
			20 %		78,5	0,51
		Износ + Зажим	КС-046	67,5	0,5	
КС-053	64,5		0,81			
Режим с зависимостью от времени	5	Износ + Зажим	КС-053	505	70	0,4
Общее количество измерений и их средняя абсолютная погрешность:					346	0,63

Сравнению подвергались значения температуры проводов и зажимов контактной сети в зависимости от их пространственной координаты. На Рисунке 3.19 представлены зависимости температуры проводов по длине для участков НТ и КП. Для исключения наложения данных температуры проводов на данные температуры зажимов, расположенных на этих проводах, точки температуры зажимов смещены вправо по оси x . Протекание тока на участках НТ и КП происходит через поперечный электросоединитель. Его температура также фиксировалась. При этом под нагрузкой были задействованы различные части ПС.

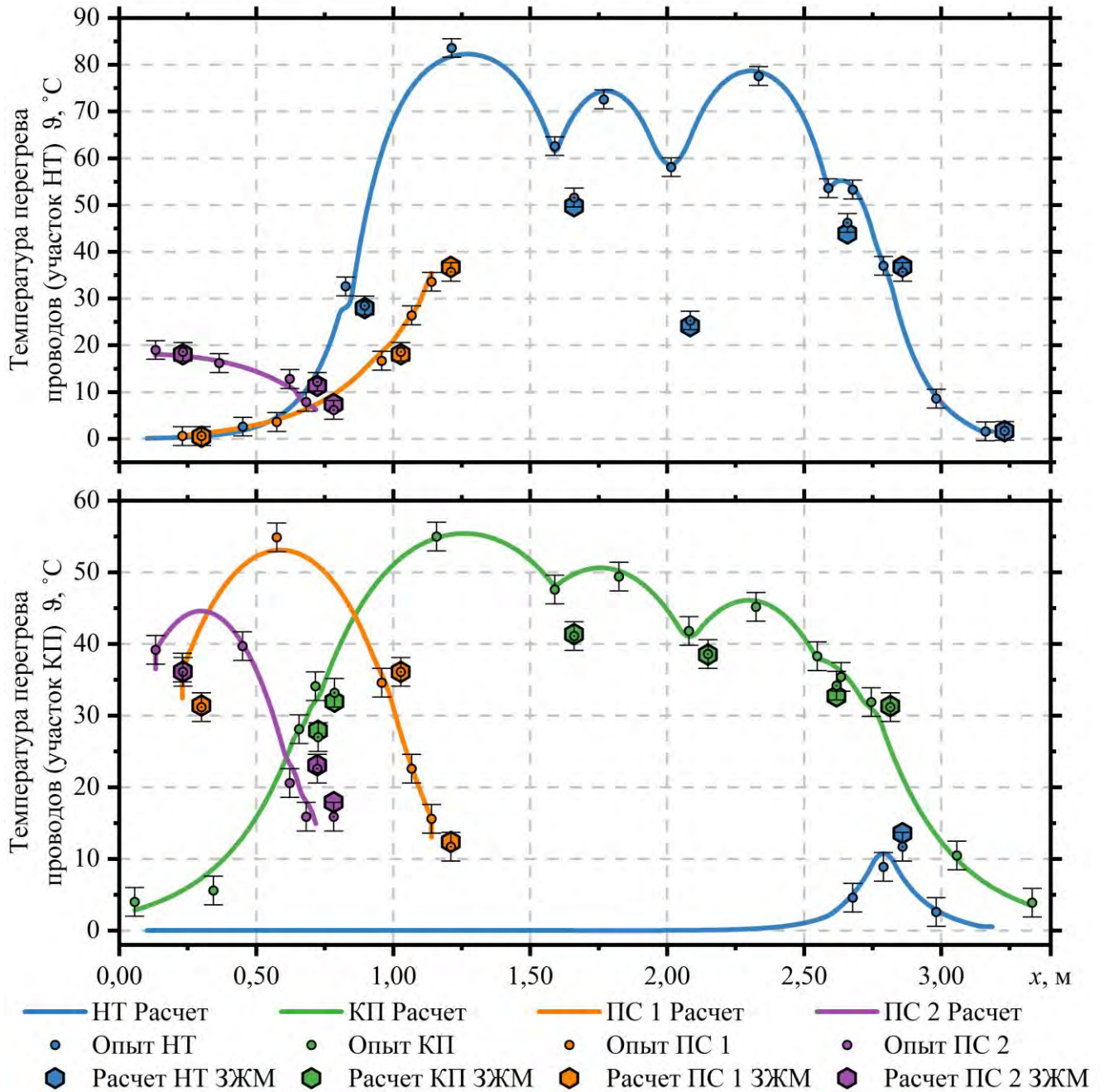


Рисунок 3.19 – Распределение отклонений экспериментальных значений температуры от расчетных для участка контактной сети

Из Рисунка 3.19 видно, что температура проводов в местах крепления зажимов снижается. При испытаниях участка КП происходит нагрев НТ через ПС 1, так как крепление ПС 2 к ПС 1 смещено ближе к НТ. Нагрев вызван кондуктивным потоком тепла по участку ПС 1, так как протекание тока по ПС 1 к НТ не

происходит. При испытаниях НТ аналогичный нагрев КП через ПС 1 происходит менее чем на 1 °С.

Провода, к которым крепятся нетоковедущие зажимы, выступают в роли источников тепла. Крепление НТ в седле КС-008 происходит с помощью резьбовой плашки, а также НТ и седло имеют свободный контакт в боковых участках седла. В ходе эксперимента была зафиксирована температура несущего троса под плашкой седла. Так как седло является наиболее массивным элементом, а также по причине того, что монтаж несущего троса в седле осуществляется частично с помощью плашки и частично предполагает свободное размещение, данный узел имеет наибольшую разницу температуры между проводом и соответствующей арматурой контактной сети из всех рассмотренных элементов, равную 31,5 °С.

В ходе проведения экспериментальных данных была зафиксирована повышенная относительно расчетного значения температура питающего зажима несущего троса КС-055. Измерение электрического сопротивления данного соединения показало повышенное сопротивление зажима, равное 180 мкОм. Причиной такого значения сопротивления является повышенное удельное электрическое сопротивление материала зажима. Следует отметить, что при данном значении сопротивления превышение температуры зажима над температурой провода в установившемся режиме не происходило. Сопротивления других зажимов на рассматриваемом участке отклонений не имели.

На Рисунке 3.20 представлены термограмма¹ и температурный профиль седла КС-008 и участков НТ, полученные в результате эксперимента в сравнении с расчетными значениями. Из рисунка видно совпадение формы зависимости распределения температур в пределах погрешности измерения прибора $\pm 2^\circ\text{C}$. В ходе эксперимента была зафиксирована температура провода под плашкой седла. Термограмма данного участка изображена в разрезе седла КС-008. Линия температурного профиля НТ имеет характерные колебания по причине волнистой поверхности

¹ Термограмма состоит из четырех кадров тепловизионной съемки. По одному кадру на участки несущего троса слева и справа от седла, кадр седла, а также часть кадра температуры провода под плашкой седла.

многопроволочного провода. Разрыв линии температурного профиля несущего троса связан с перекрытием провода телом седла в местах, доступных для тепловизионного измерения.

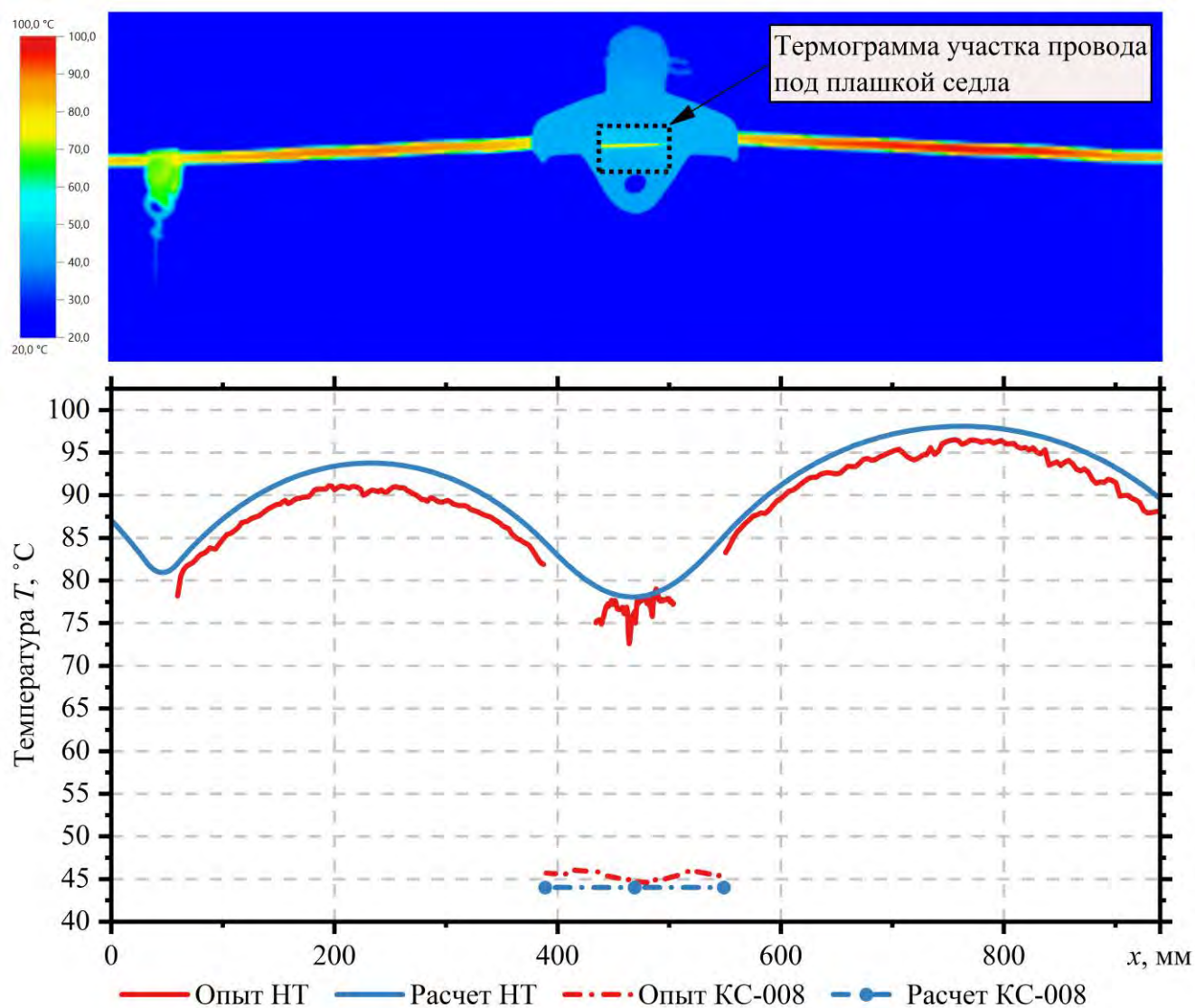


Рисунок 3.20 – Термограмма седла НТ КС-008

На Рисунке 3.21 представлена термограмма фиксаторного зажима КС-049 и участка КП, на котором он установлен. Из рисунка видно, что отклонения линий температурного профиля ниже, чем при измерении температуры несущего троса. Это связано с тем, что поверхность неизношенного контактного провода¹ не имеет

¹ В данном эксперименте контактный провод не имеет износа.

шероховатости и волнистости, характерной для многожильного несущего троса. Также измерение, представленное на Рисунке 3.21, снято одним кадром тепловизионной съемки с более близкого расстояния, что снизило погрешность измерения.

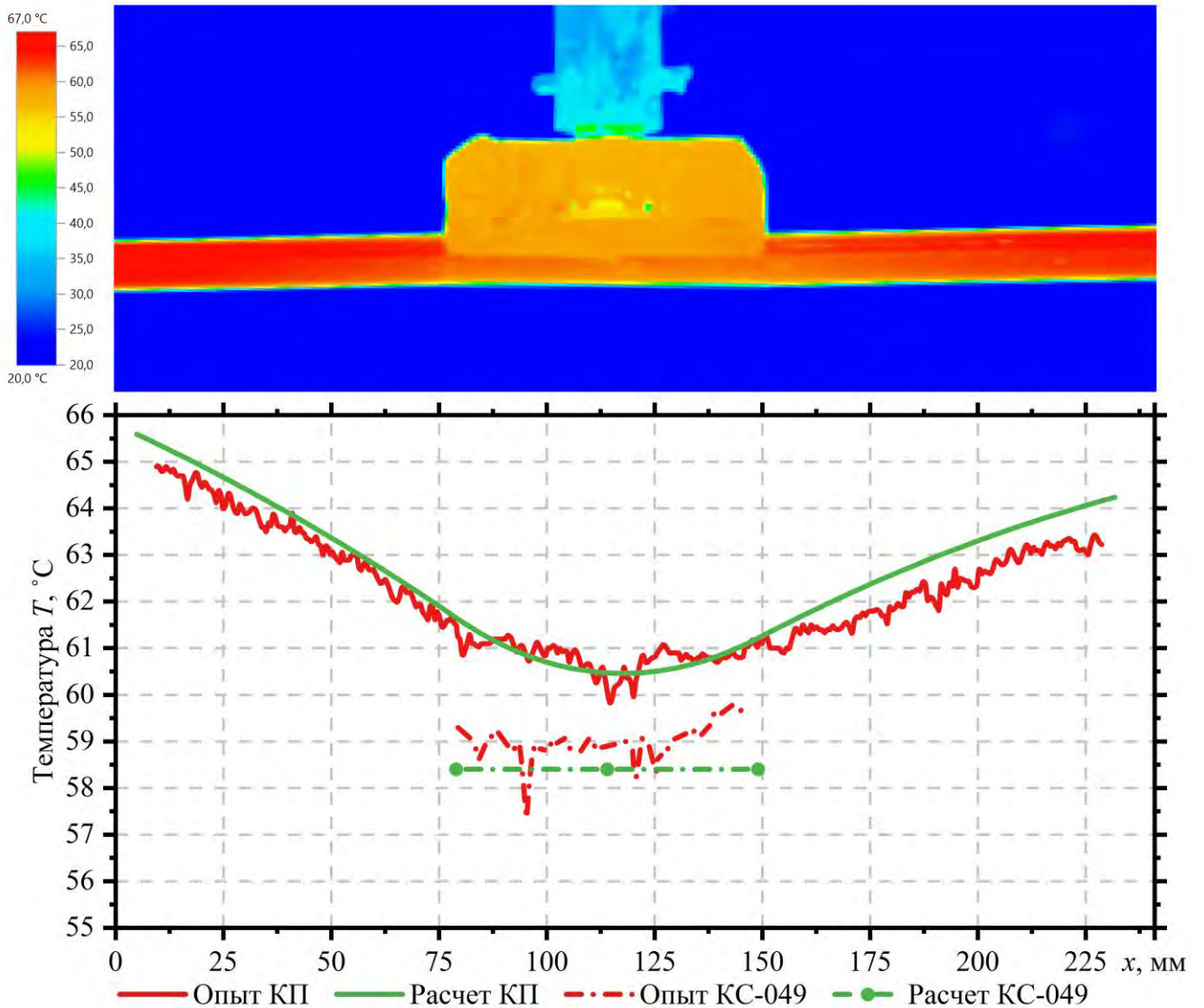


Рисунок 3.21 – Термограмма фиксирующего зажима КС-049

На Рисунке 3.22 представлена зависимость температуры контактного провода на участке местного износа при различных параметрах величины износа и его длины. Значение температуры в подписи линий графика соответствует температуре окружающей среды при проведении соответствующих измерений.

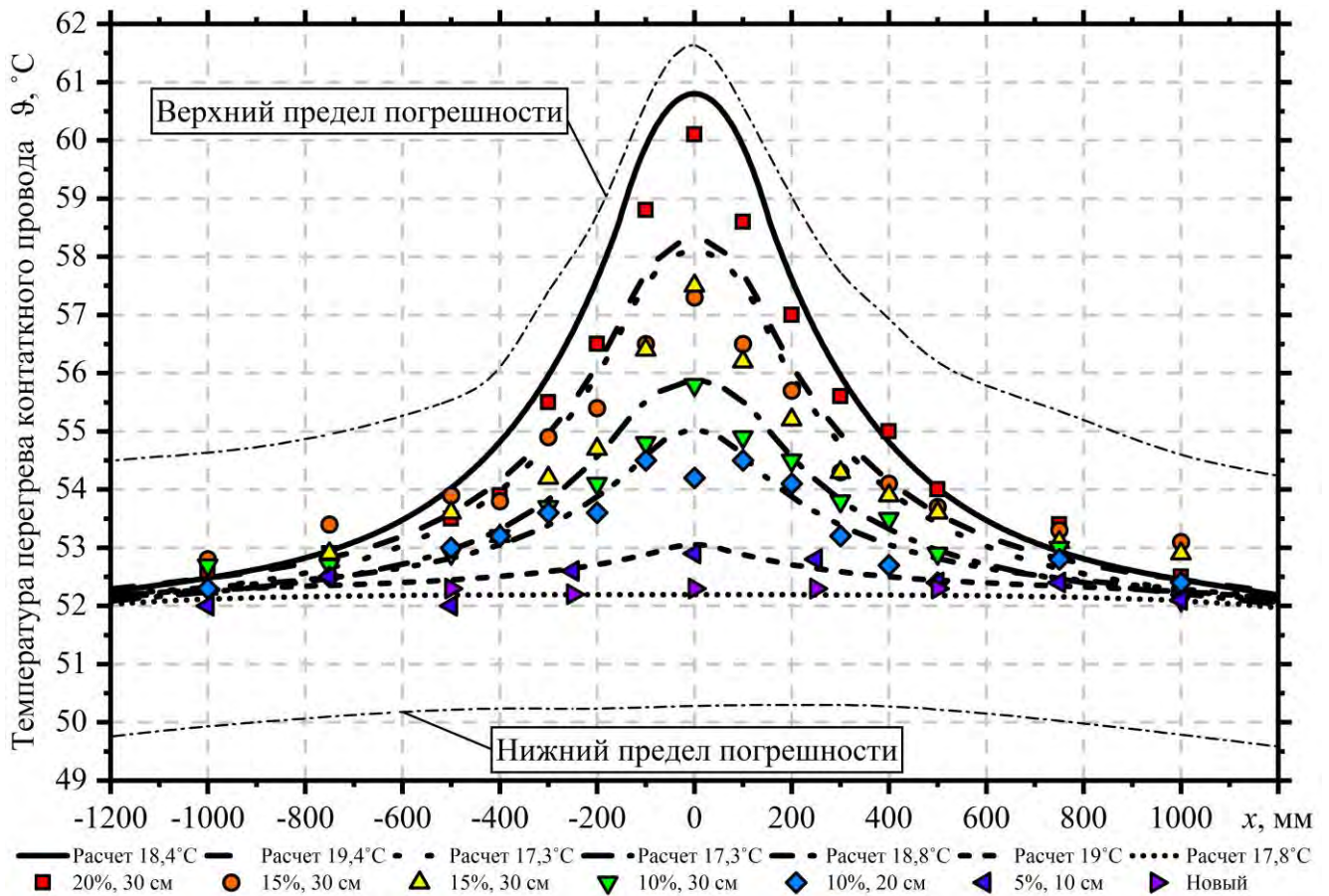


Рисунок 3.22 – Температура перегрева участка контактного провода МФ-100 с различным местным износом

Также в ходе проведения эксперимента было исследовано распределение температуры в зоне местного износа при наличии зажима на контактном проводе. Рассматривались зажимы КС-046 и КС-053. Зажим КС-053 был установлен в середине участка местного износа величиной 20 % и длиной 30 см. Зажим КС-046 был установлен на данном участке со смещением от середины. На Рисунке 3.23 представлена термограмма зажима КС-046, смонтированного на участке местного износа контактного провода. На рисунке отчетливо видны границы местного износа. В процессе проведения эксперимента струна не чувствовала в распределении тока, так как ее звено также было заизолировано.

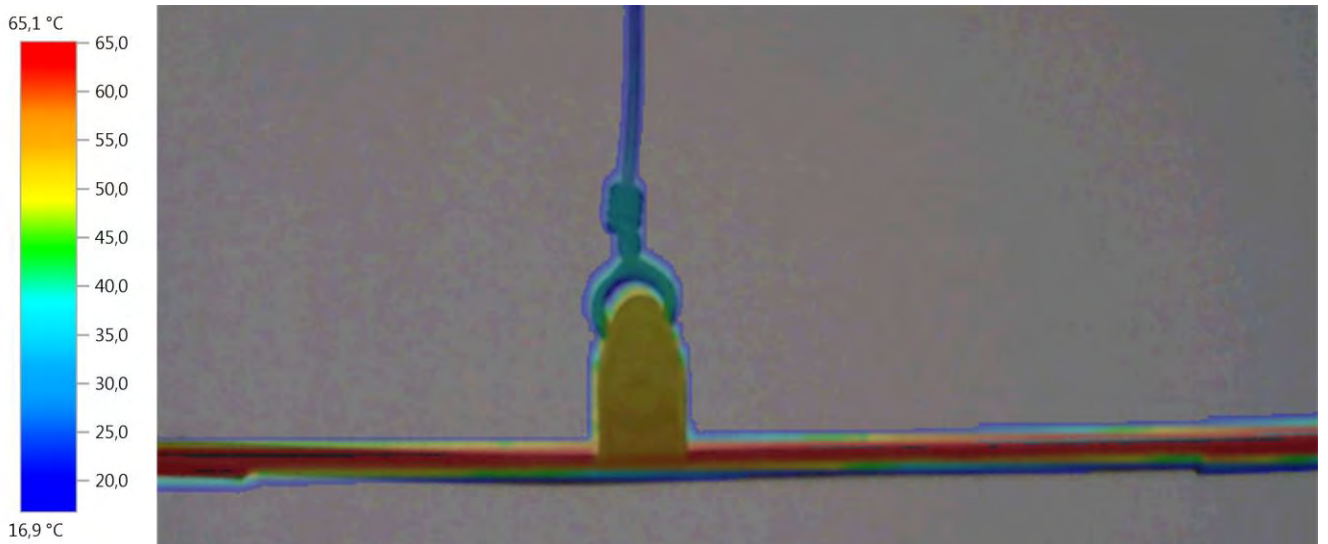


Рисунок 3.23 – Термограмма и фотоизображение зажима КС-046 на участке местного износа контактного провода МФ-100 в процессе нагрева

На Рисунке 3.24 представлена зависимость температуры по длине контактного провода вблизи участка местного износа при установке на нем рассматриваемых зажимов КС-046 и КС-053.

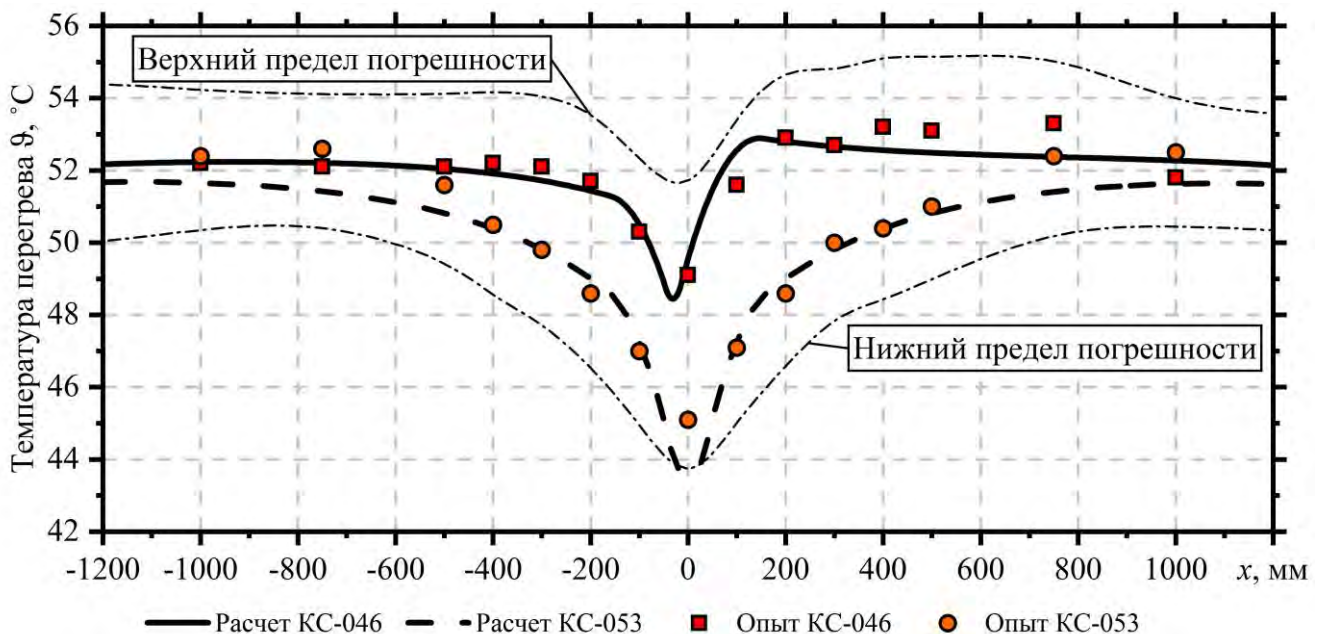


Рисунок 3.24 – Температура перегрева участка контактного провода МФ-100 с установкой на нем зажимов КС-046 и КС-053 при токе 387 А

Из рисунка видно, что установка зажимов фактически полностью исключила перегрев контактного провода в месте местного износа. Также отчетливо видно асимметрию температуры провода при установке струнового зажима со смещением. Данное явление также подтверждается как результатами экспериментального исследования, так и расчетным путем.

Также в процессе эксперимента был исследован процесс нагрева и охлаждения питающего зажима контактного провода КС-053, находящегося на участке местного износа. На Рисунке 3.25 представлены зависимости нагрева и охлаждения зажима и контактного провода в удаленной от участка местного износа точке.

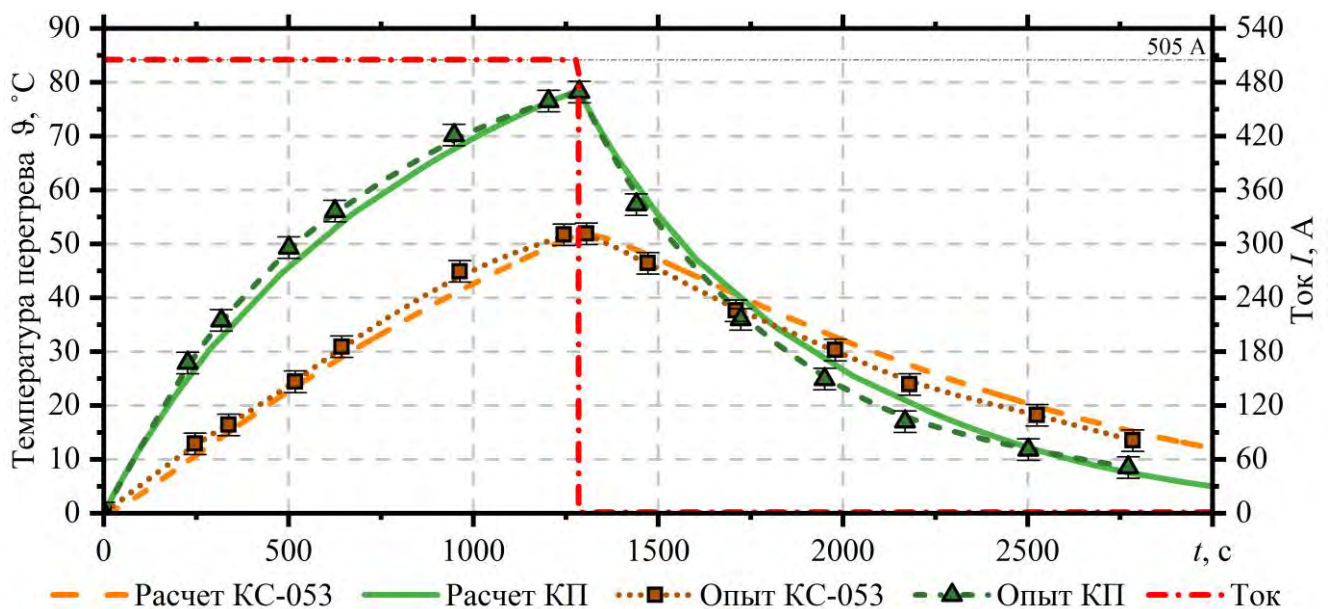


Рисунок 3.25 – Зависимость температуры перегрева при нагреве и охлаждении зажима КС-053 на контактном проводе МФ-100

Из рисунка видно, что процессы нагрева и охлаждения для провода проходят более интенсивно, чем для зажима. Зажим обладает большей тепловой инерцией, что влечет за собой превышение температуры зажима над температурой провода в удаленной точке уже спустя 7,6 минуты после отключения тока. При этом на момент отключения тока температура перегрева зажима была на 26,3 °C ниже температуры перегрева провода.

Отклонения между расчетными и экспериментальными значениями температуры были объединены в выборки для определения закона распределения величины отклонения данных эксперимента от данных расчета по разработанной математической модели. В результате проверки гипотезы об экспоненциальном законе распределения с помощью критерия Пирсона с уровнем значимости 0,05 были получены следующие значения: при числе степеней свободы $k = 4$ наблюдаемое значение для участка подвески $\chi^2_{\text{набл}} = 2,16$ ($\chi^2_{\text{крит}} = 9,49$); при числе степеней свободы $k = 7$ для участка износа $\chi^2_{\text{набл}} = 9,72$ ($\chi^2_{\text{крит}} = 14,07$). Гистограммы распределения отклонений для тока соответствующих участков, а также теоретические кривые распределения величины отклонений представлены на Рисунке 3.26.

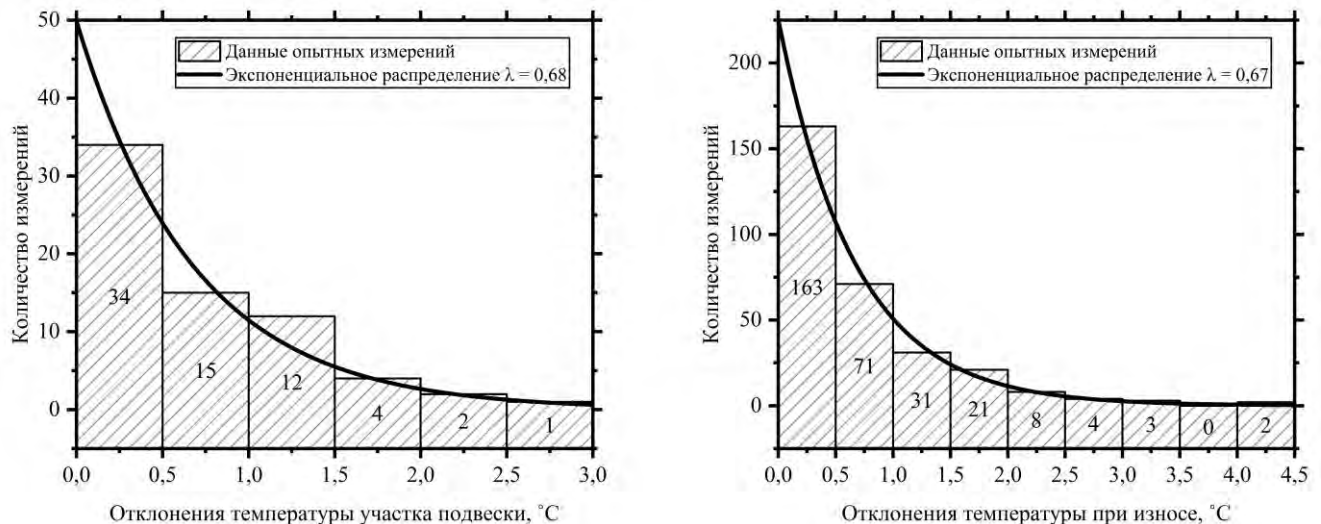


Рисунок 3.26 – Распределение отклонений экспериментальных значений температуры от расчетных

Из рисунка видно, что отклонения для участка контактной сети составили 0,68 °C, а для участка с местным износом контактного провода 0,67 °C. Данное различие помимо возможных статистических отклонений также связано с тем, что на участке контактной сети измерению подвергались многожильные провода с характерной волнистой поверхностью, что повышает погрешность тепловизионного измерения.

Для данных выборок отклонений температуры также характерен экспоненциальный закон распределения. Среднее значение отклонения температуры составило $0,675$ °С, что ниже, чем отклонения в эксперименте с масштабной моделью контактной сети в 3,1 раза. Данное снижение отклонения температуры связано, прежде всего, с повышением диаметра исследуемых проводов, что позволило снизить погрешность тепловизионного измерения.

3.8 Верификация расчетных данных с результатами экспериментальных исследований сторонних авторов

3.8.1 Экспериментальное исследование нагрева контактного провода в эксплуатации

В рамках научной работы, производимой на кафедре «Электроснабжение транспорта» аспирантом УрГУПС Проскуряковым Е.Л. [130], было произведено экспериментальное исследование нагрева проводов контактной подвески М-120 + 2МФ-100 + 2А-185 на участке Свердловской железной дороги.

В процессе эксперимента осуществлена фиксация температуры контактного провода, тока питающего фидера и характеристик окружающей среды. Установка измерительного прибора АРРА-303 с функцией записи данных была осуществлена на поддерживающей струне стыкового зажима КС-059, а фиксация термопары типа К на контактном проводе осуществлялась с помощью струнового зажима КС-046. Место измерения температуры выбрано вблизи подключения питающих проводов от фидера тяговой подстанции. Эксперимент произведен в сентябре 2014 года в пасмурную погоду со значением солнечной радиации не более 50 Вт/м². Скорость ветра измерялась анемометром АТТ-1002 на высоте подвеса контактного провода и в процессе эксперимента составляла от 1,5 до 2 м/с. Измерение тока осуществлялось путем видеофиксации показаний амперметра фидера на тяговой подстанции.

На Рисунке 3.27 представлено фото контактной сети с установкой измерительного прибора и термопары.

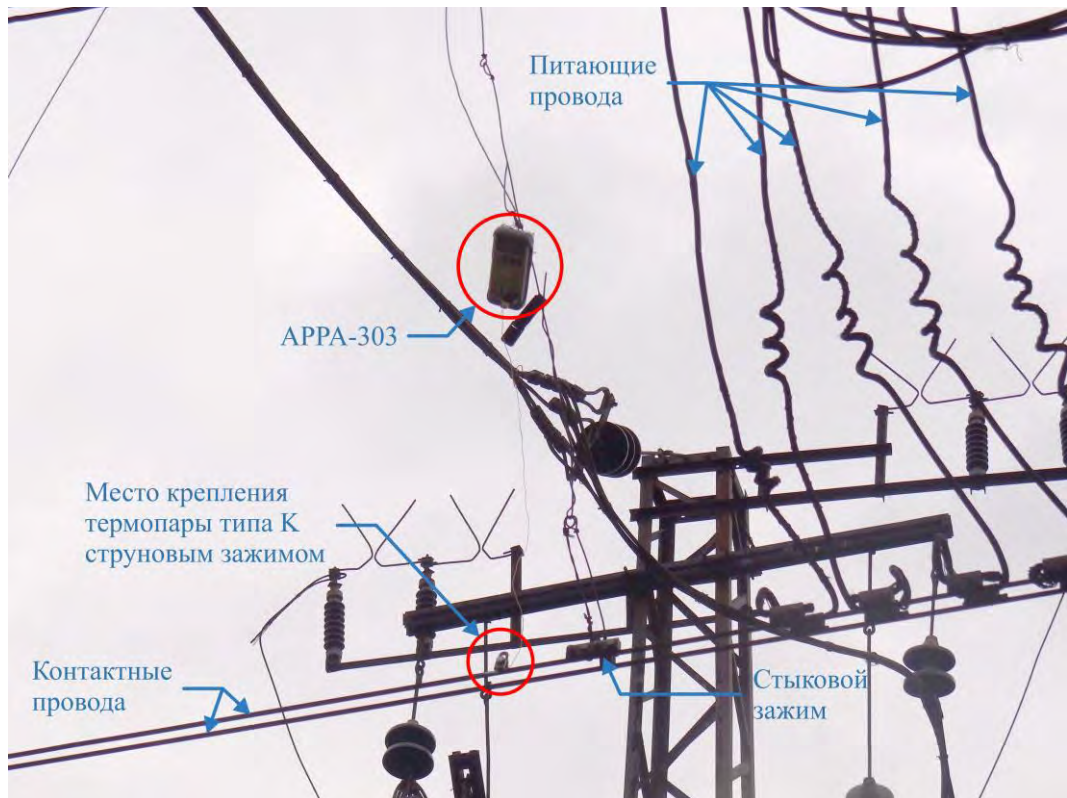


Рисунок 3.27 – Место измерения температуры контактного провода (данные получены Проскуряковым Е.Л.)

Эксперимент производился в течении 30 минут с 9 часов 10 минут утра местного времени, что способствовало постепенному повышению температуры окружающего воздуха в процессе измерений.

На Рисунке 3.28 представлен участок расчетной геометрии с разбиением на конечные элементы.

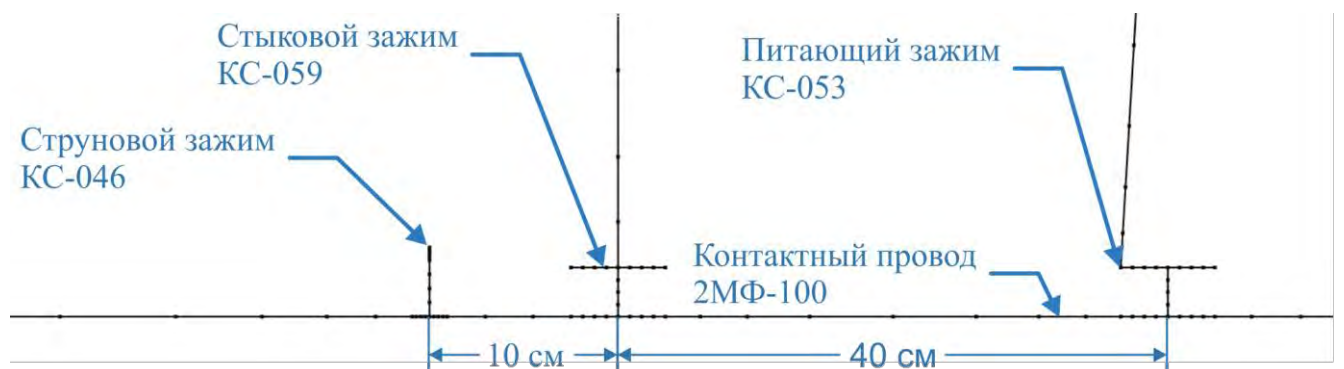


Рисунок 3.28 – Участок расчетной геометрии

На Рисунке 3.29 представлено сравнение опытных данных и результатов расчета по разработанной во второй главе математической модели.

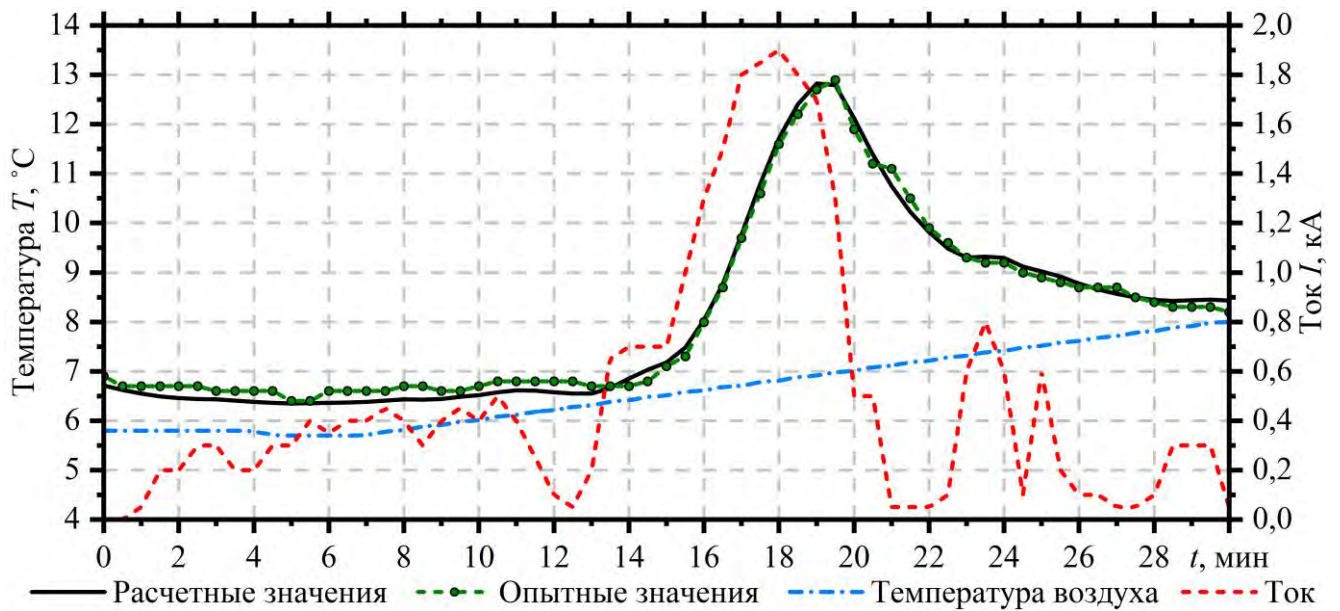


Рисунок 3.29 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Отклонения между расчетными и измеренными значениями температуры контактного провода составили до 4 %. Стоит отметить низкие значения температуры нагрева, полученные в экспериментальных данных, вследствие низкой токовой нагрузки. Тем не менее данный диапазон температур соответствует предполагаемой области применения разработанной методики расчета и дополнительно подтверждает возможность ее применения на реальной контактной сети.

3.8.2 Экспериментальное исследование дефекта несущего троса

В диссертационной работе Грачева В.Ф. [67] произведено исследование распределения температуры несущего троса М-120 при обрыве шести внутренних жил. На основании термограмм экспериментального исследования, выполненных тепловизором, и фотографий, представленных в работе, видно, что коэффициент черноты поверхности провода ε принят равным единице, а на провод нанесено

покрытие черного цвета. При этом температура нагрева провода М-120¹ при токе 800 А с выдержкой 15-20 минут² составила 105 °С. Данные результаты свидетельствуют о том, что коэффициент черноты поверхности провода с нанесенным покрытием ниже 1. По данным экспериментов, произведенных в разделах 3.2 и 3.5, коэффициент излучения для поверхностей, покрытых термостойкими красками, составляет порядка 0,85. Так как на данные тепловизионного измерения непосредственное влияние оказывает коэффициент излучения поверхности, то данные термограмм из исследования подверглись коррекции. На Рисунке 3.30 представлено сравнение расчетных (на основании разработанной математической модели) и экспериментальных (с учетом коррекции коэффициента черноты поверхности) данных.

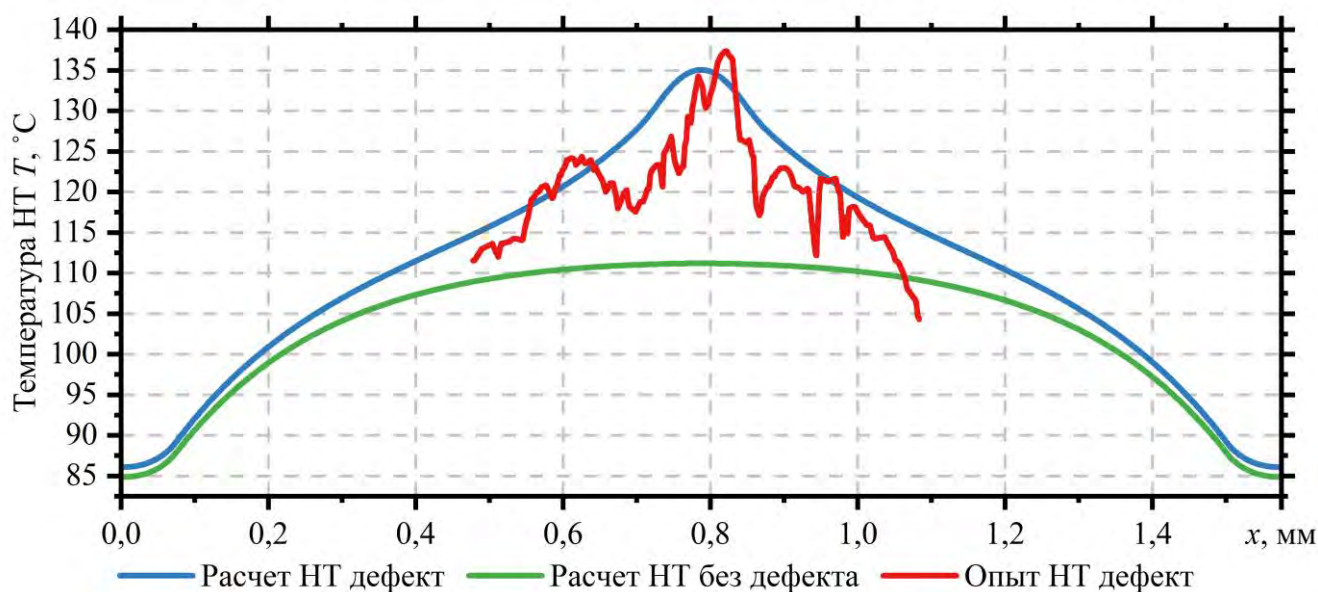


Рисунок 3.30 – Распределение температуры по длине несущего троса М-120 с дефектом и без дефекта при токе 800 А через 20 минут после начала протекания тока (опытные данные Грачев В.Ф. [67])

¹ Длительно допустимый ток и температура для провода М-120 составляют 650 А и 100 °С соответственно, согласно [74].

² Расчетное время выхода на установившуюся температуру провода М-120 в условиях, описанных в [67], составляет порядка 35 минут.

Из рисунка видно, что значение температуры по результатам экспериментального исследования имеет колебания, характерные для тепловизионного измерения с большого расстояния волнистой поверхности многопроволочных проводов. Несмотря на это, в расчетных и экспериментальных данных прослеживается совпадение формы распределения температуры провода.

На Рисунке 3.31 представлено сравнение экспериментальных (с учетом коррекции коэффициента черноты поверхности) и расчетных зависимостей максимальной температуры нагрева провода от протекающего тока. Наибольшее отклонение от расчетных значений наблюдается в точке 500 А для экспериментальной зависимости температуры дефектного провода. Данное отклонение может быть вызвано временем выдержки данной точки под токовой нагрузкой более 15 минут.

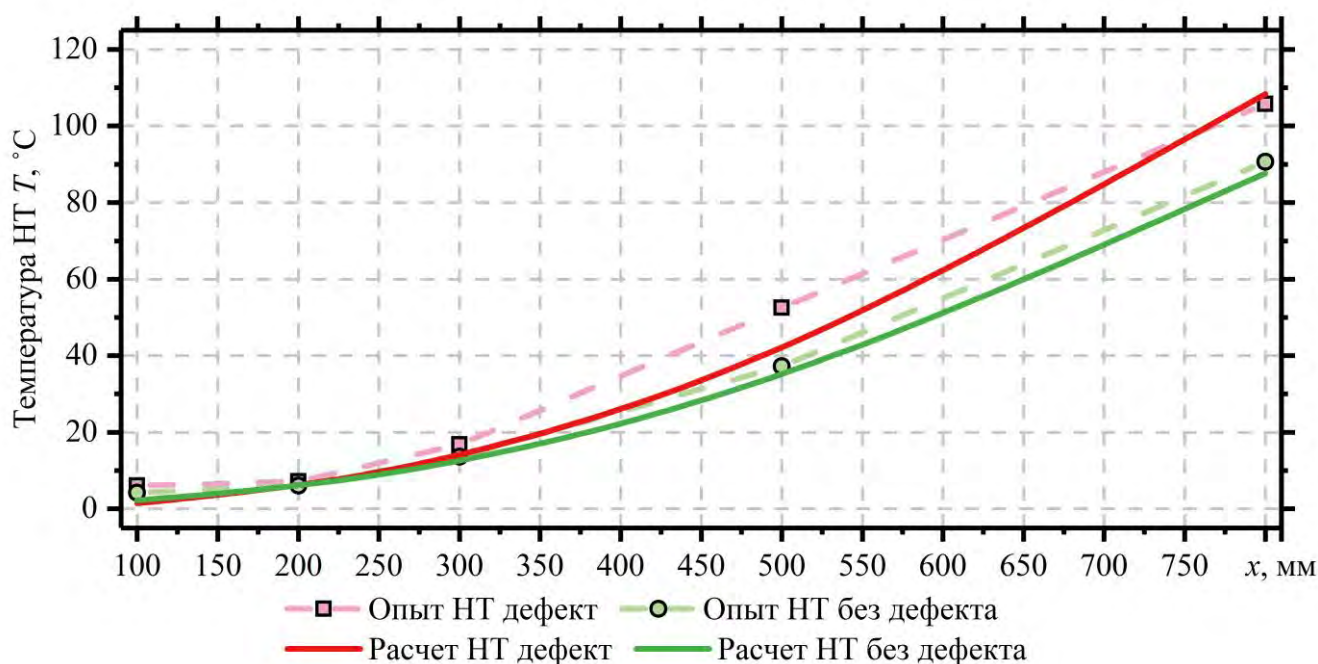


Рисунок 3.31 – Максимальная температура перегрева участка несущего троса с дефектом и без дефекта в зависимости от тока через 15 минут после начала протекания тока (опытные данные Грачев В.Ф. [67])

3.8.3 Экспериментальное исследование нагрева токосъемных пластин токоприемника

В работе [69] авторами произведено исследование нагрева токосъемных пластин токоприемника AX 023 BU LT в процессе токосъема. На Рисунке 3.32 представлена термограмма токосъемных пластин через 10 минут после начала съема тока величиной 3200 А. На рисунке видно, что токосъемные пластины нагреты неравномерно и имеют наибольший нагрев в зоне движения контактного провода вдоль пластин. При этом стоит отметить, что математическая модель нагрева токосъемных пластин, описанная в разделе 2.4.2, учитывает только их среднюю температуру.

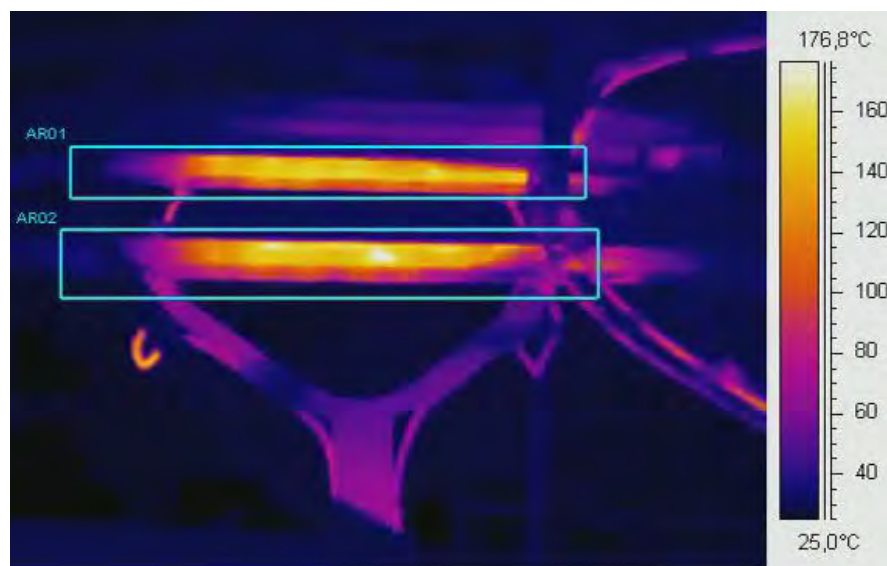


Рисунок 3.32 – Термограмма токосъемных пластин токоприемника
(опытные данные ОмГУПС [69])

Экспериментальные исследования контакта контактного провода и токосъемных пластин представлены в работе [46]. На основании данных исследований можно сделать вывод о том, что переходное сопротивление в контакте зависит от величины снимаемого тока при движении (Рисунок 3.33).

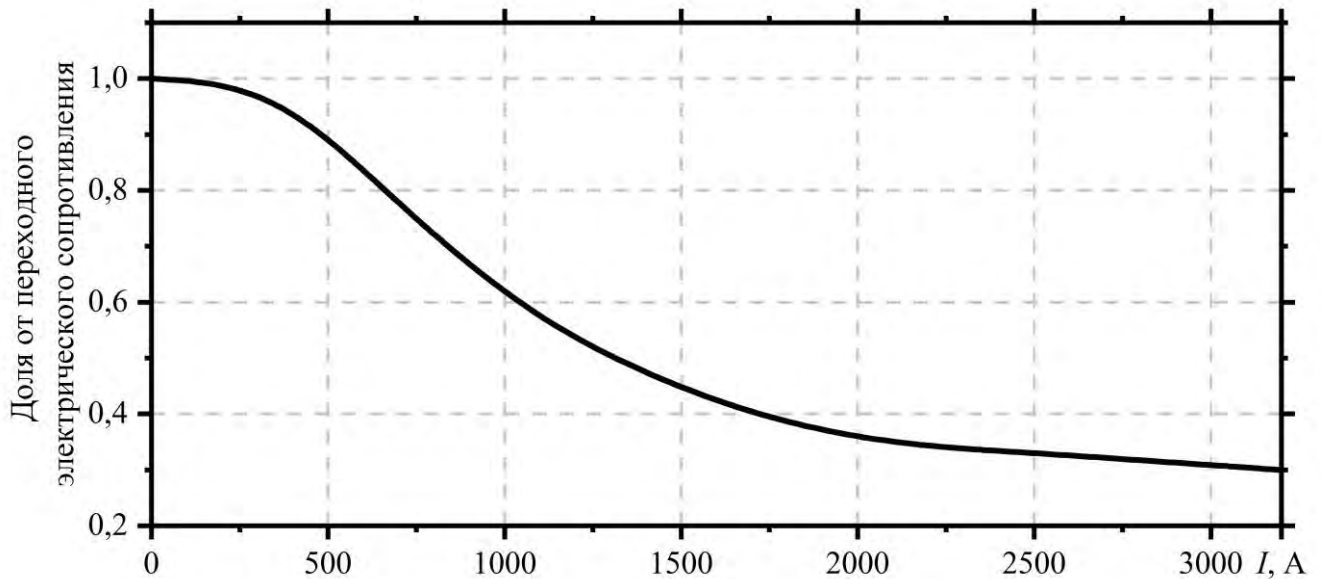


Рисунок 3.33 – Зависимость доли переходного электрического сопротивления между вставками токоприемника из металлизированного графита и контактным проводом от величины снимаемого тока (по данным Берента В.Я. [46, с. 185])

На Рисунке 3.34 представлено сравнение расчетного значения средней температуры перегрева токосъемных пластин токоприемника от времени с результатами экспериментального исследования, описанного в [69].

Из рисунка видно соответствие формы нагрева токосъемных пластин. Пониженное значение расчетного значения температуры перегрева токосъемных пластин по сравнению с данными эксперимента обусловлено допущениями, принятыми при расчете средней температуры. При этом в эксперименте фиксировалась максимальная температура пластин. Для исследования распределения температуры в контакте контактного провода и токосъемных пластин необходимо воспользоваться моделями, предложенными в работах [27; 30; 131].

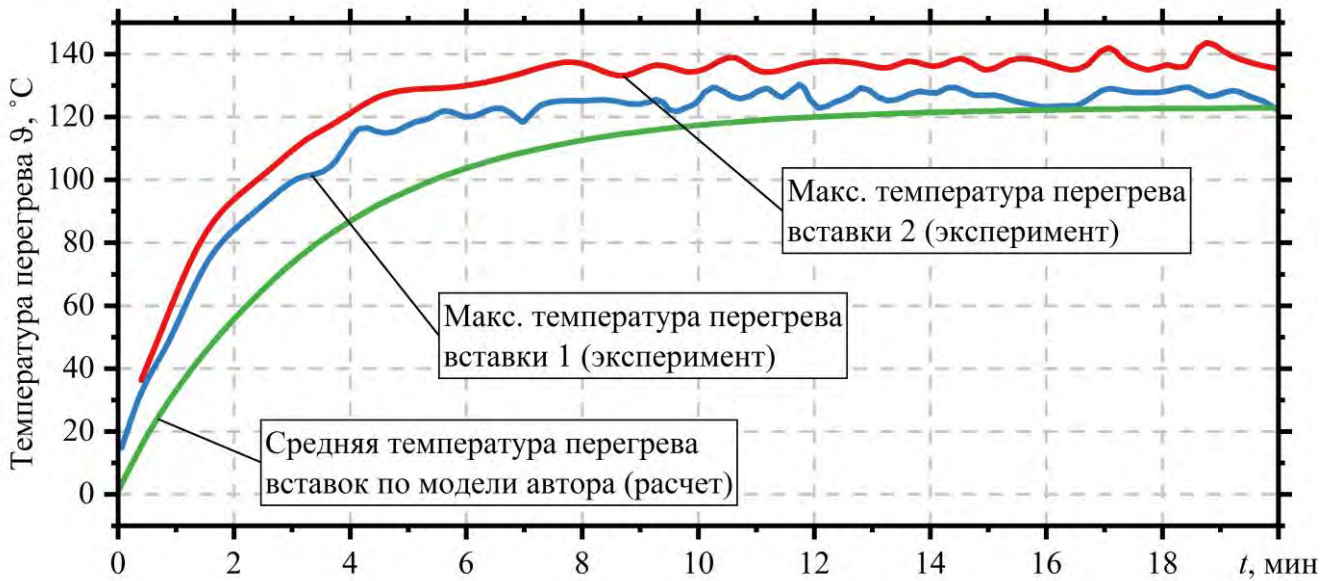


Рисунок 3.34 – График температуры перегрева контактных вставок полоза токоприемника в зоне контакта при токе 3200 А (опытные данные ОмГУПС [69])

На Рисунке 3.35 представлено аналогичное сравнение расчетных и экспериментальных данных температуры перегрева в установившемся режиме.

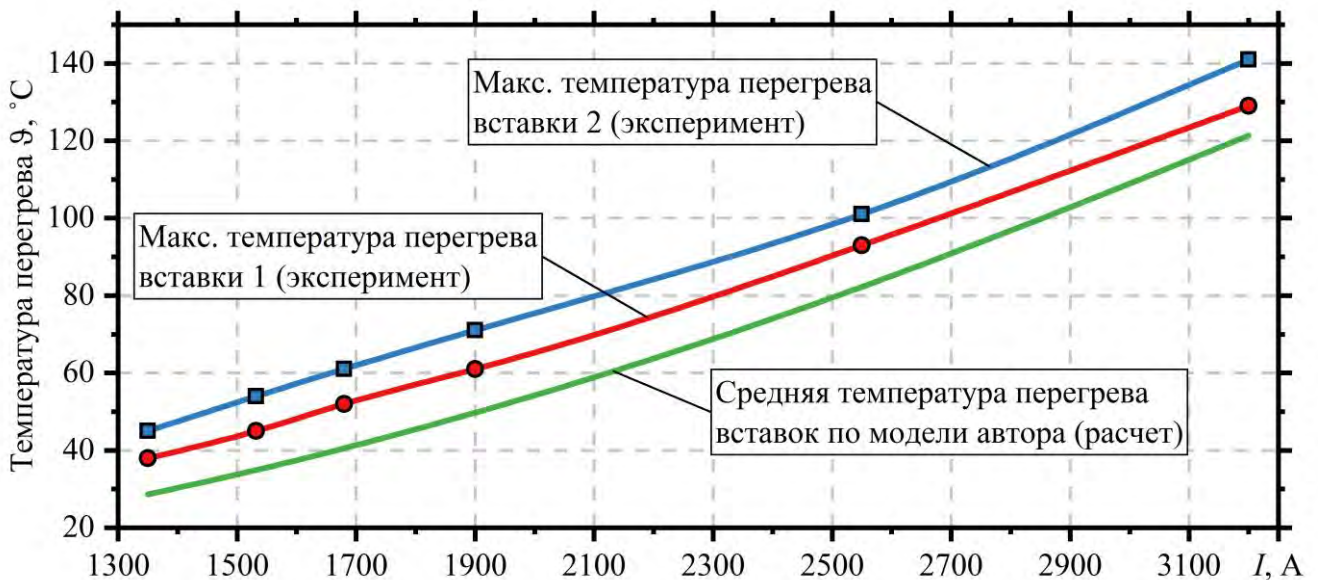


Рисунок 3.35 – График установившейся температуры перегрева контактных вставок полоза токоприемника в зоне контакта (опытные данные ОмГУПС [69])

Из рисунка видно, что расхождения температуры в установившемся режиме ниже, чем в первые минуты в режиме зависимости от времени. Данные результаты подтверждают адекватность математической модели и ее соответствие реальному физическому процессу с учетом установленных допущений.

3.9 Выводы по третьей главе

1. Осуществлена валидация математической модели электротеплового расчета контактной сети постоянного тока на базе масштабной модели постоянного тока. В ходе экспериментального исследования были произведены опыты для режимов работы контактной сети в режимах транзита и токосъема. Получены характеристики тока и температуры продольных и поперечных проводов контактной подвески на базе масштабной модели. Данный способ позволил без ущерба для качества производимого исследования исключить сложные организационно-технические мероприятия, требуемые для проведения эксперимента на реальной контактной сети. Учтены конструкционные особенности масштабной модели в сравнении с реальной контактной подвеской. С использованием методов численного моделирования выдвинуты предположения характера влияния геометрии контактной сети на процессы токораспределения и нагрева проводов для реальной контактной сети.

2. Установлено, что участки локального износа КП влияют на токораспределение вблизи участка износа. Вытеснение части тока из КП в НТ происходит по струнам, что повышает их токовую и температурную нагрузку. Изменение токораспределения происходит в межструновом пролете с локальным участком износа, а также в ближайших межструновых пролетах – суммарно локальный участок износа изменяет токораспределение на расстоянии трех межструновых пролетов.

3. Экспериментально подтверждены теоретические предположения В.Е. Марского [25] о повышенной токовой нагрузке на участке НТ вблизи СА на компенсированной контактной подвеске.

4. Установлено, что повышенная токовая нагрузка на участках НТ возникает не только в пролете со СА компенсированной контактной подвески, но и перед креплением РТ.

5. Выявлены зависимости токовой нагрузки на струны в процессе токосъема от длины струн, а также от геометрии контактной сети. Выявлена пониженная токовая нагрузка на струны вблизи ПС и СА.

6. Осуществлена валидация математической модели нагрева и охлаждения арматуры контактной сети на участке реальной контактной подвески. Установлено, что представление арматуры контактной сети в виде линейных элементов является допустимым для электротепловых расчетов контактной сети.

7. Установлены законы распределения величины отклонения результатов экспериментальных исследований от результатов расчета математической модели. Расхождения теоретических и опытных значений сопоставимы с погрешностями измерительных приборов, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели электротеплового расчета и о соответствии модели реальному физическому процессу.

8. Осуществлена верификация расчетной модели с экспериментальными данными Грачева В.Ф. [67] по испытанию нагрева несущего троса с шестью поврежденными внутренними жилами. Среднее расхождение между данными расчета и эксперимента составили 4 % на длине провода 0,6 м. При этом максимальное отклонение, вызванное погрешностью тепловизионного измерения волнистой поверхности многожильного провода, составило 15,8 %. Тем не менее, совпадение колоколообразной формы температуры перегрева по амплитуде и степени снижения температуры по мере удаления от места дефекта позволяют сделать вывод об адекватности предложенной математической модели для моделирования внутренних обрывов жил многопроволочных проводов контактной сети постоянного тока.

9. Осуществлена верификация нагрева полоза токоприемника с данными эксперимента ОмГУПС [69]. Среднее отклонение экспериментальных значений максимальной температуры перегрева токосъемных пластин от среднего значения температуры полоза токоприемника при токе 3200 А по расчету составляет 10,9 и

20,6 % для первой и второй пластины соответственно за время протекания тока 20 минут. Время выхода на температуру установившегося режима в эксперименте составило 6 минут, а в расчете 9,5 минут. Отличие во времени выхода на установившийся режим объясняется фиксацией во время эксперимента – максимальной температуры, а в расчете – средней температуры полозов токоприемника. Различия температур в установившемся режиме составили 4,62 и 13,36 % для первой и второй вставки соответственно или в среднем 9 %. Полученное соответствие экспериментальных и расчетных данных с учетом заданных допущений свидетельствует об адекватности математической модели расчета средней температуры полозов токоприемника.

4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ОЦЕНКА ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Возрастающие токовые нагрузки повышают вероятность отказов «узких мест» контактной сети постоянного тока с точки зрения тепловой нагрузки. Как показывает анализ отказов контактной сети, выполненный в разделе 1.2, мероприятия, направленные на усиление контактной сети для пропуска поездов повышенной массы, не приводят к снижению отказов звеньевых струн. По состоянию на 2019 год анализ тепловизионного обследования контактной сети постоянного тока на Свердловской, Южно-Уральской и Куйбышевской железных дорогах показывает, что наиболее часто выявляются перегревы проводов и зажимов на обводах усиливающих проводов в местах сопряжения анкерных участков, шлейфах разъединителей и местах подключения питающих проводов. Полученные данные также согласуются со статистикой, приведенной в [67] по состоянию на 2008 год, что свидетельствует об отсутствии эффективных мер по устранению «узких мест» за рассмотренный период времени. Одной из сложностей в поиске эффективных мер по совершенствованию электротепловых характеристик контактной сети постоянного тока являлось отсутствие методики расчета, позволяющей учесть электрические и тепловые процессы, происходящие в контактной сети, в рамках одной математической модели. В данной главе рассмотрены варианты применения модели, разработанной в главе 2, позволяющие выровнять токовую и тепловую нагрузку в проводах контактной сети [132]. Под электротепловыми характеристиками в работе понимается токонесущая способность контактной сети и распределение тока и температуры проводов вдоль оси пути.

4.1 Выявление «узких мест» в контактной сети постоянного тока с точки зрения тепловой нагрузки

Звеньевые струны и усовики фиксаторов

Согласно исследованиям контактных соединений [133, с. 185; 134] и износостойкости разрывных контактов [135, с. 69; 136, с. 279] определены положения, влияющие на механический и электрический износ. Применительно к звеньевым струнам контактной сети можно выделить такие факторы, непосредственно влияющие на износ, как количество срабатываний и сила тока, протекающая через контакт. Учащение отказов струн по причине электромеханического износа наблюдается при организации тяжеловесного движения и пропуске поездов повышенной массы, что свидетельствует о преобладании электрической составляющей износа, которая существенно влияет на продолжительность работы звеньевых струн. Согласно [137, с. 21], весовой износ контактов пропорционален количеству электричества, прошедшего через контакты. В данном исследовании была получена экспериментальная формула

$$A = k_3 \cdot k \cdot I^{1,7} \cdot t, \quad (4.1)$$

где k_3 – коэффициент запаса с учетом отклонения от средней величины износа, равный 1,35;

k – постоянный коэффициент, в зависимости от контактирующих элементов;

I – ток, протекающий через струну, А;

t – время действия тока.

В дальнейшем, при рассмотрении износа звеньев струн и усовиков фиксаторов принято допущение о том, что при прочих равных условиях работы параметром, определяющим износ, является ток, протекающий через струну.

На Рисунке 4.1 представлены зависимости эффективного и максимального токов, протекающих через струну, а также значения перегрева струн при проходе локомотива 2ЭС10 с бустерной секцией на скорости 55 км/ч с током 4400 А.

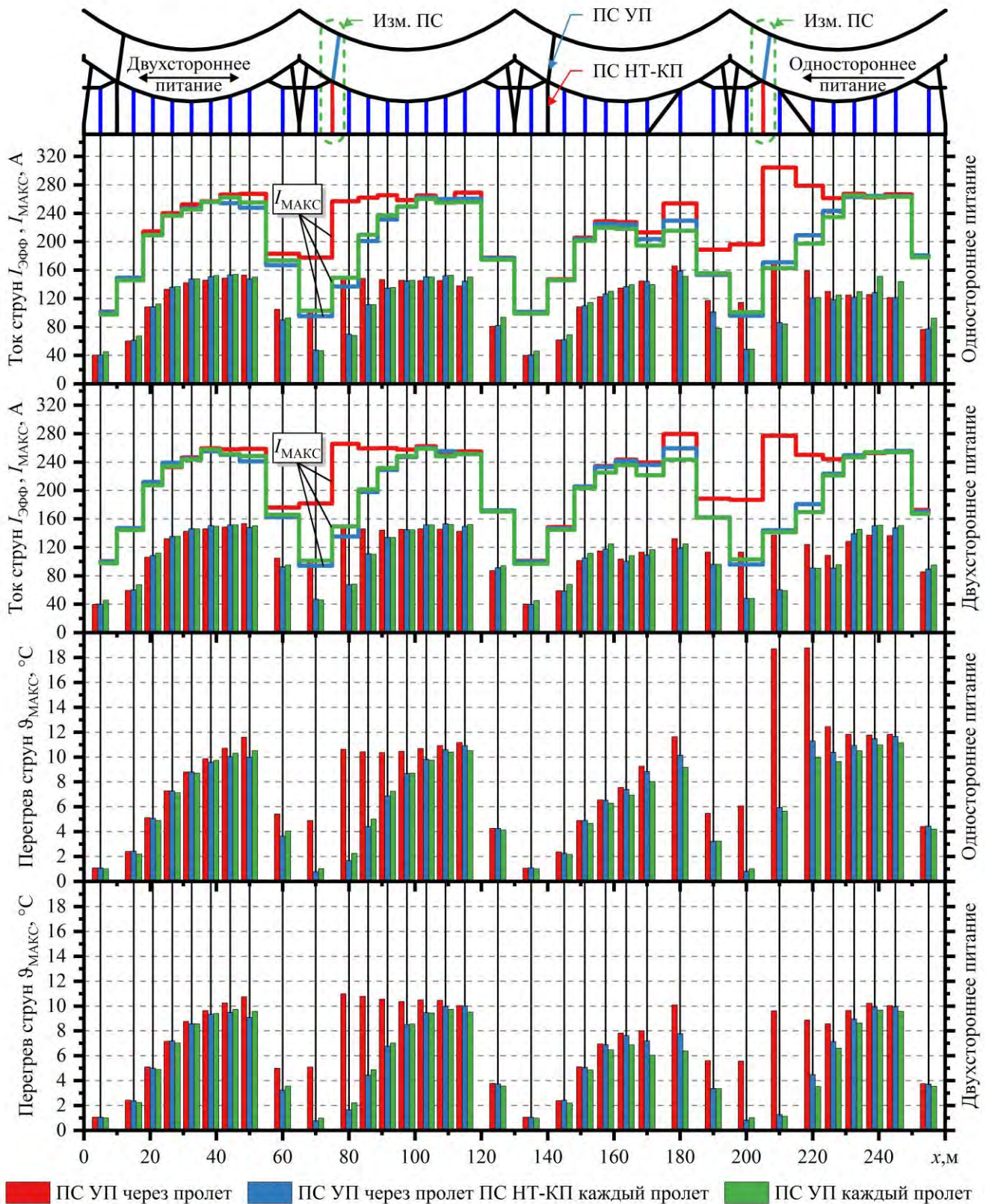


Рисунок 4.1 – Эффективный и максимальный токи и температура перегрева струн при различной расстановке поперечных электросоединителей

Расчет выполнен для случаев одностороннего и двухстороннего питания при температуре окружающего воздуха 40 °С, скорости ветра 1 м/с и потока солнечной радиации 900 Вт/м². Для расчета выбрана контактная подвеска с 15 % износом контактного провода, состоящая из проводов М-95 (НТ) + 2МФ-100 (КП) + 2А-185 (УП). Звеньевые струны и усовики фиксаторов выполнены из проволоки БСМ-4, рессорный трос – БСМ-6, поперечные электросоединители выполнены из провода М-95, трос средней анкеровки – ПБСМ1-70. Коэффициент поглощения солнечной радиации β и степень черноты поверхности проводов и зажимов ϵ приняты, согласно [19], как для проводов, длительное время находящихся в эксплуатации, и равны 0,75.

Из рисунка видно, что снижение токовой нагрузки струн происходит не для всех струн в пролете, а лишь для тех, которые находятся вблизи поперечных электросоединителей. Наименьшая токовая нагрузка приходится на рессорные струны. При этом из эксплуатации известно, что отказы рессорных струн по электромеханическому износу происходят значительно реже, чем для остальных струн, что также подтверждает преобладание электрической составляющей в износе звеньев.

В случае отсутствия поперечного электросоединителя между несущим тросом и контактами проводами происходит влияние троса средней анкеровки на ток, протекающий в ближайших струнах. В данных струнах протекает порядка 0,75–1,4 % от транзитного тока подвески, что вызывает предварительный нагрев струн и звеньев, поэтому после прохода токоприемника данные струны в большей степени подвержены температурным и токовым нагрузкам.

На Рисунке 4.2 представлены зависимости перегрева звеньев струн и доли их весового износа в зависимости от расположения в пролете. Из графика видно, что при прочих равных условиях наибольший износ следует ожидать у струн, расположенных до рессорного троса, со стороны, противоположной месту установки поперечного электросоединителя, а также для струн вблизи средней анкеровки при отсутствии в пролете поперечного электросоединителя.

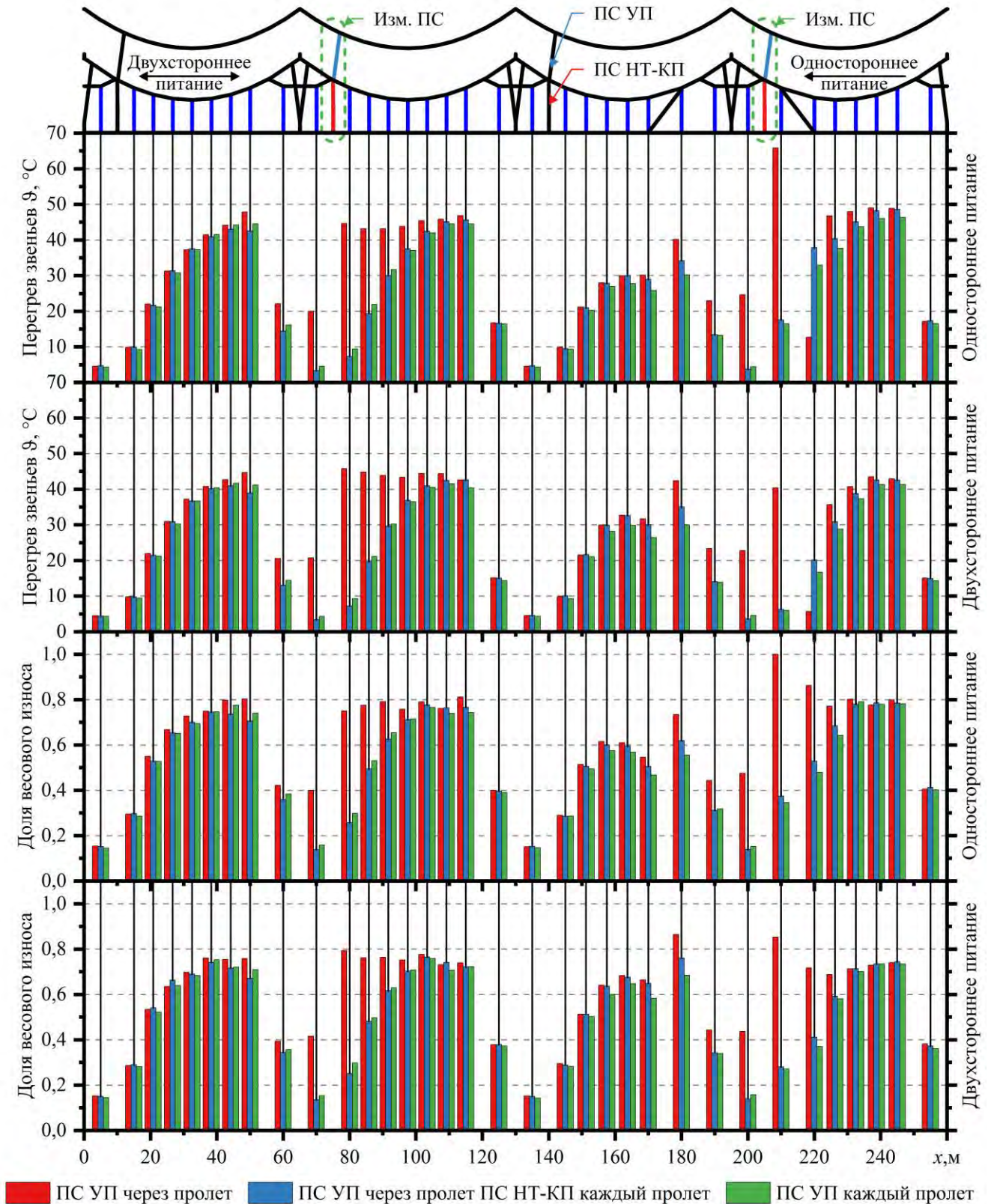


Рисунок 4.2 – Температура перегрева звеньев струн и доля их весового износа при различной расстановке поперечных электросоединителей

На Рисунке 4.3 представлена зависимость температуры от времени при проходе ЭПС звеньев неизолированных усовиков фиксаторов для случая установки поперечных соединителей через пролет. Для всех усовиков фиксаторов характерно протекание через них транзитного тока порядка 0,75 % по причине крепления данного элемента к продольным проводам контактной сети не перпендикулярно, а со смещением. Стоит отметить, что в техническом указании № К-03/12 от 27.01.2012 предусматривается изолировка ветровых струн. Пиковое значение тока через усовики в 1,7 раза ниже пикового тока для струн в середине пролета, но предварительный нагрев транзитным током приближает температурные режимы работы звеньев усовиков к режимам работы звеньев струн. Наибольшие температурные нагрузки звеньев усовиков фиксаторов возникают у ближайшего к тросу средней анкеровки усовика при отсутствии ПС в данном пролете.

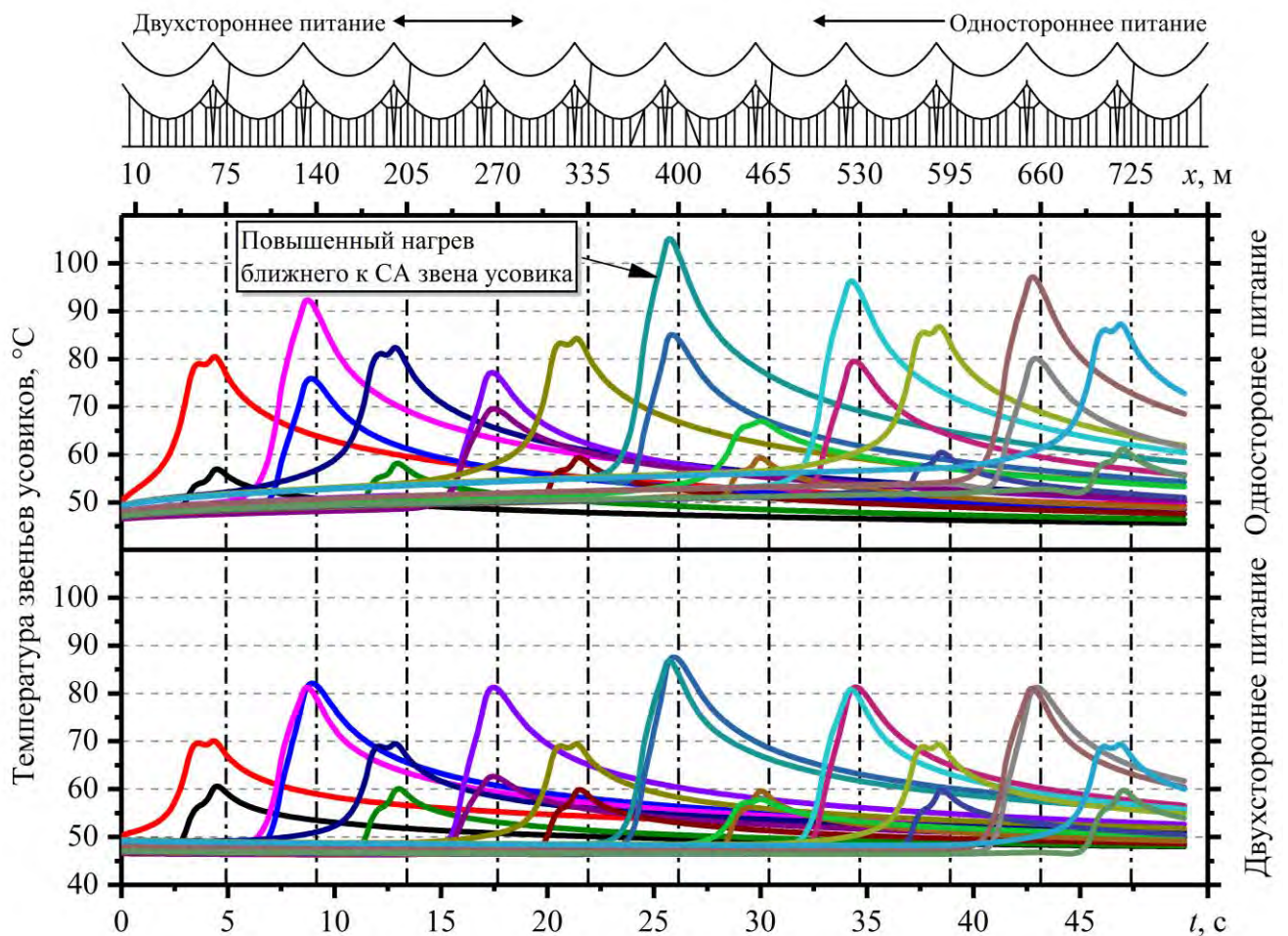


Рисунок 4.3 – Температура звеньев усовиков фиксаторов

Из эксплуатации известно, что повышенный электромеханический износ струн происходит на сопряжении с обводом усиливающего провода и ближайших к нему пролетах. На Рисунке 4.4 представлена зависимость тока струн на данном участке при проходе токоприемника.

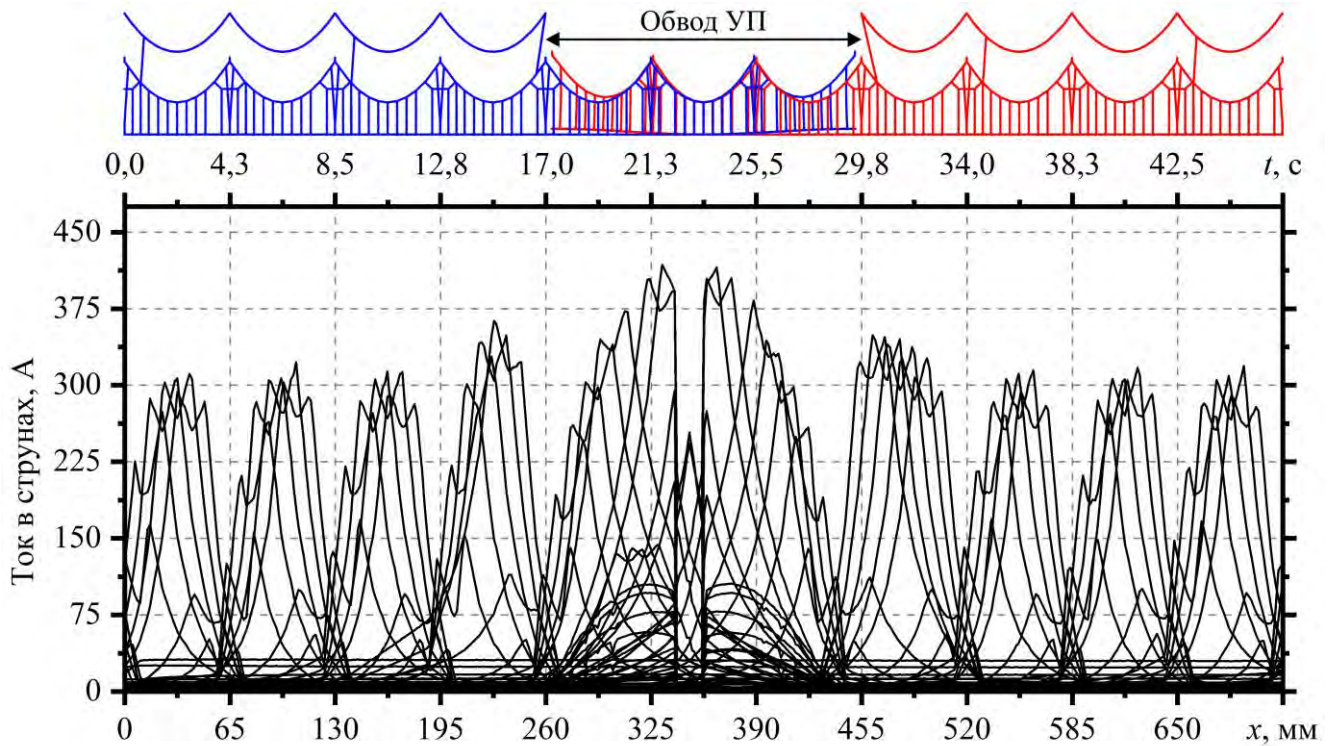


Рисунок 4.4 – Ток в струнах участка сопряжения контактных подвесок при обводе усиливающего провода

Из рисунка видно, что ток в струнах на данном участке в 1,4 раза выше, чем в удаленном пролете, а для ближайших к сопряжению пролетов – в 1,2 раза, что при прочих равных условиях повышает весовой износ звеньев на 77 % и 36 % соответственно.

Полученные результаты показывают, что снижение отказов звеньевых струн по причине электромеханического износа при организации тяжеловесного движения и пропуска поездов повышенной массы возможно только при использовании изолированных струн. Данное изменение требует рассмотрения его влияния на

электротепловую характеристику контактной сети на участке крепления троса средней анкеровки.

Места присоединения питающих проводов и шлейфов разъединителей

Анализ результатов тепловизионного обследования контактной сети показывает, что встречаются случаи перегрева только одного провода из пучка питающих проводов или проводов шлейфов разъединителей. Результаты исследований на основе численного моделирования работы данного узла показывают, что на участке от места присоединения питающих проводов или шлейфов разъединителя до первого поперечного электросоединителя УП в контактной подвеске возникает перераспределение токов между продольными проводами. Данное перераспределение влечет за собой повышенный нагрев НТ и КП, а также разгрузку УП.

Для устранения данного эффекта предлагается использование поперечного электросоединения с УП в зоне присоединения питающих проводов и шлейфов разъединителей. На Рисунке 4.5 схематично представлен вариант модернизации данного узла. Результат выравнивания температуры проводов представлен на Рисунках 4.7–4.10 в рамках полной модернизации. Для варианта исполнения по Рисунку 4.5, а возможно присоединение питающего провода к НТ через дополнительно установленный провод поперечного электросоединителя между НТ и КП.

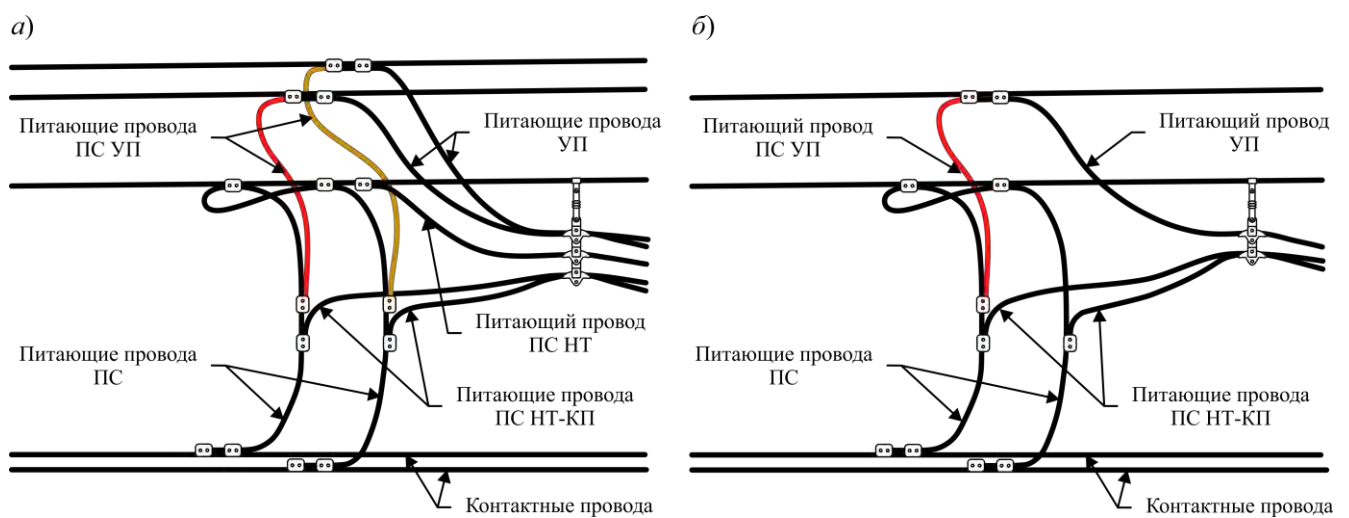


Рисунок 4.5 – Установка дополнительных соединительных проводов в узле подключения питающих проводов

Трос средней анкеровки контактного провода

Впервые влияние троса средней анкеровки контактного провода на перераспределение тока и повышенную нагрузку участка НТ было рассмотрено в [25]. Решение по продольному шунтированию НТ в зоне СА (Рисунок 4.6, *а*) было применено в проекте контактной сети КС-250-3, согласно [87]. Решение по поперечному шунтированию основными спусками было (Рисунок 4.6, *б*) предложено в [32]. По результатам исследований в рамках данной диссертационной работы разработано решение по двойному поперечному шунтированию троса средней анкеровки контактного провода основными и дополнительными спусками (Рисунок 4.6, *в*).

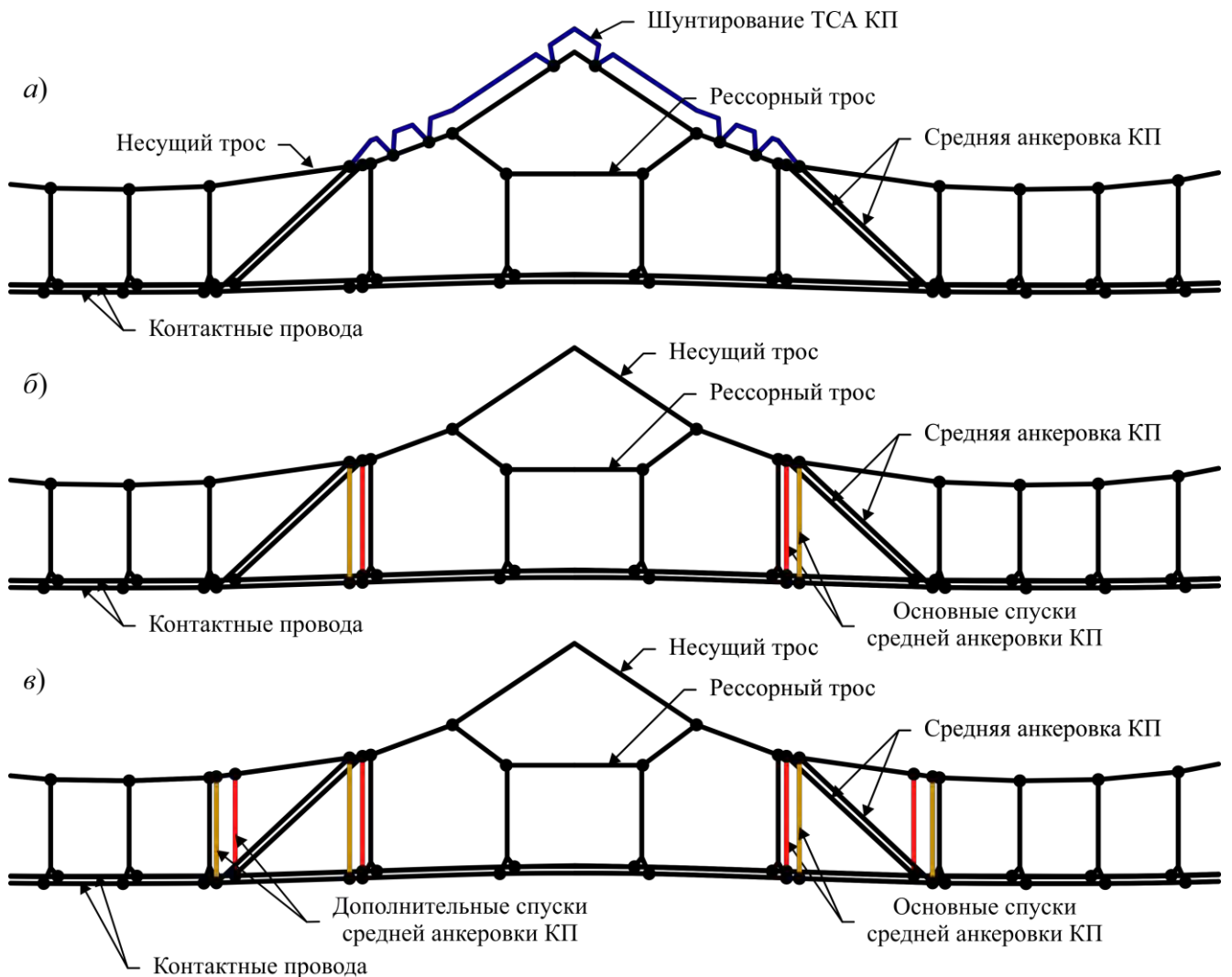


Рисунок 4.6 – Варианты конструктивного исполнения элементов шунтирования троса средней анкеровки контактного провода

В соответствии с техническими указаниями № К–07/11 от 09.12.2011 и № К–02/12 от 26.01.2012 применение проводов марки ПБСМ было запрещено в качестве проводов средней анкеровки. Взамен было предложено использовать бронзовый провод Бр2-95 или его аналог VzII-95 [82]. В последующем, техническим указанием № К–01/15 от 29.06.2015, использование ПБСМ вновь было частично разрешено. Однако, для части участков была осуществлена замена тросов средней анкеровки. В настоящий момент времени на эксплуатируемых контактных подвесках постоянного тока чаще всего средняя анкеровка выполнена из провода ПБСМ1. Также, согласно проекту [87], средняя анкеровка и продольное шунтирование осуществляется проводом ПБСМ1. Стоит отметить, что в эксплуатации остаются участки, на которых применен стальной трос средней анкеровки. В большинстве случаев замена стальных тросов осуществлялась по причине их коррозии. При этом длительный опыт эксплуатации стальных тросов средней анкеровки показывает возможность их применения при должном уровне защиты от коррозии.

Результаты исследований показывают, что чем выше сопротивление троса средней анкеровки, тем ниже его влияние на перераспределение тока в продольных проводах. Таким образом, со стальным тросом средней анкеровки электротепловая характеристика продольных проводов контактной сети в зоне узла средней анкеровки обладает наименьшими температурами перепадами по сравнению с бронзовыми или сталемедными проводами. Полностью исключить влияние средней анкеровки на токораспределение возможно при ее изолированном исполнении путем установки изолятора в разрез металлического троса или при использовании полимерных высокопрочных тросов.

В Таблице 4.1 представлено сравнение различных вариантов конструктивного исполнения узла средней анкеровки контактного провода при использовании проводов различных марок. Для стального троса вариант с продольным шунтированием не рассматривается по причине его высокого электрического сопротивления относительно сопротивления несущего троса.

Таблица 4.1 – Сравнение вариантов модернизации узла средней анкеровки для контактной сети постоянного тока

№	Тип провода	Вариант модернизации	Температура перегрева провода в зоне СА ϑ , °С					
			Изолированные струны			Звеньевые струны		
			НТ ¹	КП ¹	ТСА ²	НТ ¹	КП ¹	ТСА ²
1	ПБСМ1-70	Без модернизации	28,8	4,9	8,5	19	4,7	10,7
2		Шунтирование НТ	4	5,2	10,3	0,3	4,9	12
3		Осн. спуск	5,1	3,3	12	5,9	3,4	12,8
4		Осн. и доп. спуск	4,8	1,6	13,6	5,7	1,1	13,6
5	Бр2-95	Без модернизации	43,2	6,3	8	31,5	7,3	10,7
6		Шунтирование НТ	- 7,1	8,1	11,4	- 5,3	8,9	13,8
7		Осн. спуск	5,5	5	14	6,4	5,7	15,2
8		Осн. и доп. спуск	5,4	2,2	17,2	6,3	1,63	17,1
9	Діера, D=11мм [138]	Без модернизации	12,8	2,7	7,5	7,8	1,9	8,2
10		Осн. спуск	4,4	1,9	8,4	5	1,8	8,6
11		Осн. и доп. спуск	3,9	1,1	8,8	4,8	0,5	8,7

На Рисунке 4.7 представлено сравнение температуры продольных проводов при модернизации узла средней анкеровки с использованием поперечного шунтирования основными и дополнительными спусками, а также при установке поперечного электросоединения к усиливающему проводу в месте крепления питающих проводов. Из рисунка видно, что при модернизированной контактной подвеске происходит выравнивание температуры продольных проводов вследствие приближения картины токораспределения в них к естественной³. На участках контактного провода и несущего троса вблизи средней анкеровки, которые ранее были разгружены вследствие перераспределения токов, наблюдается повышение температуры, и, напротив, – снижение температуры на перегруженных участках. Наибольшее снижение температуры происходит для участка несущего троса между креплениями рессорного троса и троса средней анкеровки.

¹ Перегрев над температурой данного провода в удаленном пролете без средней анкеровки.

² Перегрев провода над температурой окружающей среды.

³ Модель естественного токораспределения рассматривается в разделе 1.4.

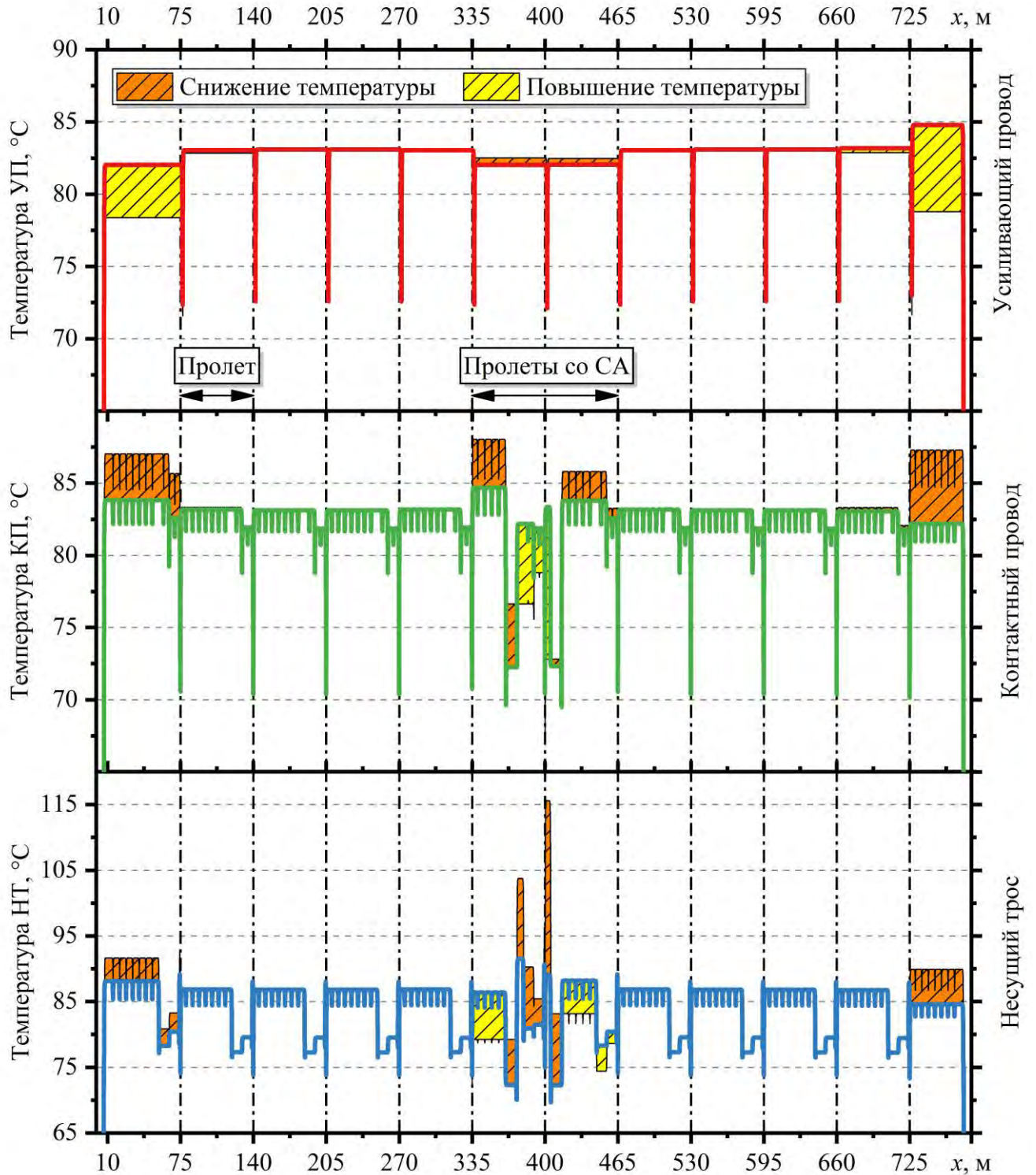


Рисунок 4.7 – Температура продольных проводов контактной сети с изолированными струнами при модернизации узлов средней анкеровки и питающих проводов: цветные линии – при поперечном шунтировании основными и дополнительными спусками, штриховка – изменение температуры относительно подвески без модернизации

На Рисунке 4.8 представлено аналогичное сравнение для контактной подвески со звеньевыми струнами. Из рисунка видно, что звеньевые струны участвуют в распределении тока в контактной сети даже в режиме транзита тягового тока. Данный факт приводит к меньшему перегреву несущего троса в пролетах со средней анкеровкой вследствие частичного стекания тока по струнам, ближайшим к средней анкеровке¹. Для подвесок со звеньевыми струнами характерно ступенчатое повышение температуры на участке контактного провода перед узлом крепления средней анкеровки. Также для подвесок со звеньевыми струнами и рессорным тросом характерен всплеск температуры на участках до и после рессорного троса, в особенности на участке между креплениями рессорного троса и поперечного электросоединителя. Однако зажимы, установленные на данном участке², снижают возможный перегрев несущего троса. При расчете без учета зажимов, согласно модели нагрева проводов по [28], представленной на Рисунках 1.10 и 1.9, видно, что всплески температуры на данном участке выше.

В остальном улучшение электротепловой характеристики продольных проводов происходит аналогично случаю с изолированными струнами – поперечное шунтирование выравнивает токовую нагрузку, приближая токораспределение в проводах к естественному. Выравнивание температуры происходит как на несущем тросе, так и на контактном проводе, в отличие от варианта с продольным шунтированием. При использовании продольного шунтирования на участке контактного провода происходит даже повышение температуры. Как видно из Таблицы 4.1 с повышением проводимости шунтирующего провода данный эффект только усиливается.

¹ Стеkanie тока по струнам в режиме транзита тягового тока ведет к их предварительному нагреву и повышенным тепловым нагрузкам на звенья струн при проходе токоприемника. Данное воздействие более подробно рассматривается в пункте настоящего раздела, который посвящен звеньевым струнам.

² Согласно [74], поперечные электросоединители устанавливаются на расстоянии 0,2–0,5 м от мест крепления рессорного троса.

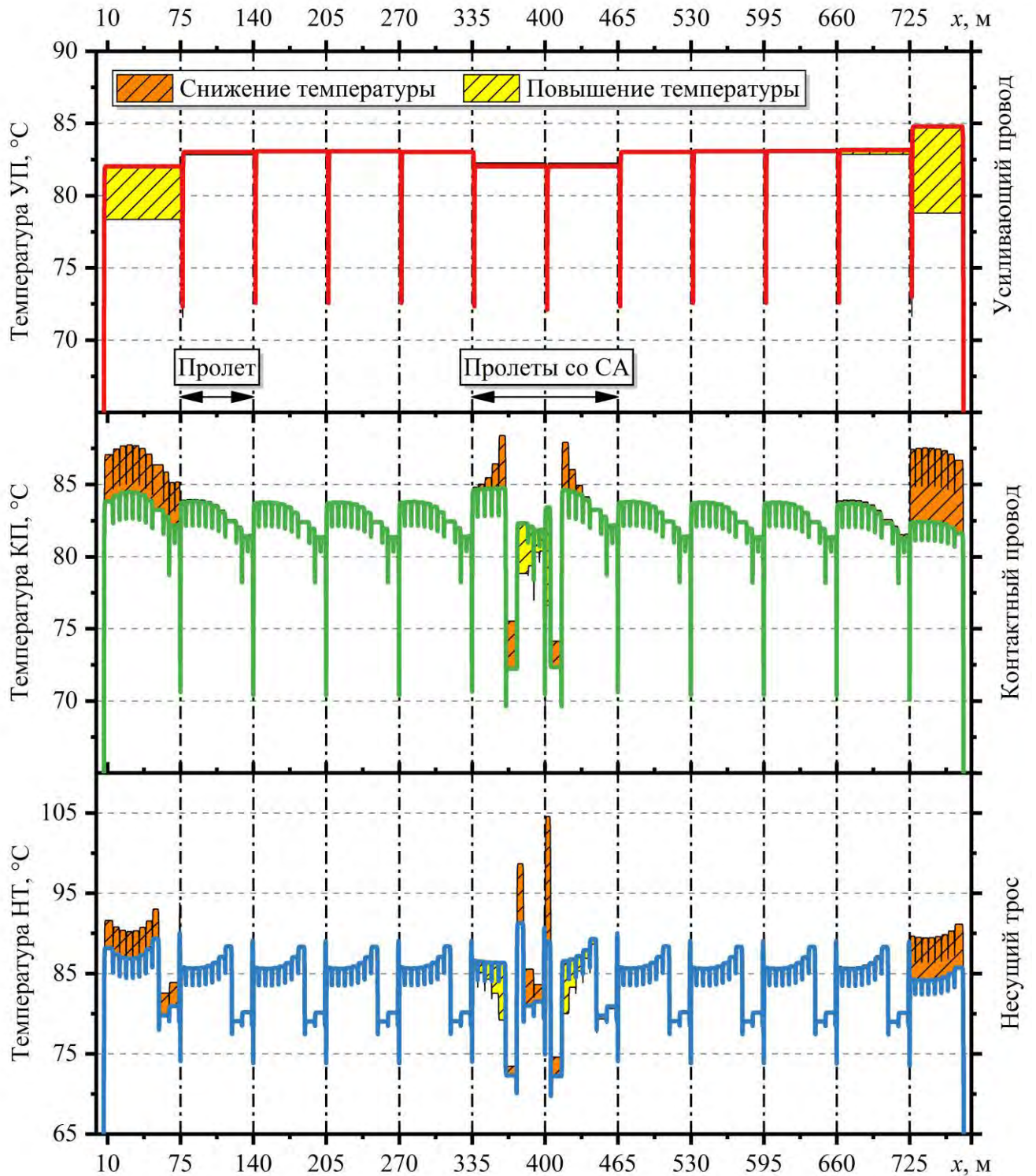


Рисунок 4.8 – Температура продольных проводов контактной сети со звеньевыми струнами при модернизации узлов средней анкеровки и питающих проводов: цветные линии – при поперечном шунтировании основными и дополнительными спусками, штриховка – изменение температуры относительно подвески без модернизации

На Рисунке 4.9 представлено сравнение варианта продольного шунтирования несущего троса в зоне средней анкеровки и поперечного шунтирования основными и дополнительными спусками. Как видно из рисунка вариант продольного шунтирования существенно снижает перегрев несущего троса таким образом, что в некоторых случаях, согласно Таблице 4.1, на участке шунтирования температура несущего троса становится наименьшей на анкерном участке. Так как продольное шунтирование несущего троса не затрагивает контактные провода, то температура на участке перед средней анкеровкой остается наивысшей по всей длине анкерного участка. При этом происходит даже повышение температуры контактного провода вследствие усиления эффекта перераспределения в зоне средней анкеровки по причине повышения проводимости участка несущего троса между креплениями тросов средней анкеровки.

Из рисунка видно, что при продольном шунтировании несущего троса происходит разгрузка усиливающих проводов в пролетах со средней анкеровкой. Это означает, что в данном случае поперечные электросоединители задействованы в протекании транзитного тока, однако их перегрев не превышает $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Поперечное шунтирование основными и дополнительными спусками не всегда позволяет снизить температуру несущего провода до уровня, который достигается с помощью продольного шунтирования несущего троса. Однако данное решение является более сбалансированным, так как выравнивает токораспределение во всех проводах контактной подвески.

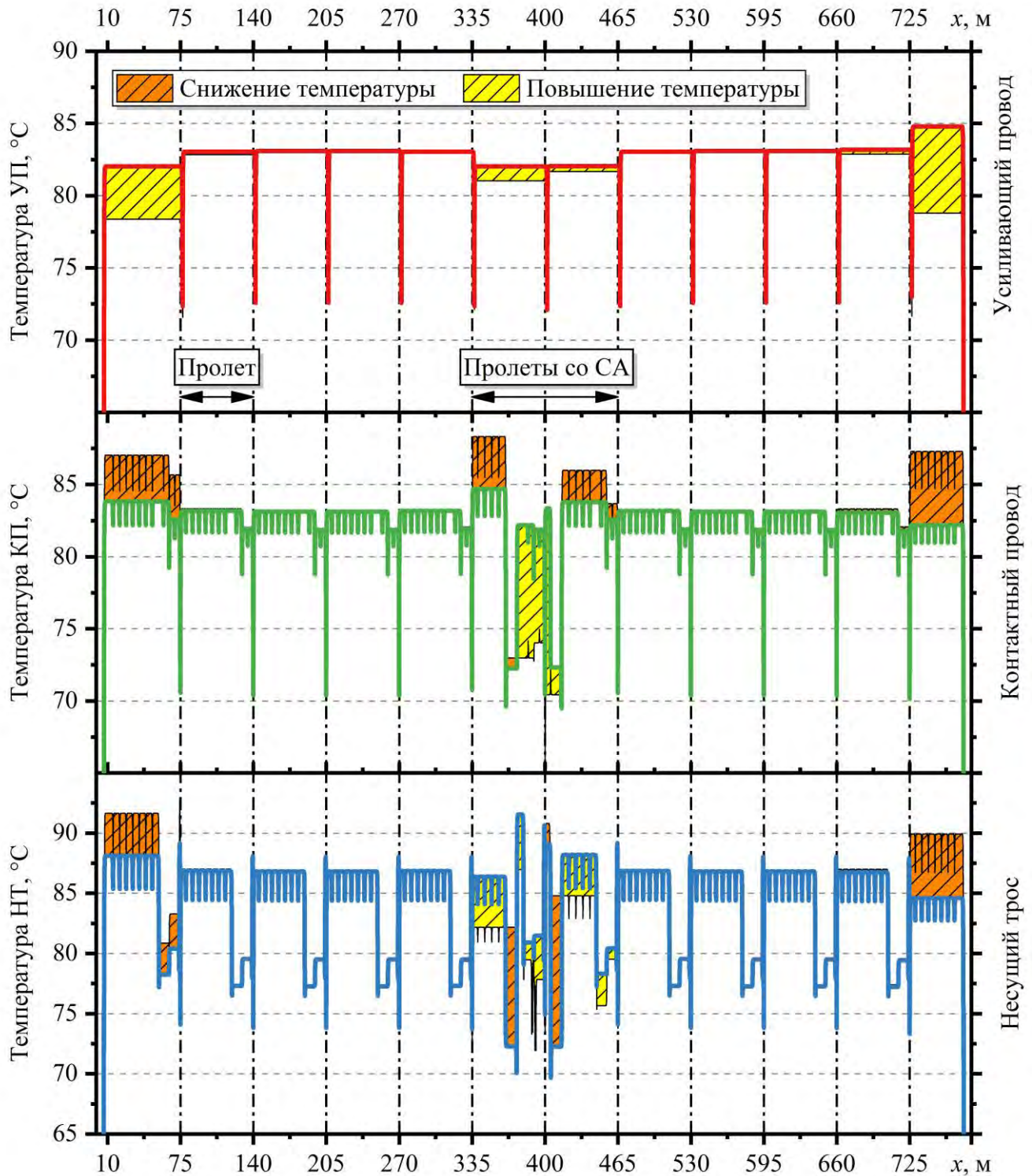


Рисунок 4.9 – Температура продольных проводов контактной сети с изолированными струнами при модернизации узлов средней анкеровки и питающих проводов: цветные линии – при поперечном шунтировании основными и дополнительными спусками, штриховка – изменение температуры относительно варианта с продольным шунтированием

На Рисунке 4.10 представлено аналогичное сравнение продольного и поперечного шунтирования для контактной подвески со звеньевыми струнами. Из рисунка видно, что вследствие стекания тока по струнам увеличение температуры контактного провода перед тросом средней анкеровки при продольном шунтировании несущего троса происходит ступенчато. При поперечном шунтировании струны, ближайшие к средней анкеровке, оказываются зашунтированы, что снижает их токовую и тепловую нагрузку как при транзите тягового тока, так и при проходе электроподвижного состава.

Таким образом, анализируя влияние троса средней анкеровки по Рисункам 4.7–4.10, а также по Таблице 4.1 можно сделать вывод о том, что для снижения тепловой нагрузки на продольные провода вблизи троса средней анкеровки необходимо производить модернизацию данного узла по схемам, предложенным на Рисунке 4.6. Из рассмотренных вариантов конструктивного исполнения модернизации наиболее предпочтительным является поперечное шунтирование троса средней анкеровки основными и дополнительными спусками с использованием стальных или сталемедных проводов. Данная модернизация рекомендуется для подвесок с изолированными струнами, а в случае использования бронзового троса средней анкеровки является необходимой для исключения недопустимого перегрева несущего троса.

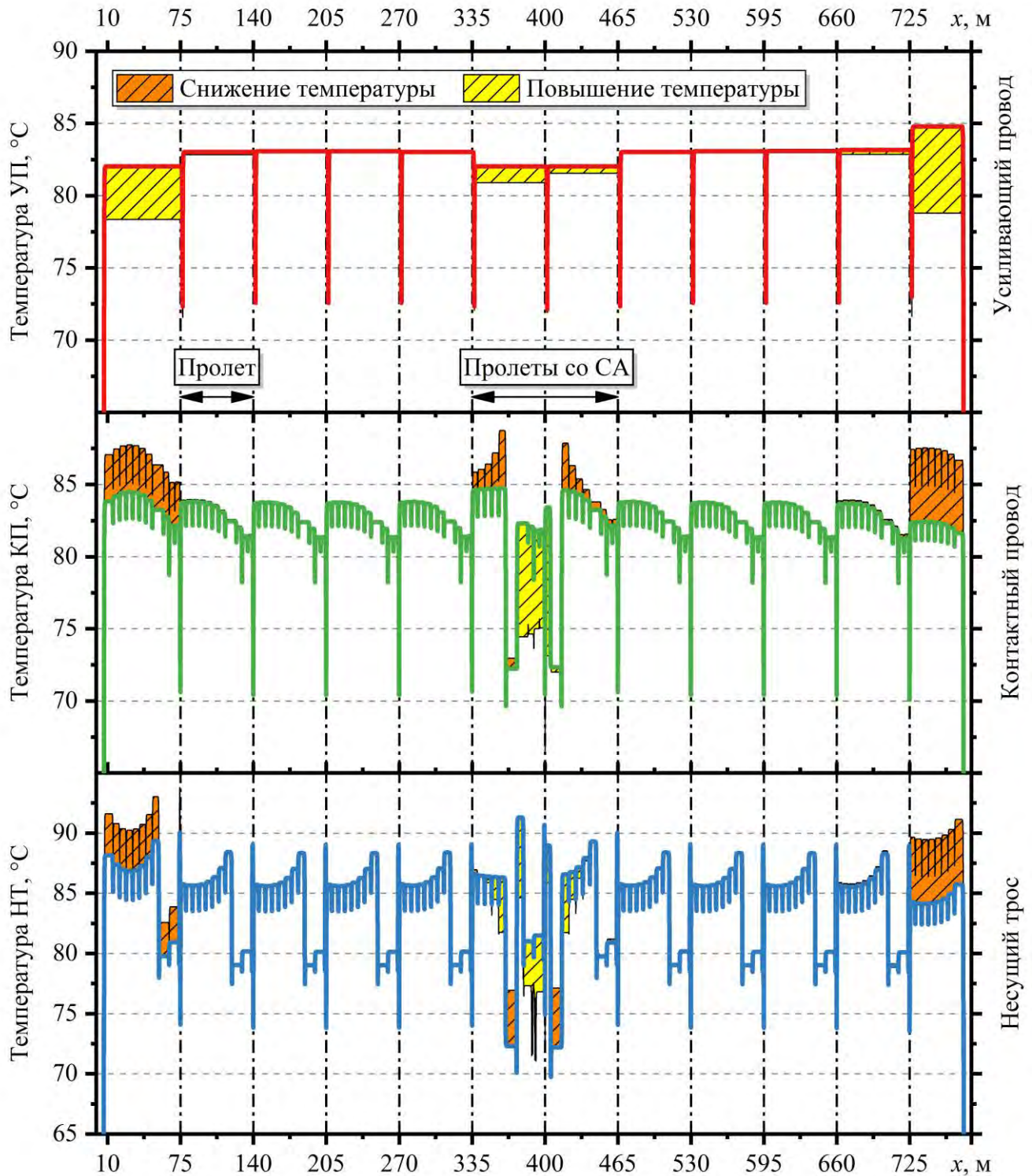


Рисунок 4.10 – Температура продольных проводов контактной сети со звеньевыми струнами при модернизации узлов средней анкеровки и питающих проводов: цветные линии – при поперечном шунтировании основными и дополнительными спусками, штриховка – изменение температуры относительно варианта с продольным шунтированием

Обвод усиливающего провода на сопряжениях анкерных участков

По результатам тепловизионного обследования контактной сети постоянного тока наиболее часто выявляются перегревы у проводов и зажимов обвода усиливающих проводов на сопряжениях анкерных участков. В эксплуатации данный узел имеет множество вариантов конструктивного исполнения в зависимости от года постройки, произведенных ремонтов или реконструкции участка контактной сети. При разработке варианта модернизации данного узла рассмотрен наиболее часто встречающийся вариант обвода, представленный на Рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Узел обвода усиливающего провода

Из рисунка видно, что провода обвода усиливающих проводов проходят по несущему тросу рабочей подвески и соединяются с контактными проводами анкеруемой ветви в месте установки поперечного электросоединителя на рабочей подвеске. При этом осуществляется поддерживающее крепление проводов обвода к несущему тросу через изолированную струну без осуществления электрического соединения. С точки зрения токораспределения и нагрева проводов анкеруемой ветви данная конструкция влечет за собой стекание тока по струнам из контактных проводов в несущий трос.

На Рисунке 4.12 представлено сравнение температуры проводов при различном конструктивном исполнении прохода усиливающего провода через сопряжение анкерных участков.

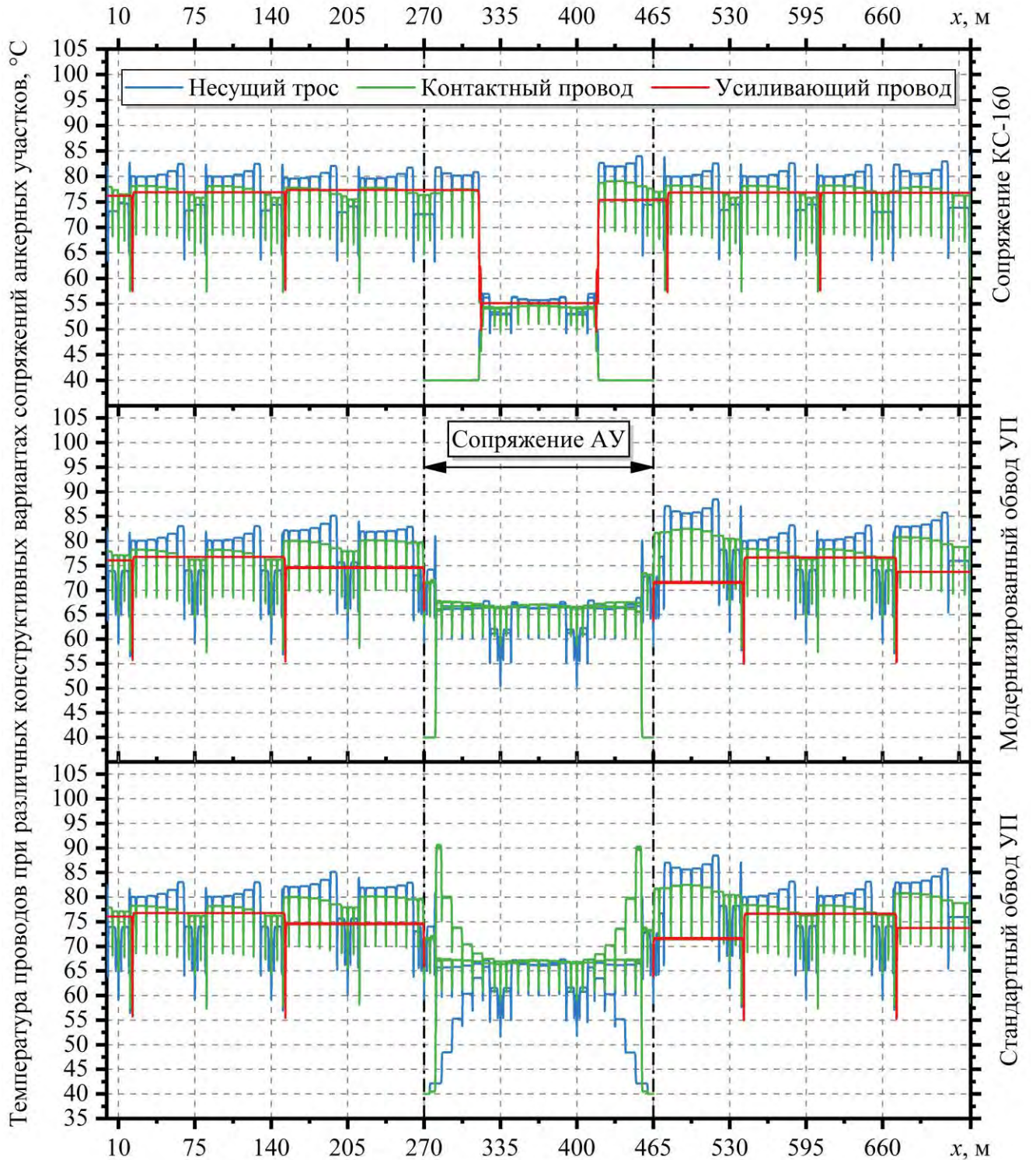


Рисунок 4.12 – Температура проводов контактной сети при различных вариантах конструктивного исполнения прохода усиливающего провода на сопряжении анкерных участков

Из рисунка видно ступенчатое снижение температуры контактного провода с аналогичным ступенчатым повышением температуры несущего троса в результате стекающего по струнам тока. Данный процесс характерен для пролетов контактной сети, отходящих на анкеровку. При модернизации узла обвода несущего троса, согласно Рисунку 4.13, происходит шунтирование струн и, соответственно, их токовая и тепловая нагрузка снижаются. Однако повышенный электромеханический износ происходит именно для струн рабочей подвески. Это связано, прежде всего, с повышенной токовой нагрузкой, согласно Рисунку 4.4, а также с воздействием токоприемника, что влечет за собой разгрузку струн и работу звеньев как разрывных коммутационных контактов. Для струн анкеруемых ветвей не характерно воздействие токоприемника, а, следовательно, и работа звеньев в режиме разрыва тока, что влечет за собой фактическое отсутствие износа данных струн в эксплуатации.

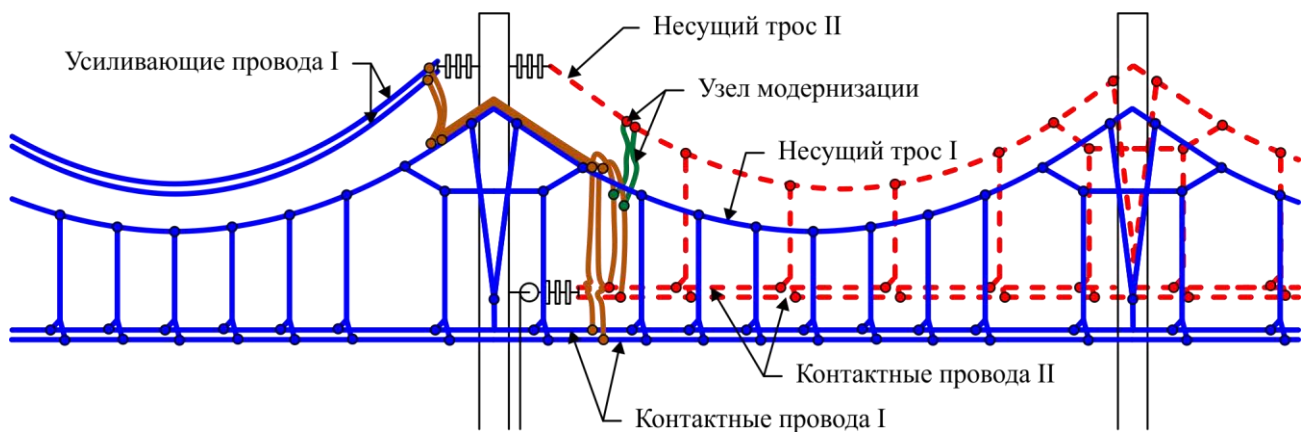


Рисунок 4.13 – Схема модернизации узла обвода усиливающего провода

При этом стоит отметить, что, согласно технологической карте №5.5 [139], обвод содержит соединение с несущим тросом, однако в эксплуатации на Свердловской железной дороге часто встречается вариант, представленный на Рисунке 4.11. В диссертационной работе расчетным путем доказана целесообразность соединения проводов обвода с несущим тросом анкеруемой ветви.

Влияние установки поперечных электросоединителей на температуру контактного провода

На Рисунке 4.14 представлена зависимость температуры контактного провода при съеме тока величиной 4400 А двумя токоприемниками локомотива 2ЭС-10 с бустерной секцией при двухстороннем питании после прогрева контактной подвески с изолированными струнами максимально допустимым транзитным током до установившейся температуры.

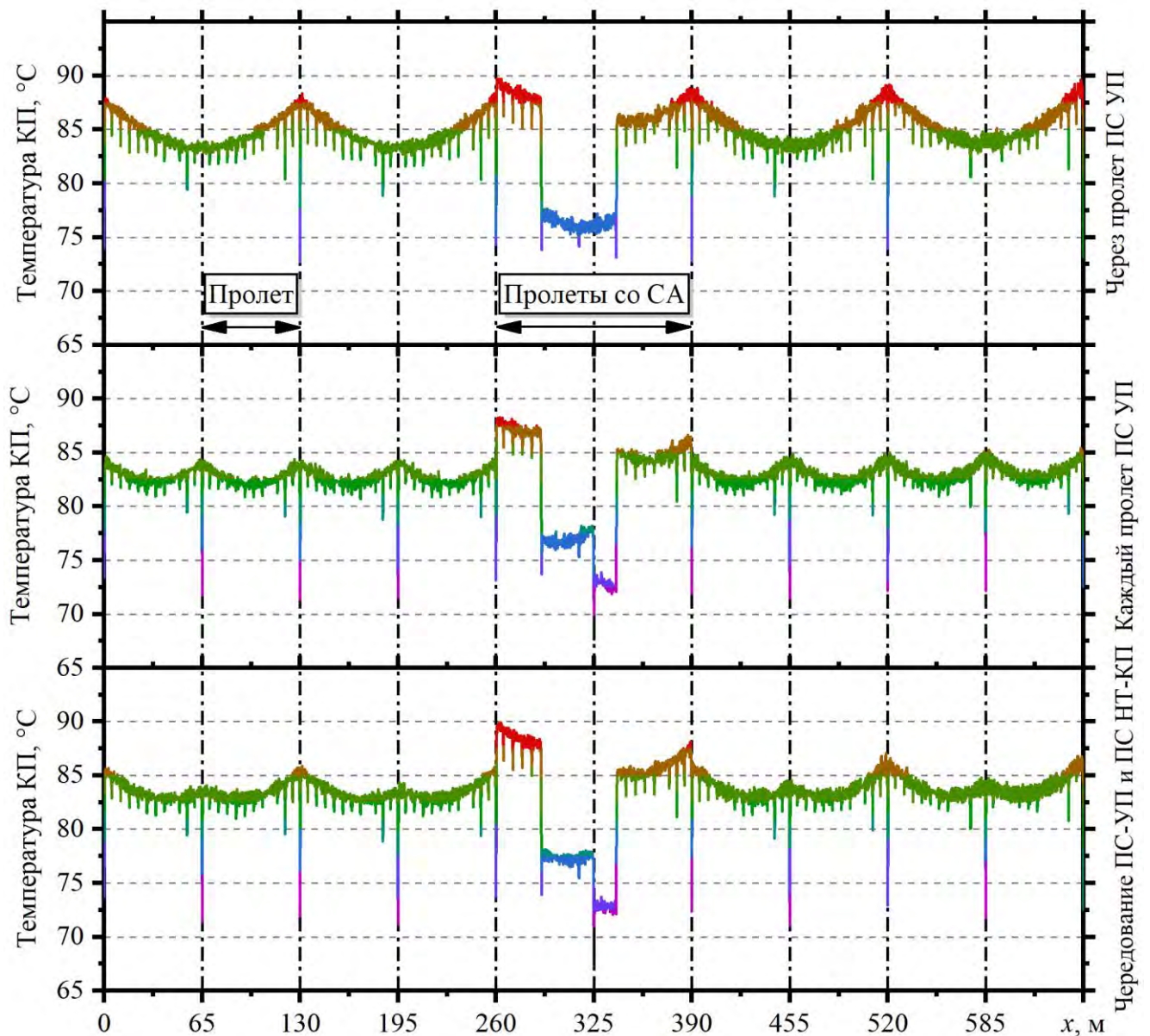


Рисунок 4.14 – Температура контактного провода после прохода локомотива 2ЭС10 с бустерной секцией на скорости 55 км/ч при двухстороннем питании

Из рисунка видно, что установка поперечных электросоединителей между несущим тросом и контактным проводом в каждом пролете снижает температуру провода вблизи мест подключения поперечных электросоединителей от усиливающих проводов, расположенных через пролет, на 2,4 °С. Установка поперечных электросоединителей от усиливающих проводов в каждом пролете снизит данную температуру еще на 1,3 °С. Суммарное снижение температуры от установки поперечных электросоединителей в каждом пролете относительно варианта установки через пролет происходит на 3,7 °С. Данное снижение температуры не является существенным для контактного провода, однако повышает нагрузку на соединение поперечного электросоединителя к несущему тросу, повышая вероятность выявления его дефекта при тепловизионной диагностике.

Участки местного износа контактного провода

Зависимость перегрева участка местного износа от его длины и степени износа для установившегося режима рассмотрена в разделе 3.7. Наиболее опасен перегрев участков местного износа контактного провода при 2,5-кратной перегрузке, согласно [74], так как в данном случае участок местного износа в большей степени подвержен повышенному термическому разупрочнению, что в свою очередь может привести к обрыву контактного провода.

В Таблице Б.1 сведены допустимые температуры нагрева проводов в зависимости от времени воздействия. Максимальная допустимая температура для медного контактного провода в режиме одномоментного протекания тока составляет 140 °С, согласно [74].

На Рисунке 4.15 представлена зависимость перегрева участка контактного провода с предельным местным износом 35 % от длины данного участка при 2,5-кратной перегрузке после прогрева подвески допустимым транзитным током до установившейся температуры. На остальных участках контактный провод имеет износ 15 %. Из рисунка видно, что при температуре окружающего воздуха 40 °С на участке контактного провода без местного износа перед средней анкерровкой у подвески без модернизации наблюдается перегрев на 110 °С, что приведет к нагреву провода до 150 °С. Для участка контактного провода в середине пролета и наименее

загруженного участка под рессорным тросом температура перегрева достигает 100 °С, что при температуре окружающего воздуха 40 °С повлечет нагрев провода на данных участках до 140 °С. Данная температура является верхней гранью температуры, допустимой нормативно-технической документацией.

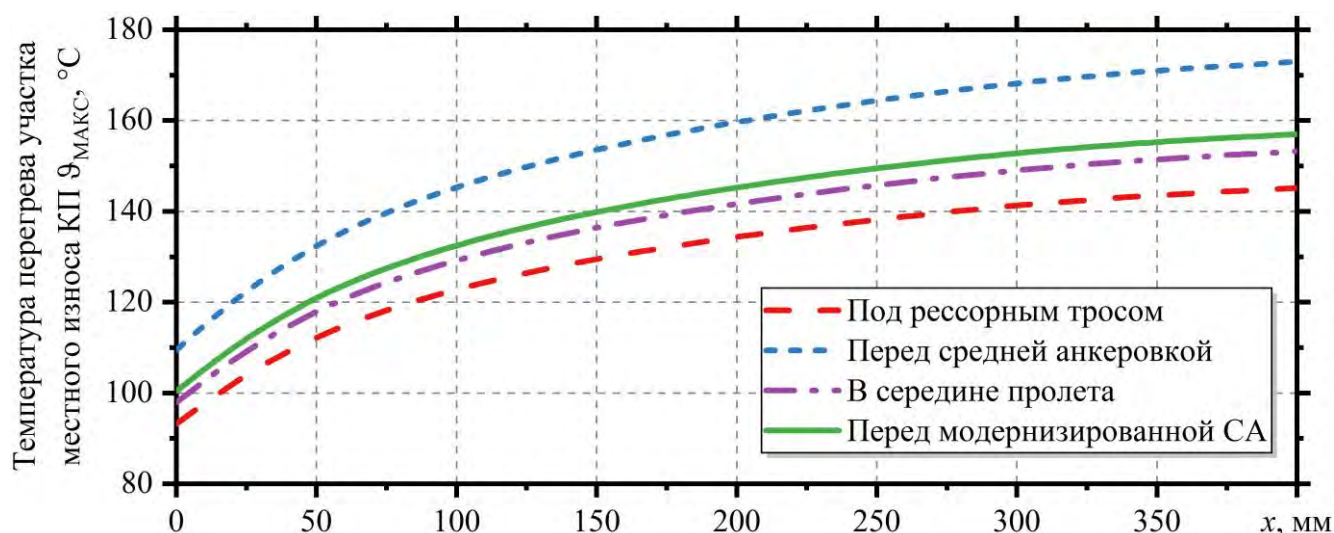


Рисунок 4.15 – Температура перегрева участка предельного местного износа КП в зависимости от его длины при 2,5-кратной перегрузке через 1 минуту

При модернизации узла средней анкерровки поперечным шунтированием основными и дополнительными спусками удастся снизить температуру перегрева провода на наиболее нагруженном участке перед средней анкерровкой до 100 °С. Любое значение предельного местного износа контактного провода в 35 % будет приводить к повышенному термическому разупрочнению провода в месте местного износа. Кроме того, на практике встречаются случаи длительной эксплуатации на малодеятельных участках контактного провода с местным износом, превышающим 35 %. Следует отметить, что рассмотренный расчетный режим является наихудшим и не всегда возможен в условиях эксплуатации, что позволяет длительное время использовать предельно изношенные провода при токовых нагрузках ниже номинальных. Также на участках местного износа наблюдается эффект накопления температурного разупрочнения, что приводит к обрывам контактного

провода не сразу в момент токосъема или протекания токов перегрузки, а с отсрочкой во времени.

4.2 Разработка этапов модернизации узлов контактной сети постоянного тока

На основании рассмотренных в разделе 4.1 «узких мест» с точки зрения тепловой нагрузки разработан перечень необходимых комплектующих для проведения модернизации узла контактной сети (Таблица 4.2).

Модернизация узлов осуществляется как для устаревших контактных подвесок, находящихся в эксплуатации длительное время, так и для подвесок нового типа КС-160 [110; 140], КС-200 [141] и КС-250-3 [87].

Особое внимание уделяется подвескам с алюминиевыми усиливающими проводами. Согласно исследованиям, опубликованным в статье [35], переходные сопротивления соединительных зажимов алюминиевых проводов в эксплуатации могут достигать значений 10 мОм и выше, вплоть до полного отсутствия контакта при напряжениях до 36 В. Как показывают результаты исследований, представленных в разделе 4.3, данное значение сопротивления находится в области сопротивления с максимальным тепловыделением для поперечных электросоединителей усиливающих проводов. Это означает, что при проходе электроподвижного состава при данном значении переходного сопротивления у соединения поперечного электросоединителя с усиливающими проводами наблюдается наибольшая температура перегрева, которая может привести к отказу соединения. Усиливающий провод имеет множественные соединения с проводом обвода на сопряжениях анкерных участков, через которые протекает транзитный ток. Тем не менее, не для всех контактных соединений повышенное переходное сопротивление приводит к аварийному перегреву. Поэтому узлы с наибольшей токовой и тепловой нагрузкой предлагается монтировать с использованием дублирующих зажимов.

В Таблице 4.2 приведен расход материалов для проведения модернизации узлов, рассмотренных в разделе 4.1.

Таблица 4.2 – Расчет количества материалов для модернизации узлов контактной сети постоянного тока для одного анкерного участка

№	Узел модернизации	Комплекующие		Кол-во	Пояснения
1	Средняя анкеровка	- зажимы	КС-051-2 КС-052-4	2 шт. 2 шт.	Поперечное шунтирование средней анкеровки основными и дополнительными спусками
		- провод	ПБСМ1 Бр2-95 Диера	3,8-4,5 м	
2	Звеньевые струны и усовики фиксаторов	- орешковый изолятор	ИТО-20	196-308 шт.	Установка в звенья струн орешковых или полимерных изоляторов, либо применение полимерных струн
		- полимерные струны	ПАТ	340-620 м	
		- коуш полимерный	ОТУ 32-4526-37	196-308 шт.	
3	Поперечный электросоединитель усиливающего провода	- зажимы	КС-069-2	12-24 шт.	Дублирование зажимов при присоединении к усиливающему проводу
4	Обвод усиливающего провода на сопряжениях	- зажимы	КС-055-6	4 шт.	Установка электросоединителя к несущему тросу анкеруемой ветви
		- провод	М-120	3-4 м	
5	Питающие провода и шлейфы разъединителей	- зажимы	КС-069-2 КС-055-6	2-4 шт. 1-2 шт.	Установка поперечного электросоединителя к усиливающим проводам в месте присоединения питающих проводов
		- провод	М-95	1,6-2 м	

Узлы модернизации в Таблице 4.2 приведены в порядке, рекомендуемом для применения. Данный порядок 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 ТСА КП на участках контактной сети с изолированными струнами приведет к повышенной тепловой нагрузке несущего троса согласно Таблице 4.1 и Рисунку 4.7. При этом в эксплуатации встречается вариант применения изолированных струн взамен звеньевых при 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 ТСА КП.

В Таблице 4.3 приведены этапы модернизации контактной сети с пояснениями о возможности применения в зависимости от текущего состояния подвески.

Таблица 4.3 – Этапы модернизации контактной сети постоянного тока

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 провода Бр2-95 или ВzII-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.

Также стоит отметить, что с повышением токовой нагрузки при тяжеловесном движении и пропуске поездов повышенной массы значения температурных деформаций, возникающих в компенсированных проводах контактной сети, требуют

замены устаревших трехблочных компенсаторов на блочно-полиспастные компенсаторы КБП-3, ретракторы или аналогичные по характеристикам компенсации устройства.

Указанные этапы модернизации позволяют повысить нагрузочную способность контактной сети постоянного тока до 6 %.

4.3 Оценка возможности выявления дефектных элементов контактной сети постоянного тока при тепловизионной диагностике на основании электротеплового расчета

Тепловизионная диагностика нашла широкое применение в электроэнергетике [142]. Тепловизионная диагностика контактной сети осуществляется в соответствии с [143; 144]. В работе [67] представлено широкое исследование применения технологии тепловизионной диагностики контактной сети. Одним из основных принципов тепловизионной диагностики контактной сети является регистрация максимальной температуры в кадре термограммы, что позволяет сделать вывод о дефектности элемента. Однако, в связи со сложной схемой соединения проводов в пространстве, а также непостоянным протеканием тока в контактной сети тепловизионная диагностика является эффективной не для всех элементов и соединений. Так, в [72], предложены способы повышения токовой нагрузки на элементы контактной сети для достижения температур, позволяющих диагностировать дефектные элементы. К ним относятся такие способы, как организация движения поездов пакетами, применение локомотива с реостатной нагрузкой, а также специальные схемы питания и секционирования. В настоящее время наиболее распространенной методикой тепловизионной диагностики является организация прохода вагона-лаборатории контактной сети (ВИКС) после одного из поездов согласно графику движения. Как правило, данные о токовой нагрузке поезда, за которым следует ВИКС, при диагностике недоступны и их определение возможно либо на основании тяговых расчетов, либо по данным локомотива в случае их регистрации и сохранения. Таким образом, токовая нагрузка чаще всего остается неизвестной. На практике

проход ВИКС осуществляется как за грузовыми, так и за пассажирскими поездами, что влечет за собой различный характер токовой нагрузки как по времени воздействия, так и по величине. При данном подходе наиболее эффективно осуществляется диагностика продольных проводов и их соединений, участвующих в транзите тягового тока. Через поперечный электросоединитель ток протекает лишь в момент прохода токоприемника вблизи данного элемента. По данным ВИКС, а также [67] наиболее часто выявляемыми дефектами являются: обводы усиливающих проводов, питающие фидеры и их шлейфы, разъединители, стыки проводов КС и поперечные электросоединители. При этом учет дефектов по типу зажима поперечного электросоединителя не производился, однако из эксплуатации известно, что наиболее часто выявляется дефект зажима КС-069 типа ПАМ на соединении с алюминиевым усиливающим проводом.

При возникновении дефектного контактного соединения происходит изменение токораспределения и снижение доли тока, протекающего через дефектный элемент. Напротив, в дублирующих элементах, не являющихся дефектными, происходит увеличение доли тока и, соответственно, повышение температуры.

Учитывая наличие дублирующих путей протекания тягового тока, соединительные зажимы поперечных электросоединителей фактически при любом значении переходного сопротивления могут не иметь повышенного нагрева относительно проводов контактной сети.

Поперечный электросоединитель

Рассмотрим влияние значения переходного сопротивления соединительных зажимов поперечного электросоединителя на усиливающем проводе, несущем тросе и контактном проводе при расположении поперечных электросоединителей в каждом пролете и через пролет.

Расчет участка выполнен для случая двухстороннего питания при температуре окружающего воздуха 25 °С, скорости ветра 2 м/с, в ночное время суток – оптимальное время проведения тепловизионной диагностики, т.к. солнечная радиация отсутствует. Для расчета выбрана контактная подвеска, состоящая из проводов М-95 + 2МФ-100 + 2А-185. Звеньевые струны и усовики фиксаторов

выполнены из проволоки БСМ-4, рессорный трос – БСМ-6, поперечные электросоединители выполнены из провода М-95, трос средней анкеровки – ПБСМ1-70. Коэффициент поглощения солнечной радиации β и степень черноты поверхности проводов и зажимов ϵ приняты, согласно [19], как для проводов, длительное время находящихся в эксплуатации, и равны 0,75. Скорость движения ЭПС 30 км/ч. Пиковое значение тока, протекающего через ПС без дефектных соединений, на участке от УП составило 2150 А, а на участке от НТ – 2350 А.

Согласно [7, с. 75], одной из причин протекания тока по струнам и фиксаторам является окисление между отдельными проволоками ПС и протекание тока только по проволокам наружного повива. Как показали исследования, приведенные в разделе 4.1, протекание тока по струнам и фиксаторам происходит даже при полностью исправных ПС, установленных в каждом пролете. Вопрос диагностики дефекта окисления жил многопроволочных проводов рассматривается в данном разделе ниже.

На Рисунке 4.16 представлена зависимость доли эффективного значения тока, протекающего через соединительный зажим усиливающего провода и поперечного электросоединителя, и тепловыделения, приведенного к значению тока электровоза, от значения переходного сопротивления. Из рисунка видно, что для случая расположения поперечных электросоединителей в каждом пролете наибольшее тепловыделение в зажиме возникает в диапазоне переходного сопротивления от 7 до 22 мОм, а для случая расположения поперечных электросоединителей через пролет – от 16 до 31 мОм.

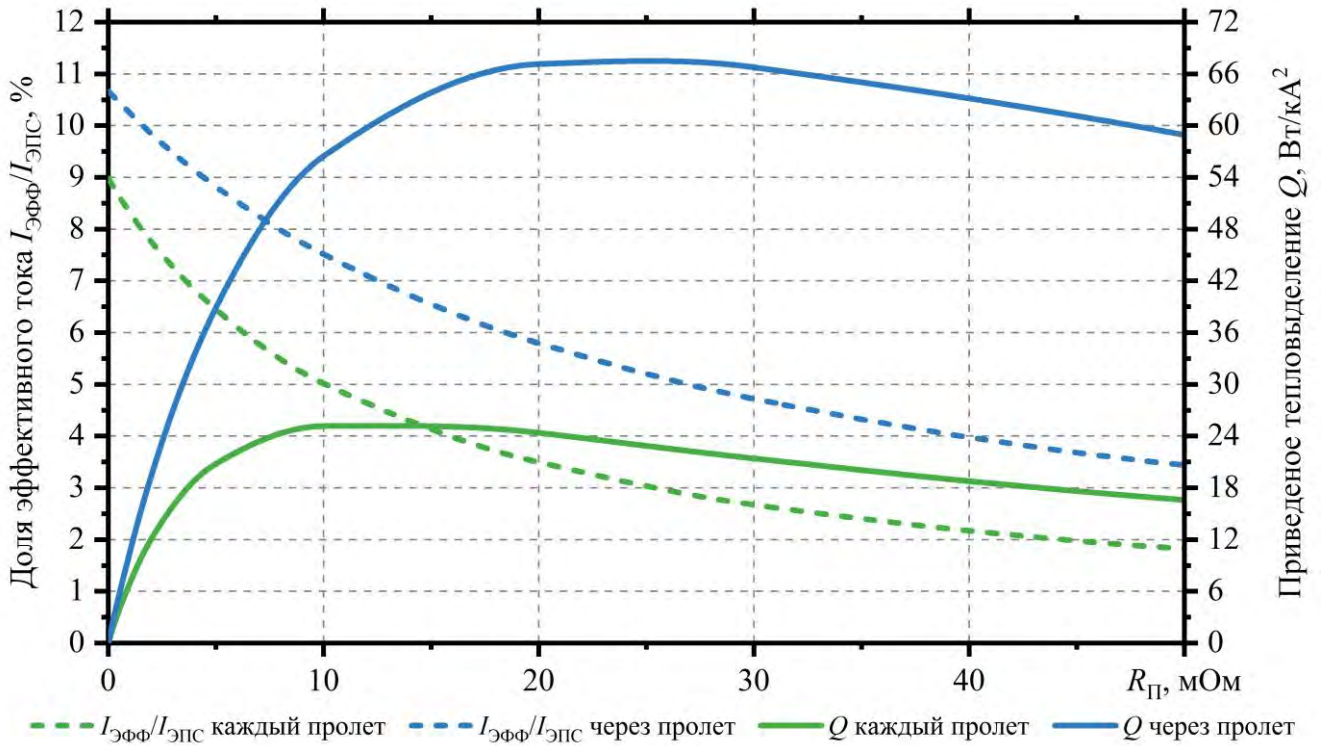


Рисунок 4.16 – Доля тока и удельное тепловыделение в зажиме поперечного электросоединителя и усиливающего провода в зависимости от переходного сопротивления $R_{П}$

На Рисунке 4.17 представлены аналогичные зависимости для соединительного зажима поперечного электросоединителя и несущего троса. Из рисунка видно, что наибольшее тепловыделение в зажиме возникает при значении переходного сопротивления в районе 2 мОм как для случая расположения ПС через пролет, так и для случая расположения ПС в каждом пролете. При этом значения максимального тепловыделения зажимов поперечного электросоединителя в соединении с несущим тросом в 40 раз ниже, чем в соединении с усиливающим проводом.

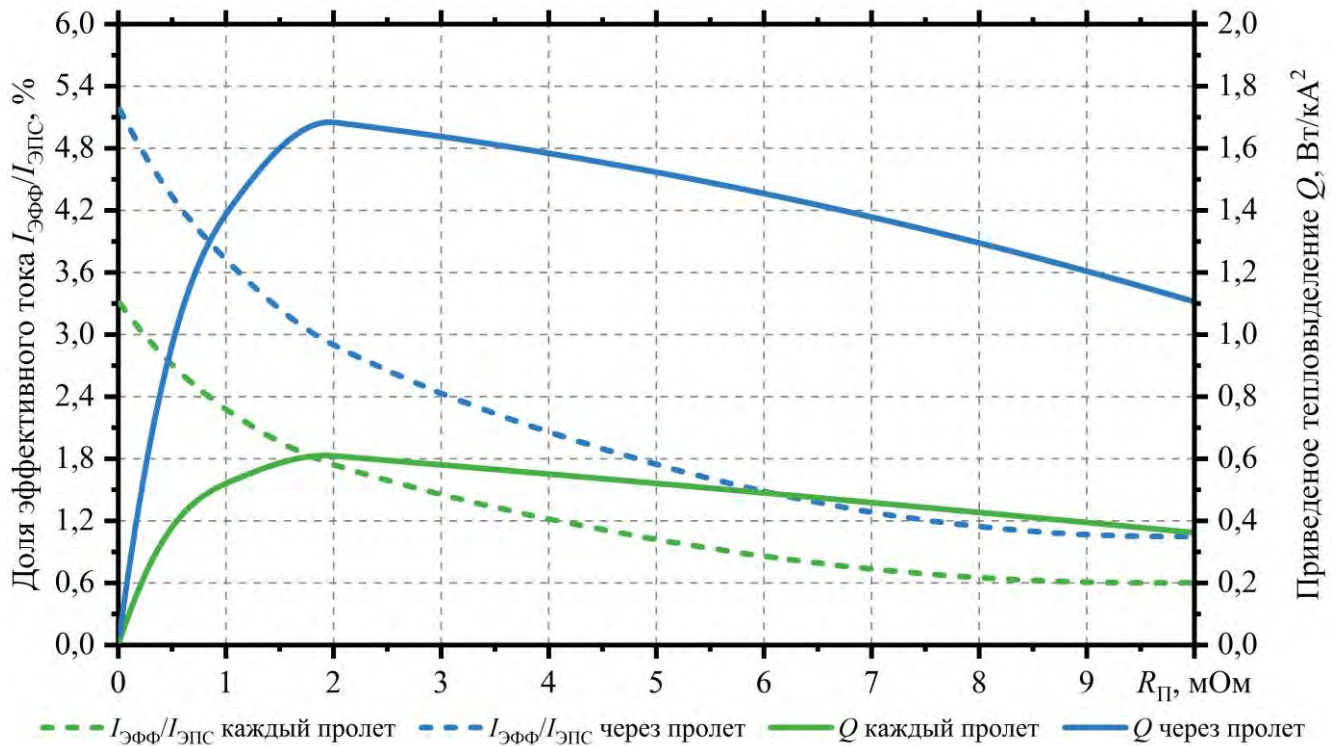


Рисунок 4.17 – Доля тока и удельное тепловыделение в зажиме поперечного электросоединителя и несущего троса в зависимости от переходного сопротивления $R_{П}$

На Рисунке 4.18 представлены аналогичные зависимости для соединительного зажима поперечного электросоединителя и контактного провода. Из рисунка видно, что случаи расположения поперечных электросоединителей в каждом пролете или через пролет незначительно влияют на значение тока, протекающего через зажим и тепловыделение. Это связано с тем, что крепление поперечного электросоединителя происходит к двум контактным проводам, таким образом для тока образуется дублирующий путь.

Максимальное тепловыделение зажима контактного провода достигается также при значении переходного сопротивления в районе 2 мОм. Для случаев установки поперечных электросоединителей в каждом пролете и через пролет максимальное значение тепловыделения для зажима контактного провода выше, чем для зажима несущего троса в 2,35 и 6,6 раза соответственно и ниже, чем для зажима усиливающего провода в 6 и 16,5 раза соответственно.

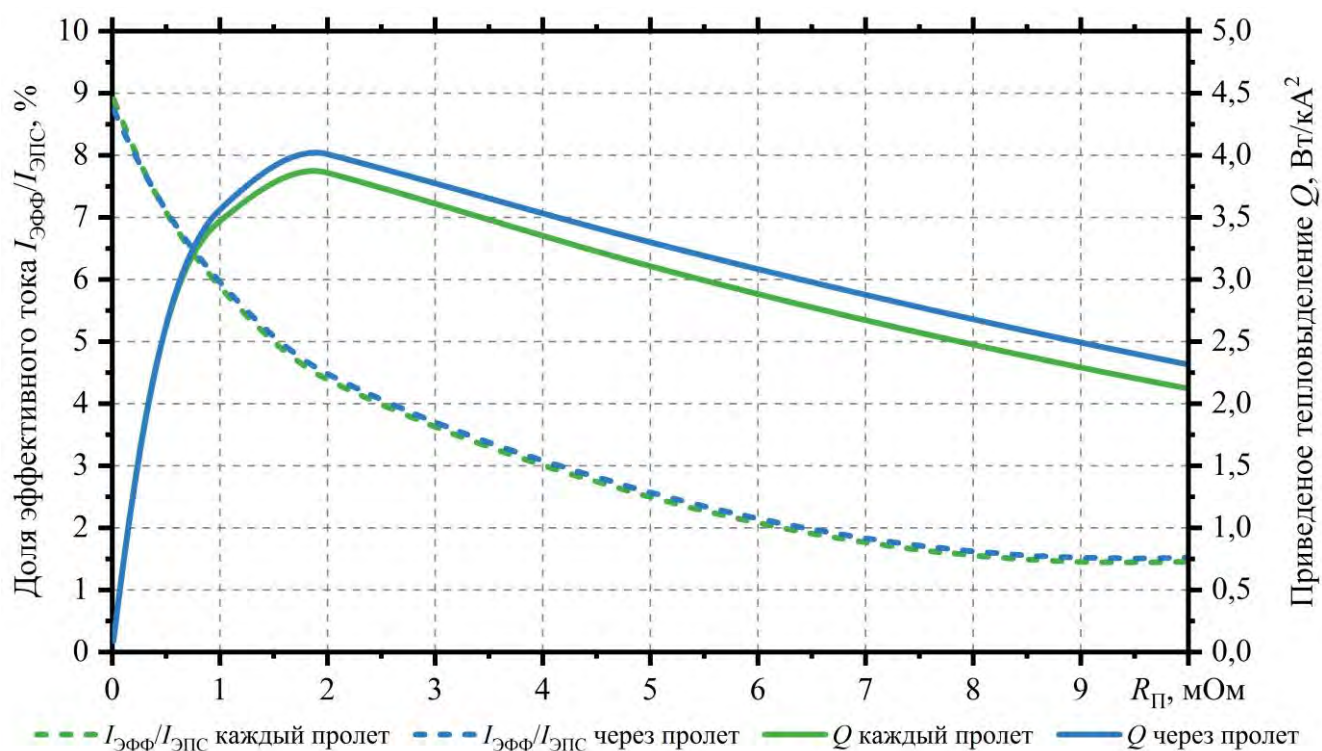


Рисунок 4.18 – Доля тока и удельное тепловыделение в зажиме поперечного электросоединителя и контактного провода в зависимости от переходного сопротивления $R_{\text{П}}$

В Таблице 4.4 представлена разница температур между исправными и дефектными зажимами поперечного электросоединителя при переходном сопротивлении, соответствующем максимальному тепловыделению.

Таблица 4.4 – Разница температуры исправных и дефектных зажимов при максимальном тепловыделении в зависимости от расположения ПС

	ПС каждый пролет	ПС через пролет
УП	58,3	235,3
НТ	8,8	7,7
КП	11,8	21,1

Нагрев зажимов выше температуры продольных проводов, на которых они расположены, происходит только для зажимов усиливающего провода. При этом при увеличении расстояния между поперечными соединителями следует ожидать

соответствующего повышения температуры зажимов. Из эксплуатации известно, что дефектные соединительные зажимы КС-069 типа ПАМ часто имеют следы, подтверждающие существенную тепловую нагрузку, а в некоторых случаях следы плавления. Данный факт объясняется совокупностью таких параметров, как отсутствие каких-либо дублирующих путей для тока помимо соседних поперечных электросоединителей, а также повышенное переходное сопротивление зажимов с алюминиевым усиливающим проводом по причине механических и физических свойств алюминия [136]. Использование медных усиливающих проводов позволяет улучшить режим работы контактного соединения за счет меньшей склонности к окислению медных проводов и более стабильных характеристик переходного сопротивления в зависимости от времени. Также улучшенными характеристиками обладают прессуемые зажимы, предлагаемые в работах [23; 145]. Тем не менее место соединения с усиливающим проводом является единственным соединением поперечных электросоединителей, способным привести к отказу по причине перегрева. Тепловизионная диагностика оставшихся соединений поперечного электросоединителя является трудновыполнимой по причине перегрева дефектных зажимов ниже температуры проводов и требует тщательного анализа термограмм, регистрацию значения тока электроподвижного состава, за которым выполняется тепловизионная диагностика.

Многожильные провода

Одним из наиболее серьезных отказов контактной сети является обрыв многожильных проводов. В декабре 2018 года на Свердловской железной дороге произошел обрыв несущего троса вблизи зажима поперечного электросоединителя. При этом, как следует из результатов расчетов, дефект зажимов поперечных электросоединителей на несущем тросе не вызывает перегрева, приводящего к отказу. Из протокола разбора по возникновению причин обрыва несущего троса следует, что замена зажима производилась в мае 2018 года. Также в протоколе отмечено окисление всех 19 жил несущего троса. Следует отметить, что результат осмотра зажима не выявил следов повышенной тепловой нагрузки, а обрыв жил несущего троса произошел на расстоянии 10-15 см от места установки зажима.

Рассмотрим влияние переходного сопротивления между жилами многожильных проводов на температуру провода вблизи зажима. На Рисунке 4.19 представлена зависимость температуры многожильного провода М-120 в зависимости от переходного сопротивления между жилами R_{Π} при токе 650 А.

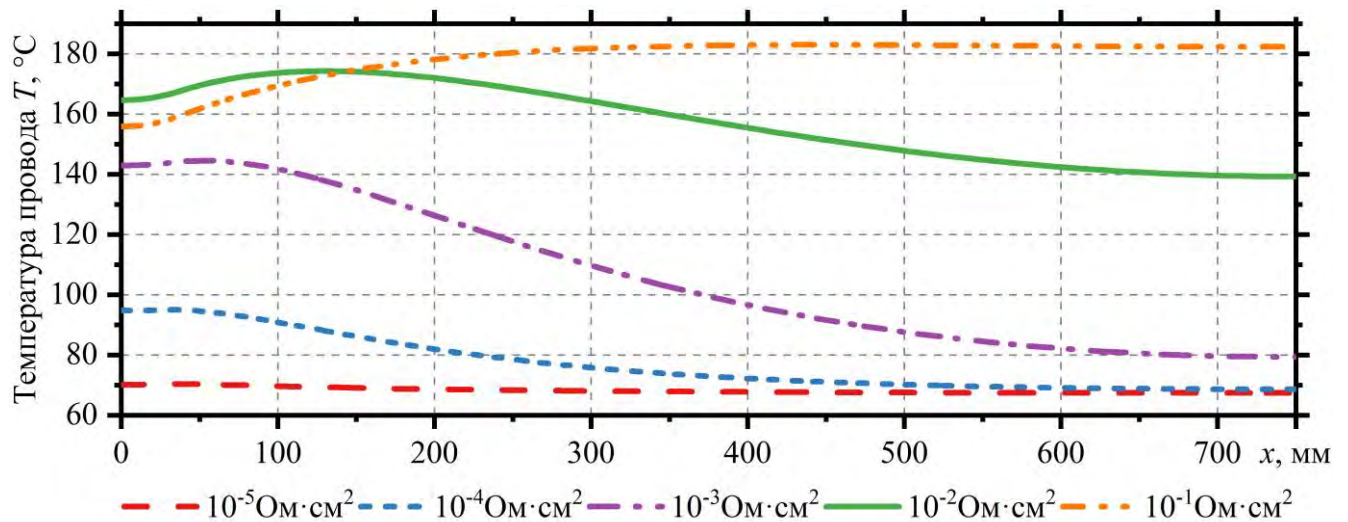


Рисунок 4.19 – Температура многожильного провода по длине от места установки зажима в зависимости от переходного сопротивления между жилами

Из рисунка видно, что с ростом переходного сопротивления между жилами увеличивается зона стекания тока в жилы многожильного провода, не контактирующие с зажимом. Из рисунка видно, что зона стекания тока в жилы для значений переходного сопротивления 10^{-2} и 10^{-1} Ом·см² превышает 0,75 м.

На Рисунке 4.20 представлена зависимость плотности тока в жилах многожильного провода на расстоянии 150 мм от места крепления зажима. Из рисунка видно, что при переходном сопротивлении между жилами 10^{-5} Ом·см² ток в жилах распределен равномерно. С увеличением переходного сопротивления доля тока в жилах, не контактирующих с зажимом, снижается, что влечет за собой повышенную токовую нагрузку на жилы наружного повива и соответствующее увеличение температуры провода.

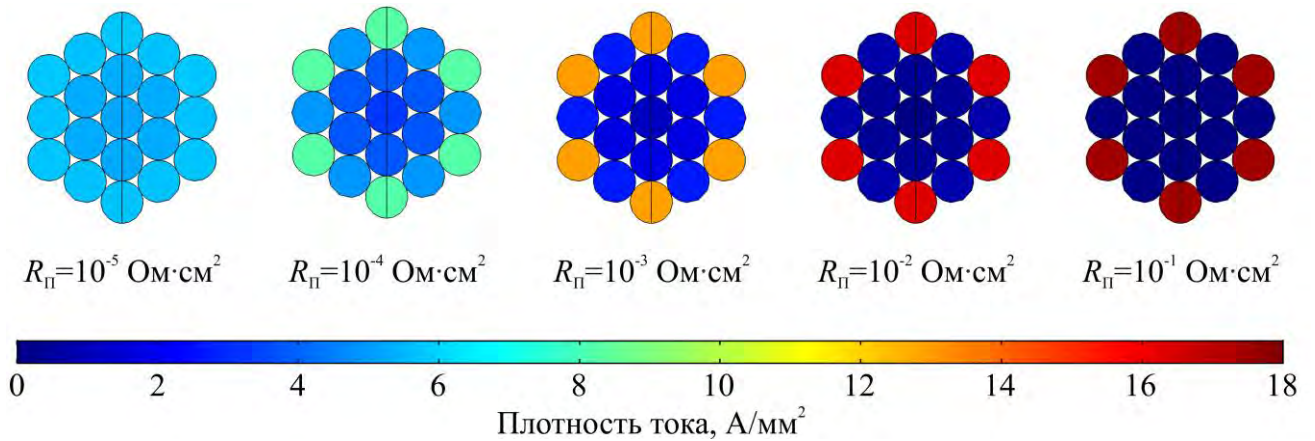


Рисунок 4.20 – Плотность тока в жилах многожильного провода М-120 на расстоянии 150 мм от питающего зажима

Таким образом, регистрация максимума температуры провода вблизи зажима и последующее снижение температуры по длине провода свидетельствует о повышенном переходном сопротивлении между жилами провода.

4.4 Обоснование допустимости применения контактных подвесок с одинарным контактным проводом взамен двойного

Исследования, представленные в [54, с. 73], показывают преимущества применения одинарного контактного провода МФ-150 по сравнению с двойным контактным проводом 2МФ-100 с точки зрения износа. В исследованиях, направленных на сравнение медных и бронзовых проводов [45; 46; 50; 54], отмечается повышенное электрическое сопротивление бронзовых проводов по сравнению с медными, но вместе с этим данные провода имеют повышенную термостойкость и временное сопротивление на разрыв, а также меньшую низкотемпературную ползучесть. В работе [146] рассмотрены аналоги контактных подвесок с бронзовыми проводами и одинарным контактным проводом Бр1Ф-150 взамен типовых контактных подвесок с медными проводами и двойным контактным проводом 2МФ-100.

Согласно [74], к контактным подвескам предъявляется требование соблюдения температурных режимов работы при 1,3- и 2,5-кратной токовой перегрузке с

длительностью 3 и 1 минута соответственно. По результатам расчетов с точки зрения тепловой нагрузки режим 2,5-кратной токовой перегрузки является ограничивающим. На Рисунке 4.21 представлены значения температур для контактных подвесок в режиме 2,5-кратной перегрузки в зависимости от количества усиливающих проводов.

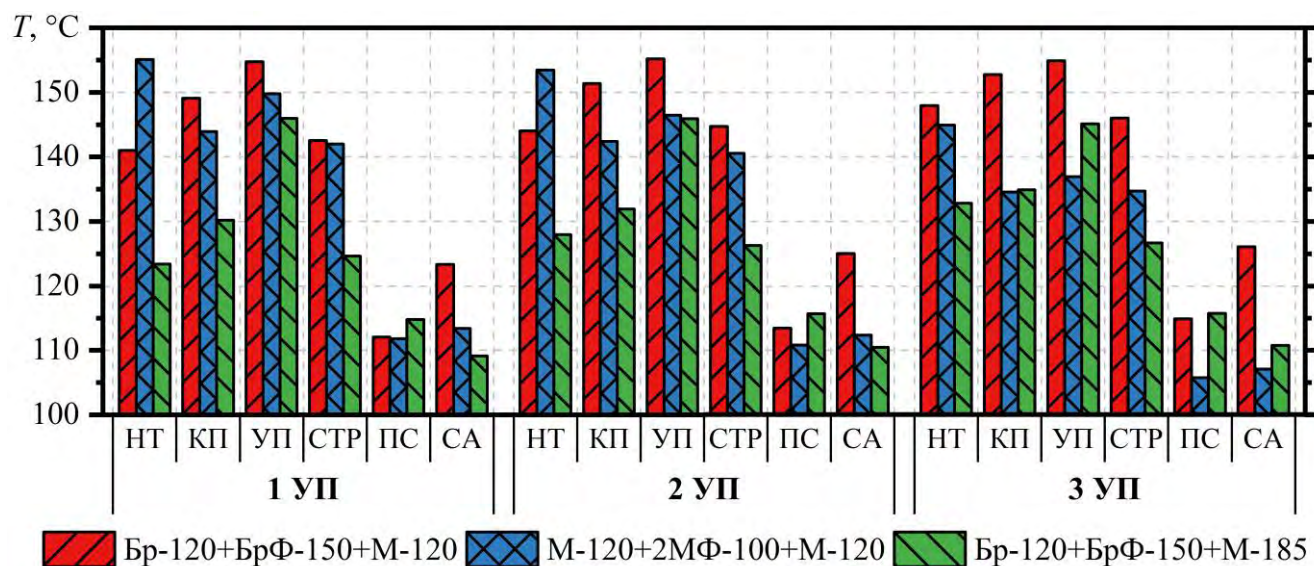


Рисунок 4.21 – Сравнение значений максимальных температур для проводов различных контактных подвесок в режиме 2,5-кратной перегрузки

Для данных подвесок характерен перегрев усиливающих проводов выше допустимой температуры в режиме 2,5-кратной токовой перегрузки. Для контактных подвесок с одинарным контактным проводом превышение температур в данном режиме для всех проводов составляет менее 1 минуты, в то время как алюминиевые усиливающие провода в типовых контактных подвесках с двойным контактным проводом имеют превышение по времени нагрева в 1,5-2 раза. Кроме того, в подвесках с одинарным контактным проводом в данном режиме отсутствует превышение температуры для несущего троса и контактного провода вследствие повышенной термостойкости бронзовых проводов.

Для оценки нагрева проводов в режиме прохода токоприемника рассмотрим Рисунок 4.22, на котором представлены температуры проводов при проходе

электроподвижного состава с током 3200 А на скорости 24 км/ч после предварительного нагрева контактной подвески максимально допустимым транзитным током.

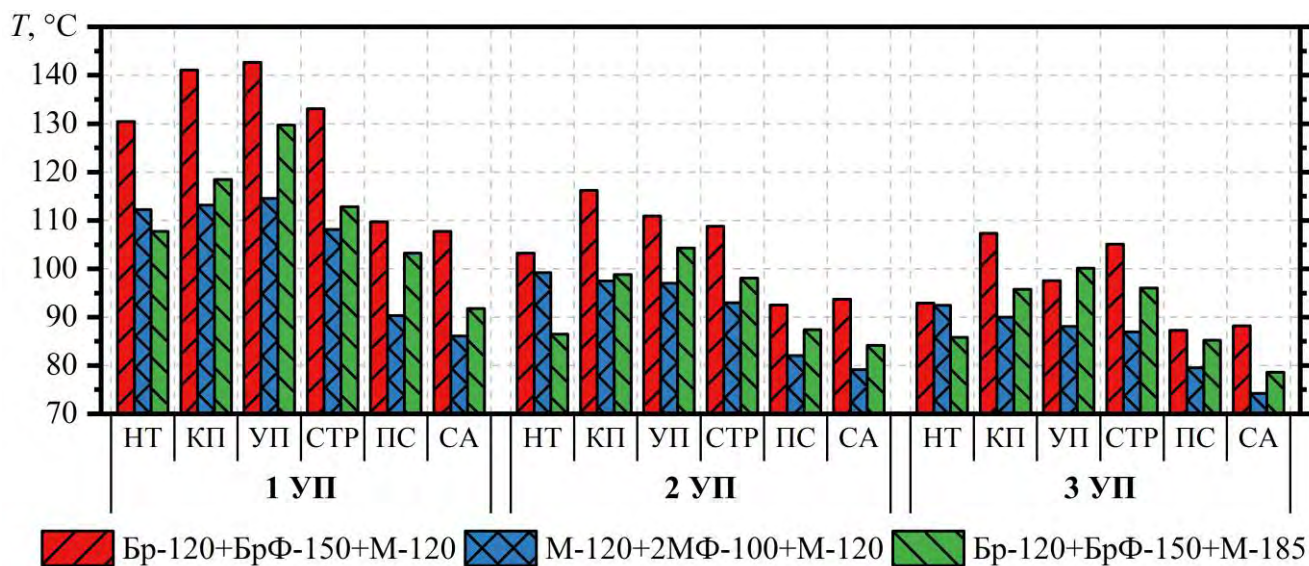


Рисунок 4.22 – Сравнение значений максимальных температур для проводов различных контактных подвесок в режиме прохода токоприемника со скоростью 24 км/ч и снимаемым током 3200 А

Для снижения нагрузки на контактный провод в предлагаемых подвесках с одинарным контактным проводом Бр1Ф-150 предполагается использование токопроводящих бронзовых струн с площадью поперечного сечения 16 мм².

По причине увеличенного значения погонного электрического сопротивления и сниженных длительно допустимых токов подвески с одинарным контактным проводом Бр1Ф-150 и усиливающим проводом из М-120 не рекомендуются к применению. Тем не менее их применение по условию нагрева проводов допустимо.

Близкими по характеристикам токовой нагрузки и нагрева проводов обладают подвески с одинарным контактным проводом Бр1Ф-150 и усиливающими проводами М-150 или М-185. В Таблице 4.5 представлено сравнение вариантов аналогов контактных подвесок с одинарным контактным проводом.

Таблица 4.5 – Варианты контактных подвесок

Контактные подвески	Длительно доп. ток, А,		Погонное электрическое сопротивление, мОм/км		Стоимость ¹ , тыс. руб./км	Масса погонная, кг/км
	0	15	0	15		
Тяжеловесное и скоростное движение						
Типовая подвеска: М-120 + 2МФ-100 + 2А-185	2870	2710	32,9	34,8	2472 [3620]	3839 [4916]
Аналог 1: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-150	2730 -5 %	2710 -0 %	34,5 +5 %	35,8 +3 %	3892 +57 % [+8 %]	4497 +17 % [-9 %]
Аналог 2: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-185	2870 0 %	2860 +6 %	30,5 -8 %	31,5 -10 %	4326 +75 % [+20 %]	5696 +48 % [+16 %]
Типовая подвеска: М-120 + 2МФ-100 + 3А-185	3360	3290	27,2	28,5	2638 [4360]	4335 [5950]
Аналог 1: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 3М-150	3360 0 %	3360 0 %	27,0 -1 %	27,8 -2,5 %	4803 +82 % [+10 %]	6328 +46 % [+6 %]
Аналог 2: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 3М-185	3740 +11 %	3750 +14 %	23,4 -16 %	24 -19 %	5482 +108 % [+26 %]	7329 +69 % [+23 %]
Высокоскоростное движение						
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 %

Для всех вариантов предлагаемых подвесок с одинарным контактным проводом Бр1Ф-150 для тяжеловесного и скоростного движения ограничивающим по температуре проводом является УП. Ток контактной сети для высокоскоростного движения ограничен температурой разрегулировки, равной 80 °С, установленной по условиям качества токосъема.

Рассмотрим температурные режимы работы предлагаемых контактных подвесок. Выделим следующие расчетные режимы: длительный транзит тягового тока,

¹ В квадратных скобках указаны значения при использовании усиливающего провода М-120 вместо А-185 в типовых контактных подвесках.

токошем ЭПС при максимальным тепловыделении, троганье с места и стоянка ЭПС при номинальном нажатии токоприемника (экспериментальное исследование контакта при нажатиях ниже номинального представлено в статье [147]).

В Таблице 4.6 представлены результаты расчетов температуры проводов контактной сети при различных расчетных режимах.

Таблица 4.6 – Максимальные температуры проводов при расчетных режимах

Контактные подвески		Максимальная температуры, $T^{\circ}\text{C}$		
		Стоянка	Транзит	2,5-кратная перегрузка ¹
Тяжеловесное и скоростное движение				
Типовая: М-120 + 2МФ-100 + 2М-120	НТ	–	97	153 (53 с)
	КП	92	88	142 (9 с)
	УП	–	93	143 (12 с)
Аналог 1: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-150	НТ	–	90	140 (2 с)
	КП	82	93	146 (29 с)
	УП	–	100	153 (60 с)
Аналог 2: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-185	НТ	–	85	128 (39 с)
	КП	82	89	132 (68 с)
	УП	–	100	147 (34 с)
Типовая: М-120 + 2МФ-100 + 3М-120	НТ	–	92	146 (23 с)
	КП	92	85	134 (56 с)
	УП	–	88	137 (83 с)
Аналог 1: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 3М-150	НТ	–	88	135 (70 с)
	КП	82	94	137 (96 с)
	УП	–	100	146 (26 с)
Аналог 2: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 3М-185	НТ	–	87	132 (60 с)
	КП	82	92	135 (83 с)
	УП	–	100	147 (32 с)
Высокоскоростное движение				
Типовая КС-250-3М: Бр1-120 + 2Бр1Ф-120 + 2М-120	НТ	–	77	118 (–)
	КП	65	76	104 (–)
	УП	–	75	105 (–)
Аналог 1: Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-185	НТ	–	72	101 (–)
	КП	77	76	98 (–)
	УП	–	80	104 (–)

В режимах троганья и прохода ЭПС с максимальным тепловыделением температура продольных проводов не превышает транзитных температур.

¹ В скобках указано значение времени превышения максимальной температуры в соответствии с Таблицей Б.1

При использовании одинарного контактного провода повышается температура поперечных проводов контактной сети, таких как струны и поперечные электрические соединители по причине того, что на них увеличивается токовая нагрузка.

Анализ токовых характеристик подвижного состава показал, что наибольшим тепловыделением обладает электровоз ЧС200 на скорости 10 км/ч с потребляемым током 2564 А. На Рисунке 4.23 представлена зависимость температуры проводов контактной сети Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-185 при проходе ЧС200.

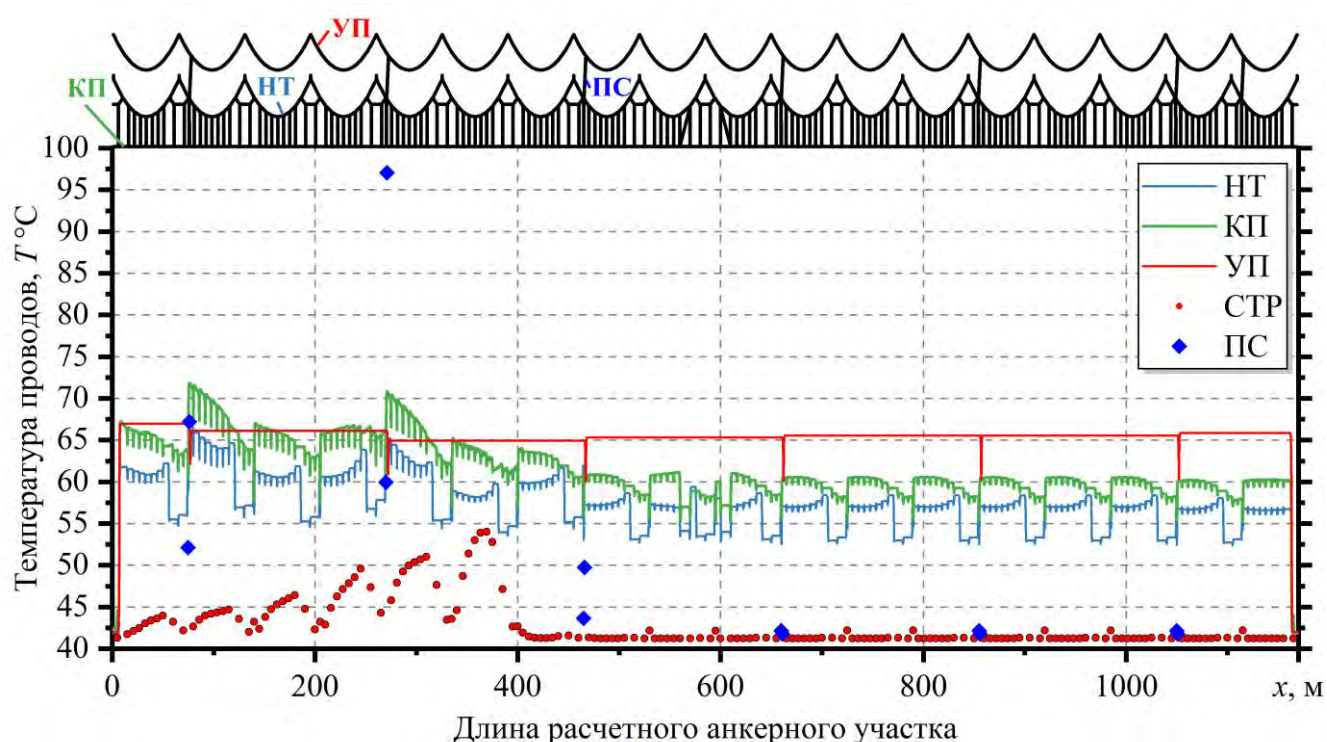


Рисунок 4.23 – Температура проводов при проходе электровоза ЧС200 со скоростью 10 км/ч и потребляемым током 2564 А через 135 с после начала движения по анкерному участку

Следующим электровозом по значению уровня тепловыделения является ЗВЛ10 на скорости 31 км/ч с потребляемым током 3345 А. На Рисунке 4.24 представлена зависимость температуры проводов контактной сети Бр1-120 + Бр1Ф-150 + 2М-185 при проходе ЗВЛ10.

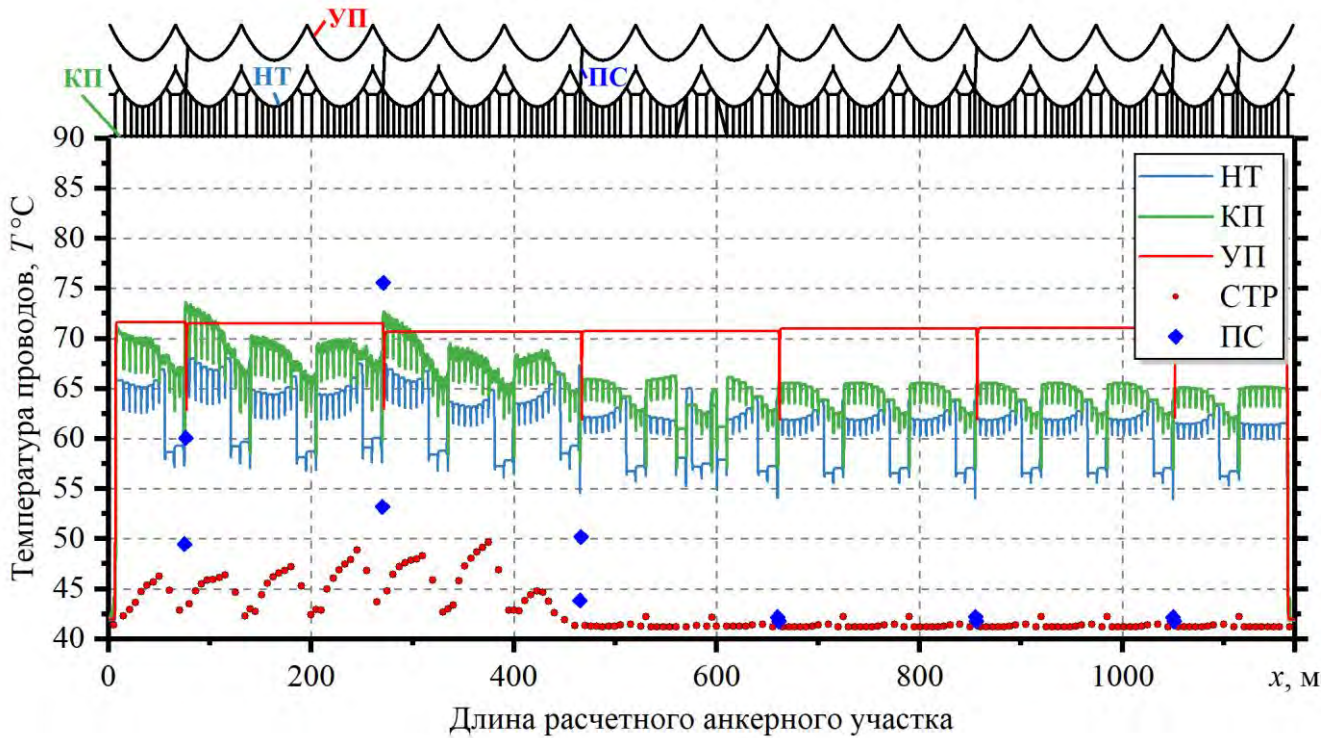


Рисунок 4.24 – Температура проводов при проходе электровоза 3ВЛ10 со скоростью 31 км/ч и потребляемым током 3345 А через 47 с после начала движения по анкерному участку

Из Рисунков 4.23 и 4.24 видно, что контактная подвеска с одинарным контактным проводом может быть использована для участков скоростного и тяжеловесного движения одновременно. Температура проводов поперечных электросоединителей при проходе электровозов с наибольшим тепловыделением остается в допустимых пределах и не превышает 97 °C при установке через два пролета для самого тяжелого случая.

Предлагаемый аналог подвески для высокоскоростного движения обладает сниженной на 5 °C температурой несущего троса, что снижает удлинение троса и, следовательно, разрегулировку контактной сети. Температурные режимы для контактного провода для режима транзита остаются идентичными. В режиме токо-съемки с максимальным тепловыделением ЭВС «Сапсан» на скорости 120 км/ч с током 3590 А максимальное значение температуры контактного провода БрФ1-150 выше, чем провода 2БрФ1-120 на подвеске КС-250-3М на 1 °C в местах

подключения поперечных электросоединителей М-95. При этом температура ПС на подвеске с одинарным контактным проводом выше на 4 °С и составляет 50 °С.

4.5 Оценка влияния предлагаемых мероприятий по модернизации контактной сети по разработанной методике электротеплового расчета на примере участка Сарга – Сабик

Свердловская железная дорога является крупнейшим транспортным узлом России, объединяющим европейскую и азиатскую части страны. При этом, учитывая горный профиль, нагрузки на контактную сеть постоянного тока с ростом числа обращения тяжеловесных поездов становятся значительными. Участок Сарга – Сабик является одним из наиболее нагруженных участков Свердловской железной дороги по причине наличия на нем затяжного подъема с уклоном до 13,3 ‰ в нечетном направлении пути. На Рисунке 4.25 представлен профиль пути данного участка и зависимость токовой нагрузки транзитного и тягового тока вдоль длины путей при движении пакетов поездов:

- 6300–9000–6300 тонн с интервалом 10 минут по нечетному пути;
- 3000–5000–3000 тонн с интервалом 10 минут по четному пути.

Участок затяжного подъема обладает наибольшей токовой нагрузкой в режиме токосъема электроподвижным составом, что в большей степени влияет на нагрев поперечных электрических соединений.

Участки с повышенными транзитными токами, ожидаемо, располагаются вблизи подключения питающих фидеров тяговых подстанций, пунктов параллельного соединения и поста секционирования.

Так как существенная доля отказов контактной сети приходится на пережог звеньевых струн и перегрев соединений поперечных электрических соединителей с усиливающими проводами, то в первую очередь необходимо модернизировать контактную сеть именно на участке подъема нечетного пути длиной 14 км.

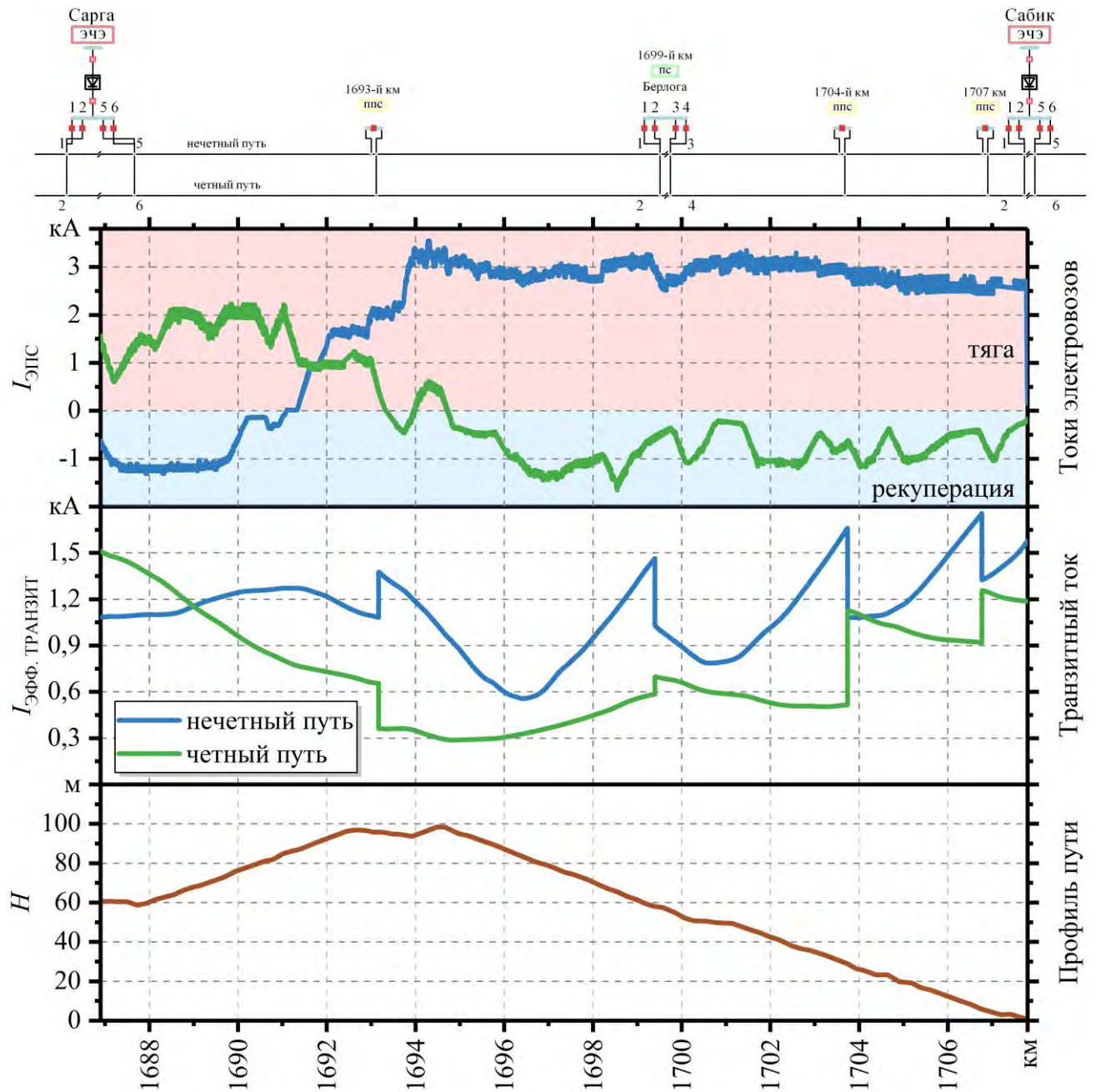


Рисунок 4.25 – Профиль пути на участке Сарга – Сабик

Следующим по очереди участком следует выбрать также участок подъема, но уже четного пути, исходя из уровня потребляемых токов электроподвижным составом.

В дальнейшем модернизируются оставшиеся участки нечетного и четного пути, исходя из уровня токов рекуперации.

В Таблице 4.7 приведен объем работ, необходимый при проведении модернизации контактной сети на выбранном участке.

Таблица 4.7 – Объем работ по проведению модернизации контактной сети на участке Сарга – Сабик

Очередь	Путь	Длина участка, км	АУ	Струны	Зажим УП	ТСА	Обвод УП	Узел ПП и шлейфов
1	нечетный	14	10	1960	240	10	10	7
2	четный	7	5	980	144	5	6	3
3	нечетный	7	5	980	144	5	4	2
4	четный	14	10	1960	240	10	8	6
Итого		42	30	5880	768	30	28	18

Таким образом, из Таблицы 4.7 видно, что модернизацию участка можно разбить на четыре очереди, которые определены в порядке наибольшей токовой нагрузки. Модернизация узлов подключения питающих фидеров тяговых подстанций производится одновременно на участках контактной сети, расположенных по обе стороны от тяговой подстанции.

Одним из вариантов частичной модернизации может являться модернизация обводов усиливающего провода в местах с наибольшим эффективным транзитным током, зависимость которого приведена на Рисунке 4.25.

Рассмотрим снижение температуры участка НТ вблизи узла СА до и после модернизации. Снижение температуры на данном участке обусловлено прежде всего снижением неравномерности перераспределения токов в продольных проводах контактной сети от влияния троса средней анкеровки. На Рисунке 4.26 представлено сравнение зависимостей температуры данного узла до и после модернизации. Из рисунка видно существенное снижение температуры, особенно вблизи моментов времени прохода ЭПС.

В соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» № 348р от 21.02.2018 об утверждении методики определения балльной оценки состояния контактной сети, в Трансэнерго установлено следующее определение нагрева: «Нагрев узла – отношение разности между измеренной температурой дефектного контактного

соединения и окружающего воздуха к разности между температурой целого участка контактной сети, имеющего непосредственную электрическую (металлическую) связь с указанным соединением, на расстоянии не менее 1 м от дефектного соединения и воздуха.»

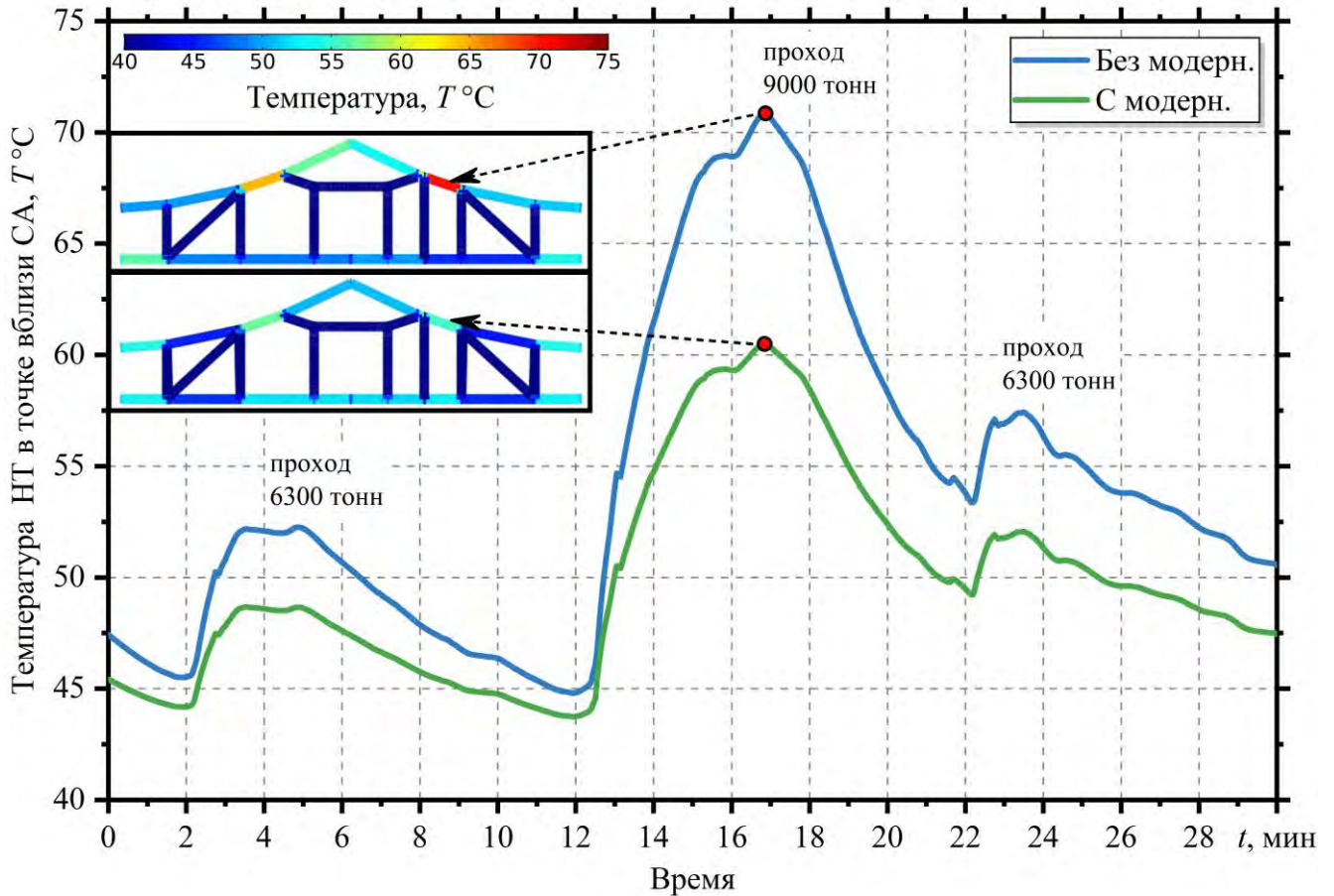


Рисунок 4.26 – Зависимость температуры несущего троса вблизи троса средней анкеровки до и после модернизации контактной сети нечетного пути на участке Сарга – Сабик

Указанное значение нагрева регистрируется с использованием вагон-лаборатории контактной сети и может быть определено по формуле

$$\text{Нагрев} = \frac{T_{\text{ЗЖМ}} - T_{\text{ВОЗД}}}{T_{\text{ПР}} - T_{\text{ВОЗД}}} = \frac{\vartheta_{\text{ЗЖМ}}}{\vartheta_{\text{ПР}}}, \quad (4.2)$$

где $T_{\text{ЗЖМ}}$ – температура зажима, °C;

$T_{\text{ПР}}$ – температура провода на расстоянии не менее 1 м, °С;

$T_{\text{ВОЗД}}$ – температура окружающего воздуха, °С;

$\vartheta_{\text{ЗЖМ}}$ – перегрев зажима над температурой воздуха, °С;

$\vartheta_{\text{ПР}}$ – перегрев провода над температурой воздуха, °С.

Рассмотрим возможность обнаружения дефектного зажима и степень отступления в различные режимы времени после прохода ЭПС. Для этого смоделируем проход пакетов поездов на рассматриваемом участке с различным значением переходного сопротивления дефектного зажима, соединяющего поперечный электрический соединитель с усиливающими проводами.

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.

На Рисунке 4.27 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.

Из рисунка видно, что проход поезда массой 9000 тонн вызывает нагрев зажима до 150 °С, а проход поезда массой 6300 тонн – до 120 °С при переходном сопротивлении 10 мОм. При этом наблюдается процесс накопления тепловой энергии, так что при повторном проходе поезда массой 9000 тонн температура зажима повышается уже до 160 °С.

С ростом числа тяжеловесных поездов, прошедших с минимальным межпоездным интервалом перед вагон-лабораторией, повышается степень отступления параметра нагрева зажима ПС на УП.

Расчет производился при следующих условиях окружающей среды: температура воздуха 40 °С, скорость ветра 1 м/с, уровень солнечной радиации 300 Вт/м², нормальное атмосферное давление. Уровень солнечной радиации выбран исходя из того, что диагностика производится в облачный день, по причине существенного влияния на результаты тепловизионного измерения его проведение в солнечный день.

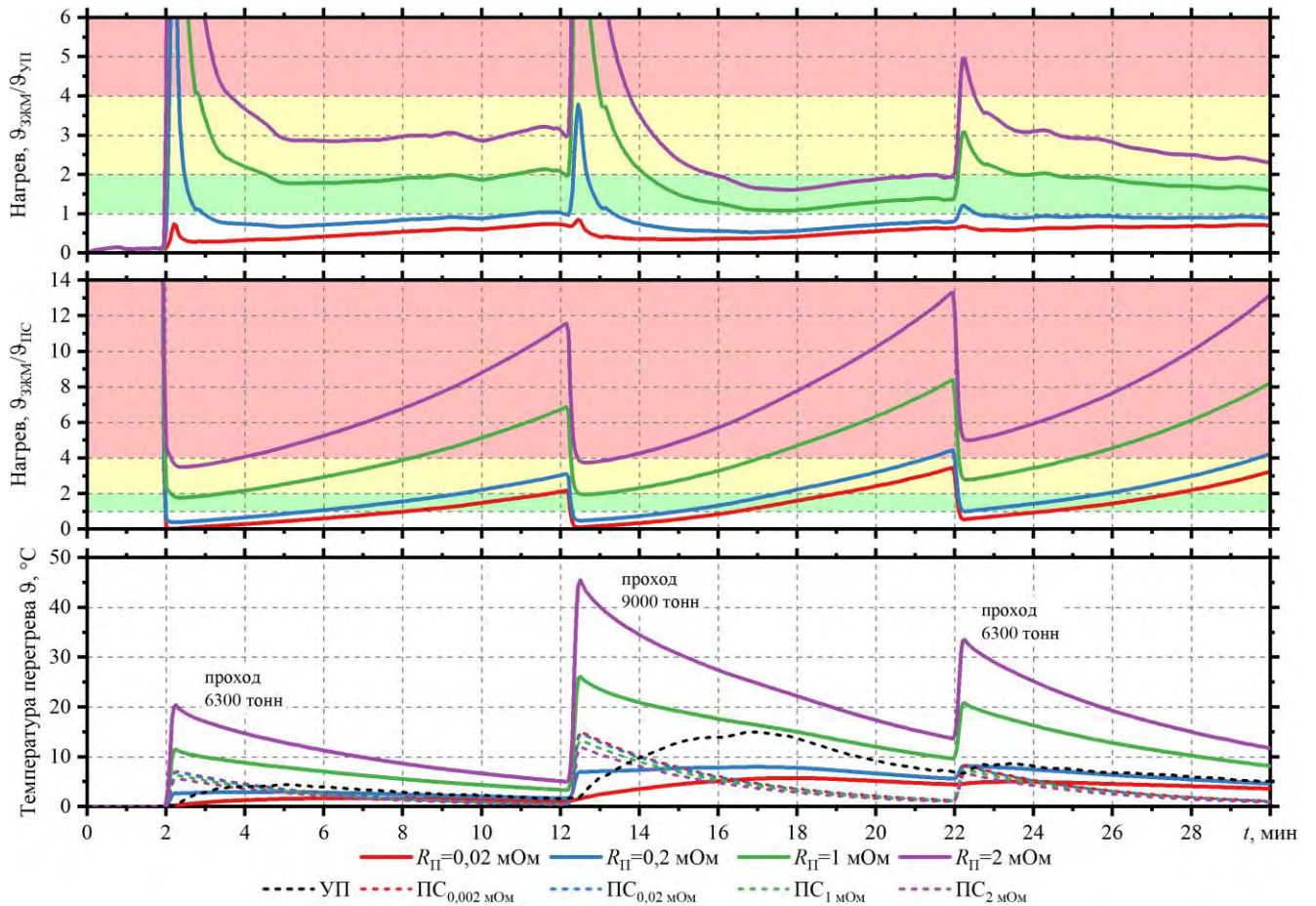


Рисунок 4.27 – Температура нагрева дефектного зажима соединения ПС и УП при различном значении переходного сопротивления $R_{П}$

При существующем подходе тепловизионного контроля состояния контактной сети проход вагон-лаборатории осуществляется следом за поездом с интервалом от 8 минут.

Видно, что для данного соединения существенную роль играет выбор провода, относительно которого осуществляется измерение перегрева зажима. Использование для этих целей провода ПС приводит к тому, что из-за различного характера охлаждения провода и зажима возможна регистрация перегрева даже для исправного зажима. Из графика видно, что для исправного зажима может быть характерен перегрев над температурой провода спустя 8–10 минут. В момент прохода ЭПС из-за нагрева провода ПС током происходит занижение действительной степени отклонения. Стоит отметить негативное влияние солнечной радиации на нагрев элементов при тепловизионной диагностике, так как нагрев зажимов под ее

воздействием может быть выше нагрева проводов. Отсюда следует, что необходимо корректировать данные перегрева при наличии солнечной радиации.

При измерении температуры на УП происходит обратная ситуация. Ко времени прохода ВИКС происходит занижение степени отступления. Регистрация же действительной степени отступления наиболее точно осуществляется в момент прохода ЭПС, но не позднее 2–3 минут, в зависимости от сопротивления зажима. Из чего следует, что качественная диагностика поперечных соединений должна производиться в составе тяжеловесного поезда.

Таким образом, для повышения качества тепловизионной диагностики можно предложить следующие рекомендации:

- 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;
- по возможности осуществлять проход вагон-лаборатории следом за пакетом из тяжеловесных поездов с минимальным межпоездным интервалом с целью диагностики элементов контактной сети, находящихся под воздействием транзитного тока: обводы усиливающих проводов, участки стыкования оборванных проводов, соединения на сопряжениях анкерных участков и т.п.;
- производить анализ полученных результатов тепловизионного измерения в зависимости от условий окружающей среды и тока, потребляемого электроподвижным составом, до и после момента диагностики, а также тока других поездов в пакете по разработанной методике, предложенной в диссертационной работе. При отсутствии данных о токе электроподвижного состава допустимо пользоваться данными из тяговых расчетов по данному участку;
- производить исследование в пасмурную погоду.

Таким образом, комплексный подход, заключающийся в совместном анализе экспериментальных и расчетных данных, позволит сделать вывод об исправности диагностируемого соединения. Существующий подход, заключающийся лишь в регистрации факта превышения температуры зажима над температурой провода при проходе вагон-лаборатории следом за поездом, не позволяет определить действительную степень отклонения по причине охлаждения зажима и провода к моменту диагностики.

Известный, но не нашедший широкого применения на Свердловской железной дороге метод проведения тепловизионной диагностики узлов контактной сети с применением двух нагрузочных платформ, позволяющих дополнительно нагрузить контактную сеть током до 800 А, вызывает недостаточный нагрев дефектных соединений по причине низкого значения потребляемого тока. По этой причине остается актуальным вопрос о диагностике контактной сети в составе поезда с высоким значением потребляемого тока в процессе движения.

4.6 Выводы по четвертой главе

1. По результатам электротепловых расчетов контактной подвески со звеньевыми струнами выявлено, что при усилении и модернизации контактной сети путем установки поперечных электрических соединителей снижение токовой нагрузки происходит не для всех струн в пролете, что сохраняет повышенный электромеханический износ звеньев струн при организации тяжеловесного движения и пропуске поездов повышенной массы. Выявлено, что наиболее нагруженными струнами являются струны вблизи узла средней анкеровки контактного провода. Повышенная тепловая нагрузка возникает по причине протекания тока по данным струнам не только в режиме токосъема, но и в режиме транзита из-за процессов токораспределения, вызванных тросом средней анкеровки. Наименьшую токовую и тепловую нагрузку имеют рессорные струны по причине присоединения их к рессорному тросу, что снижает поперечное переходное сопротивление между несущим тросом и контактным проводом вблизи данного участка контактной сети.

Выявлено, что неизолированные усовики фиксаторов по причине их наклонного присоединения к продольным проводам контактной сети также находятся под токовой нагрузкой не только в режиме токосъема, но и в режиме транзита тягового тока. При этом токовая нагрузка в режиме токосъема ниже, чем токовая нагрузка струн в середине пролета. Однако по причине предварительного нагрева температурная нагрузка усовиков фиксаторов и их звеньев в ряде случаев даже выше тепловой нагрузки струн в середине пролета, что также обуславливает изолированное исполнение наклонных струн.

2. Выявлено, что струны анкеруемой ветви на участках сопряжения анкерных участков при обводе усиливающих проводов по контактными проводами анкеруемой ветви находятся под повышенной токовой и тепловой нагрузкой по причине стекания тягового тока из контактных проводов анкеруемой ветви в несущий трос анкеруемой ветви. Данный процесс возникает при схеме обвода усиливающих проводов без подключения проводов обвода к несущему тросу анкеруемой ветви, что часто встречается в эксплуатации. Кроме того, ток в струнах на участках сопряжения анкерных участков при обводе усиливающих проводов, а также ближайших к сопряжению пролетов выше, чем в удаленных от сопряжения пролетах на 40 % и 20 % соответственно. Данный факт подтверждается практическими наблюдениями в процессе эксплуатации данных участков.

3. Произведен сравнительный анализ тепловой нагрузки проводов контактной сети вблизи узла средней анкеровки контактного провода при различных вариантах конструктивного исполнения и материала троса средней анкеровки. Выявлено, что при использовании бронзового троса Бр2-95 без применения схем выравнивания тепловой нагрузки проводов происходит наибольшая перегрузка проводов, особенно для варианта с изолированными струнами. Наибольшей перегрузке подвержен несущий трос на участке от мест крепления рессорного троса и троса средней анкеровки, где перегрев достигает 43,2 °С. Использование стальных тросов средней анкеровки с основными и дополнительными спусками обеспечивает наименьшую температурную нагрузку продольных проводов контактной сети из рассмотренных при расчете вариантов.

4. Выявлено неравномерное распределение тока в проводах контактной сети от мест крепления питающих проводов и шлейфов разъединителей до ближайшего поперечного электросоединителя. При этом повышенная нагрузка возникает для участков несущего троса и контактных проводов, а усиливающие провода разгружены. Предложена установка поперечного электрического соединения с усиливающими проводами в месте присоединения питающих проводов. Данное конструктивное решение позволяет выровнять токовую нагрузку и приблизить токораспределение на участке от питающих проводов до первого поперечного электросоединителя к естественному, а также до 6 °С снизить неравномерность распределения температуры.

5. Разработаны этапы модернизации контактной сети постоянного тока для организации тяжеловесного движения и пропуска поездов повышенной массы, позволяющие увеличить нагрузочную способность контактной сети до 6 %. Произведен расчет количества требуемых материалов на проведение каждого этапа модернизации. Определена последовательность применения этапов модернизации с учетом их взаимного влияния на электротепловые процессы, происходящие в контактной сети. Рекомендации по очередности проведения этапов модернизации предложены, исходя из принципа исключения наиболее часто отказываемых элементов и дублирования элементов, подверженных повышенным токовым и тепловым нагрузкам. Получено решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2019113958/09(026928) от 06.05.2019 на «Устройство средней анкеровки компенсированной контактной подвески».

6. Произведена оценка эффективности использования тепловизионной диагностики при определении дефектных элементов в контактной сети. Выявлено, что соединительные зажимы поперечных электрических соединителей в местах крепления к несущему тросу и контактными проводам являются труднодиагностируемыми, так как для них не происходит превышения температуры над температурой проводов контактной подвески, к которым они присоединены, даже для случаев, соответствующих максимальному тепловыделению данных зажимов. При этом диагностика зажимов, соединяющих поперечный электрический соединитель с

усиливающими проводами, является эффективной. Этот факт объясняется наличием дублирующих путей обхода тока на соединениях несущего троса и контактного провода, таких как струны, струновые скобы, соседние продольные соединители, трос средней анкеровки, изолированные консоли и усовики фиксаторов. Ближайшим дублирующим путем тока от усиливающих проводов являются только соседние поперечные электрические соединители.

Выявлено, что фактом, свидетельствующим о повышенном переходном сопротивлении между жилами многопроволочных проводов, является повышенный нагрев проводов вблизи токоведущих зажимов с последующим снижением температуры вдоль оси провода. При этом температура токоведущего зажима несколько ниже, чем температура провода.

7. Обоснована допустимость применения контактных подвесок с одинарным контактным проводом Бр1-150 взамен контактных подвесок с двойным контактным проводом 2МФ-100 или 2БрФ1-120. Предлагаемые подвески идентичны по токовой нагрузке, обладают сниженной температурной нагрузкой на несущий трос и контактный провод, что снижает разрегулировку контактной сети и улучшает качество токосъема. Предлагаемые подвески рассчитаны для режимов транзита тягового тока, токосъема с максимальным тепловыделением, троганья и стоянки с использующимися в настоящее время электровозами. Использование контактных подвесок с одинарным контактным проводом не только улучшит качество токосъема, но и снизит затраты на регулировку контактной сети.

8. Рассмотрено применение разработанной методики электротеплового расчета контактной сети постоянного тока на примере участка Сарга – Сабик. Определена последовательность выполнения работ по модернизации, а также их последовательность в зависимости от токовых нагрузок по тяговым расчетам.

В результате сравнения результатов расчета контактной сети с модернизацией контактной сети и без модернизации установлено, что удастся снизить тепловую нагрузку на несущем тросе вблизи узла средней анкеровки на 15 % при проходе пакетов грузовых поездов.

Установлено, что существующий способ тепловизионной диагностики поперечных электрических соединений не обеспечивает точного определения степени отступления параметра нагрева элементов контактной сети по существующей методике определения бальной оценки контактной сети, а подходит преимущественно для диагностики элементов, находящихся под транзитным током, чем объясняется высокая доля количества выявления перегревов на участках обвода усиливающих проводов. Предложены рекомендации для улучшения качества тепловизионной диагностики контактной сети постоянного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты 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 токосъема. Разработанная методика рекомендована для применения на предприятии АО «Универсал – контактные сети», что подтверждается актом внедрения, представленным в Приложении В.

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 рекомендованы для применения на Свердловской железной дороге, что подтверждается актом внедрения, представленным в Приложении В. Указанные этапы модернизации 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 22 ноября 2008 года № 1734-р [Электронный ресурс] // Собр. Законодательства РФ. – 2008. – № 50. – ст. 5977. – Режим доступа: <http://www.szrf.ru/szrf/doc.phtml?nb=100&issid=1002008050000&docid=132>.

2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 года № 877-р [Электронный ресурс] // Собр. Законодательства РФ. – 2008. – № 29. – ст. 3537. – Режим доступа: <http://www.szrf.ru/szrf/doc.phtml?nb=100&issid=1002008029000&docid=129>.

3. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года [Электронный ресурс] // – 2014. – Режим доступа: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6396.

4. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года «Белая книга». – М., 2015. – 63 с.

5. Пат. 2337448 Российская Федерация, МПК H02H 5/04. Контактная сеть [Текст] / Аржанников Б. А., Немытых Л. Н.; заявитель и патентообладатель Аржанников Борис Алексеевич. – № 2007135373/09 ; заявл. 24.09.2007 ; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 30. – 4 с.

6. Аржанников, Б. А. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока / Б. А. Аржанников, М. П. Бадер, А. Т. Бурков, А. В. Котельников, И.О. Набойченко // – Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 51–57.

7. Беляев, И. А. Устройство и обслуживание контактной сети при высокоскоростном движении / И. А. Беляев. – М. : Транспорт, 1989. – 144 с.

8. Бурков, А. Т. Физические основы проектирования электротяговых сетей высокоскоростных железнодорожных магистралей / А. Т. Бурков, В. В. Сероносков,

Е. В. Кудряшов, О. А. Степанская // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 2 (57). – С. 36–41.

9. Гаранин, М. А. Усиление системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / М. А. Гаранин, В. А. Загорский, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 1 (55). – С. 30–34.

10. Гаранин, М. А. Апробирование технологии снятия данных с устройств ЦЗАФ и ТЗКС / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2015. – № 5 (53). – С. 31–36.

11. Гаранин, М. А. Повышение нагрузочной способности контактной сети / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 2 (44). – С. 19–23.

12. Зимакова, А. Н. Контактная сеть электрифицированных железных дорог. Расчеты, выбор конструкций и составление монтажных планов: учеб. пособие. – 2-е изд. – М. : ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2011. – 232 с.

13. Мамошин, Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. Учебник для техникумов ж.-д. трансп. / Р. Р. Мамошин, А. Н. Зимакова. – М. : Транспорт, 1980. – 296 с.

14. Марквардт, К.Г. Проверка проводов контактной сети по экономическим условиям и условиям нагревания / К. Г. Марквардт, В. Ф. Кудряшов // Межвуз. сб. научн. тр. – М. : МИИТ, 1990. – Вып. 831. – С. 28–38.

15. Марквардт, К. Г. Контактная сеть. Учебник для вузов ж.-д. транспорта / К. Г. Марквардт – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1994. – 335 с.

16. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи. Учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. П. Михеев. – М. : Маршрут, 2003. – 416 с.

17. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.

18. Черемисин, В. Т. Организация контроля предельных режимов работы тяговой сети в условиях скоростного и тяжеловесного движения / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, В. Л. Незевак // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 83-90.

19. Kiessling, F. Contact Lines for Electric Railways. Planning, Design, Implementation, Maintenance. / F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider. – 2nd ed. – Erlangen: Publicis Publishing, 2009. – 994 pp.

20. Воронин, А. В. Токораспределение между продольными проводами контактной сети и тепловой расчет ее элементов : дис. ... канд. тех. наук : 05.22.09 / Воронин Алексей Владимирович. – М., 1946. – 143 с.

21. Косарев, А. Б. Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76. – № 6. – С. 329-335.

22. Косарев, А. Б. Анализ токораспределения в тяговых сетях переменного тока при их двухстороннем питании и учете сопротивления системы внешнего электроснабжения / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2018. – № 1. – С. 8–13.

23. Костюченко, К. Л. Новые узлы электрических и механических соединений проводов контактной сети: автореф : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Костюченко Константин Леонидович. – М., 1994. – 23 с.

24. Кудряшов, Е. В. Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечно элементных моделей : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Кудряшов Евгений Владимирович. – СПб., 2010. – 162 с.

25. Марский, В. Е. Определение нагрузочной способности контактных подвесок постоянного тока и их элементов // Новое в хозяйстве электроснабжения / Под ред. А. Б. Косарева. / В. Е. Марский. – М. : Интекст, 2003. – С. 123–127.

26. Паранин, А. В. Современное оборудование и конструкции контактной сети КС-160 для скоростей движения до 160 км/ч / А. В. Паранин, А. В. Ефимов. – Екатеринбург : Издательство УрГУПС, 2013. – 105 с.

27. Паранин, А. В. Моделирование чистого контакта между контактным проводом и токосъемной пластиной в статике методом конечных элементов / А. В. Паранин, А. В. Ефимов, Д. А. Ефимов // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 57–67.

28. Паранин, А. В. Расчет распределения тока в контактном проводе и в полуприемнике при токоотводе / А. В. Паранин, Д. А. Ефимов // Транспорт Урала. – 2009. – № 4 (23). – С. 81–84.

29. Паранин, А. В. Тепловой расчет контактной подвески постоянного тока с целью выявления мест локального перегрева при тепловизионной диагностике / А. В. Паранин, А. Б. Батрашов // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: Материалы третьей международной научно-практической конференции с международным участием. – Омск : ОмГУПС, 2018. – С. 93–100.

30. Паранин, А. В. Математическое моделирование тепловых процессов при взаимодействии токоприемника и контактного провода / А. В. Паранин // Транспорт Урала. – 2009. – № 4 (23). – С. 85–88.

31. Паранин, А. В. Совершенствование аэродинамических и тепловых расчетов проводов контактной сети на основе метода конечных элементов : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Паранин Александр Викторович. – Екатеринбург, 2011. – 158 с.

32. Паранин, А. В. Расчет распределения тока и температуры в контактной подвеске постоянного тока на основе метода конечных элементов / А. В. Паранин // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – № 6. – С. 33–38.

33. Паранин, А. В. Анализ требований, предъявляемых к контактным проводам электрифицированных железных дорог / А. В. Паранин, А. Б. Батрашов // В сборнике: Инновационный транспорт – 2016. Специализация железных дорог. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященная 60-летию основания Уральского государственного университета путей сообщения. Ответственный за выпуск С. В. Бушуев. – 2017. – С. 120–125.

34. Бочев, А. С. Определение характеристик случайного процесса нагрева контактного провода / А. С. Бочев. // Вестник ВНИИЖТ. – 1978. – № 8. – С. 7–9.

35. Григорьев, В. Л. Исследование состояния зажимов электрических соединений контактной сети / В. Л. Григорьев, Н. В. Теплякова // Вестник Самарской Государственной Академии Путей Сообщения. – 2005. – № 3. – С. 26–30.

36. Григорьев, В. Л. Тепловые процессы в устройствах тягового электроснабжения / В. Л. Григорьев, В. В. Игнатьев. – М. : УМЦ, 2007. – 182 с.
37. Ли, В. Н. Моделирование процесса нагрева и теплоотдачи соединительных элементов тяговой сети / В. Н. Ли, И. В. Игнатенко, А. С. Слободенюк // Вестник ВНИИЖТ. – 2010. – № 4. – С. 24–29.
38. Игнатенко, И. В. Повышение эксплуатационной надежности токопроводящих зажимов контактной сети электрифицированных железных дорог : моногр. / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2016. – 116 с.
39. Кобозев, А. В. Модель дугового нагрева медного контактного провода / А. В. Кобозев // Современные технологии железнодорожному транспорту и промышленности. Труды 44 научно-практической конференции ученых транспортных вузов, инженерных работников и представителей академической науки. – Хабаровск. – 2006. – Т.1. – С. 103–109.
40. Эпштейн, Л. Л. Проверочный расчет проводов контактной сети на нагревание / Л. Л. Эпштейн // Сб. тр. ВНИИЖТ. – М. : Транспорт, 1991. – С. 52–53.
41. Lingen, J. Wärmeübergang und Strombelastbarkeit von Hochgeschwindigkeitsoberleitungen im Tunnel / J. Lingen, P. Schmidt // Elektrische Bahnen. – 1996. – № 94. – pp. 110–114.
42. Löbl, H. Zur Dauerstrombelastbarkeit and Lebensdauer der Geräte der Elektroenergieübertragung. Lecturer thesis / H. Löbl. – Dresden : TU, 1985.
43. Merz, H. Erwärmung und Belastbarkeit von Fahrleitungen / H. Merz, F. Roggen, Th. Zürrer // Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik. – 1967. – № 7 (33). – pp. 189–215.
44. Szepek, B. Beitrag zur Ermittlung der Belastbarkeit und Zuverlässigkeit elektrotechnischer Betriebsmittel von Industriegleichstrombahnen. Doctoral thesis. – Dresden : HfV, 1974.
45. Берент, В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта / В. Я. Берент. – М.: Интекст, 2005. – 408 с.

46. Берент, В. Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем) / В. Я. Берент. – М. : АНАЛИТИКА РОДИС, 2016. – 330 с.
47. Берент, В. Я. Перспективность применения металлоуглеродных контактных вставок для токосъема на железных дорогах России / В. Я. Берент // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76. – № 3. – С. 174–180.
48. Берент, В. Я. Электроэрозия электрических контактов / В. Я. Берент // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – Т. 75. – № 2. – С. 88–96.
49. Gershman, I. S. Contact strips to be used with railway current collectors / I. S. Gershman, N. V. Mironos, M. A. Mel'nik, E. I. GERSHMAN // VNIIZHT bulletin (railway research institute bulletin). – 2013. – № 1. – pp. 23–29.
50. Гершман, И. С. Требования к контактным проводам для высокоскоростного железнодорожного транспорта / И. С. Гершман, Н. В. Миронос // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта – 2011. – № 3. – С. 13–17.
51. Гершман, И. С. Токосъемные вставки для токоприемников железнодорожного транспорта / И. С. Гершман, Н. В. Миронос, М. А. Мельник, Е. И. Гершман // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – № 4. – С. 3–10.
52. Гуков, А. И. Аэродинамические характеристики контактных проводов МФ-150 и МФО-100 и ветровые нагрузки на эти провода. В кн. «Совершенствование контактной сети и токосъема на электрифицированных железных дорогах». – М. : Транспорт, 1968. – С. 87–95.
53. Гуков, А. И. Разработка модели измерения термopрочности контактной сети / А. И. Гуков, Л. Н. Рачек. – М : Труды МИИТ, – 1988. – Вып. 788 – С. 27–32.
54. Купцов, Ю. Е. Увеличение срока службы контактного провода / Ю. Е. Купцов. – М. : Транспорт, 1972. – 160 с.

55. Порцелан, А. А. Борьба с гололедом на электрифицированных железных дорогах / А. А. Порцелан, И. В. Павлов, А. А. Неганов. – М : Транспорт, 1970. – 148 с.
56. Порцелан, А. А. Исследование нагрева и механических характеристик контактных проводов. – М. : Транспорт, 1968. – 337 с.
57. Флинк, Д. В. Влияние подогрева проводов контактной сети на их прочность / Д. В. Флинк // Работы МИИТ, 1959. – Ч. 104.
58. Roggen, F. Erweichung von Kupfer bei zyklischer Erwärmung / F. Roggen // Technik. – 1970. – № 9 (36). – pp. 360–362.
59. Набойченко, И. О. Аппаратура защиты отжига проводов контактной сети постоянного тока / И. О. Набойченко, В. П. Неугольников // Актуальные проблемы безопасности на железнодорожном транспорте / Сб. научн. тр. – Екатеринбург: УрГАПС. – 1994. – Вып. 1 (83). – С. 137–141.
60. Набойченко, И. О. Тепловая защита контактной сети ТЗКС / И. О. Набойченко, В. А. Вербитский // Локомотив. – 1995. – № 3. – С. 38–40.
61. Набойченко, И. О. Тепловая защита проводов – надежна! / И. О. Набойченко, В. А. Вербитский // Локомотив. – 1997. – № 1. – С. 42–43.
62. Неугольников, В. П. Аппаратура тепловой защиты контактной сети нового поколения ТЗКС-2. Конструктивные особенности / В. П. Неугольников, С. Ю. Пугачев // Разработка и совершенствование электрооборудования для систем тягового электроснабжения железных дорог : 70-летию со дня рождения Юрия Михайловича Бея посвящается. – Екатеринбург : УрГУПС, 2009. – Вып. 70 (153). – С.50–55.
63. Тепляков, В. Б. Защита контактной сети по тепловому режиму при различных циклах тяговой нагрузки : дис. ... канд. тех. наук : 05.22.07 / Тепляков Валерий Борисович. – Самара, 2003. – 167 с.
64. Фигурнов, Е.П. Релейная защита; Учебник. В 2 ч. Ч. 2. / Е. П. Фигурнов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 604 с.
65. Галкин, А. Г. Математическое моделирование и информационные технологии в задачах диагностики контактной сети электрифицированных железных

дорог : монография / А. Г. Галкин, А. Н. Митрофанов, С. А. Митрофанов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2012. – 226 с.

66. Ковалев, А. А. Теория и методы расчета стоимостных показателей системы токосъема на протяжении жизненного цикла : монография / А. А. Ковалев, А. Г. Галкин. – Екатеринбург : УрГУПС, 2015. – 115 с.

67. Грачев, В. Ф. Мобильная компьютеризированная система диагностики арматуры и изоляции контактной сети по инфракрасному и ультрафиолетовому излучениям : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Грачев Василий Федорович. – СПб., 2008. – 238 с.

68. Жарков, Ю. И. Развитие системы диагностики и определение технического состояния контактной сети в области дугового токосъема / Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семенов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, – 2015. – № 3 (59). – С. 112–116.

69. Павлов, В. М. Экспериментальные исследования нагрузочной способности токоприемника магистрального электроподвижного состава / В. М. Павлов, А. Н. Смердин, В. В. Томилов, А. С. Голубков, М. В. Емельянов // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – 2013. – С. 62–69.

70. Сидоров, О. А. Совершенствование вероятностных моделей прогнозирования отказов элементов инфраструктуры электроснабжения железных дорог / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, А. С. Голубков / Известия Транссиба. – 2017. – № 3 (31). – С. 123–132.

71. Jiqin, Wu Pantograph and Contact Line System. – London : Elsevier, 2018. – 380 p.

72. Petrausch, D. Thermische Modellierung und Thermovision bei Fahrleitungsanlagen / D. Petrausch // Elektrische Bahnen. – 1990. – № 2 (88). – pp. 80–84.

73. Xi-Yang, Liu Failure analysis and optimization of integral droppers used in high speed railway catenary system // Liu Xi-Yang, Peng Jin-Fang, Tan De-Qiang, Xu

Zhi-Biao, Liu Jian-Hua, Mo Ji-Liang, Zhu Min-Hao / Engineering Failure Analysis. // – 2018. – Vol. 91. – pp. 496–506.

74. ЦЭ-868 Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. – М. : Трансиздат, 2002. – 184 с.

75. Правила содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи: распоряжение ОАО "РЖД" от 02.08.2017 № 1540р, от 16.04.2019 № 736/р – М. : ОАО «РЖД», 2019. – 192 с.

76. ГОСТ Р 55647–2018 Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2018. – 20 с.

77. ГОСТ 32697–2014 Тросы контактной сети железной дороги несущие. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2015. – 8 с.

78. ГОСТ 839–80 Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1981. – 23 с.

79. ГОСТ 4775–91 Провода неизолированные биметаллические сталемедные. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 16 с.

80. DIN 48201–1 : 1981 Copper stranded conductors. – Berlin : Deutsches Institut für Normung, 1981. – 8 pp.

81. ГОСТ 3822–79 Проволока биметаллическая сталемедная. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1998. – 10 с.

82. DIN 48201–2 : 1981 Bronze stranded conductors. – Berlin : Deutsches Institut für Normung, 1981. – 8 pp.

83. ГОСТ 26437–85 Провода неизолированные гибкие. Общие технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1994. – 12 с.

84. ГОСТ 30055–93 Канаты из полимерных материалов и комбинированные. Технические условия. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и стандартизации, 2003. – 27 с.

85. О признании не подлежащими применению актов Министерства путей сообщения СССР и Министерства путей сообщения Российской Федерации : Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 6 мая 2019 года № 134

[Электронный ресурс] // Приказы Министерства транспорта Российской Федерации. – 2019. – № 134. – Режим доступа: <https://www.mintrans.ru/documents/2/9946>.

86. Об утверждении перечней актов, содержащих обязательные требования, соблюдение которых оценивается при проведении мероприятий по контролю при осуществлении федеральной службой по надзору в сфере транспорта федерального государственного транспортного надзора : Приказ Ространснадзора от 11 февраля 2019 года № ВБ-91фс [Электронный ресурс] // Перечни актов, содержащих обязательные требования. – 2019. – № ВБ-91фс. – Режим доступа: <https://rostransnadzor.ru/normativnaya-baza/perechni-aktov,-soderzhashhix-obyaz>.

87. Схемные и конструктивные решения по контактной сети участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Расчет электротехнических параметров контактной сети / АО «Универсал – контактные сети». – Санкт-Петербург, 2016.

88. DIN EN 50149 : 2013 Railway applications – Fixed installations – Electric traction – Copper and copper alloy grooved contact wires. – Frankfurt am Main : Verband Deutscher Elektrotechniker, 2013. – 29 pp.

89. TB/T 3111–2014 Copper and copper alloy stranded conductors for electric railway. – Beijing : National Railway Administration, 2014. – 16 с.

90. TB/T 2809–2014 Copper and copper alloy contact wires for electric railway. – Beijing : National Railway Administration, 2014. – 13 pp.

91. UIC 799–1 : 1ed 2001 Characteristics of direct-current overhead contact systems for lines worked at speeds of over 160 km/h and up to 250 km/h. – Paris : Union Internationale des Chemins de Fer, 2013.

92. Емельянова, М. Н. Обоснование механической величины эксплуатационной термомеханической нагрузки на провода контактной сети / М. Н. Емельянова // Известия Транссиба. – 2018. – № 2 (18). – С. 55–60.

93. Hayoz, P. Fahrdrahtschaden in Streckentrennungen – Harte und Zugfestigkeit / P. Hayoz, U. Wili, R. D. Rogler, G. Kitzrow, F. Pupke // Elektrische Bahnen. – 2014. – № 112. – pp. 206–213.

94. ГОСТ Р 57670–2017 Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. – М. : Стандартинформ, 2017. – 52 с.

95. СП 224.1326000.2014 Тяговое электроснабжение железной дороги : утвержден приказом Минтранса России от 2 декабря 2014 года № 330 – М. : Министерство транспорта, 2014. – 83 с.

96. ГОСТ 12393–2013 Арматура контактной сети железной дороги линейная. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 20 с.

97. ГОСТ Р 57193–2016 Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. – М.: Стандартинформ, 2016. – 98 с.

98. Батрашов, А. Б. Модели токораспределения в контактных подвесках постоянного тока // Материалы Всероссийской научной конференции аспирантов : «Техника и технологии наземного транспорта». – Екатеринбург : УрГУПС, 2018. – С. 111–114.

99. Batrashov, A. V. Method of selection of the contact wire material, depending on the parameters of the railway line / A. V. Batrashov // В сборнике: Приоритеты и научное обеспечение технологического прогресса. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 3–5.

100. Батрашов, А. Б. К вопросу о выборе материала контактного провода по условиям его нагрева при токосъеме / А. Б. Батрашов, А. В. Паранин // Материалы II Международной научно-практической конференции в рамках II Международного Научного форума Донецкой Народной Республики: «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта». – Донецк : ДонИЖТ, 2016. – С. 125–129.

101. Батрашов, А. Б. Методика подбора контактного провода по параметрам железнодорожной линии / А. Б. Батрашов, А. В. Паранин // Приоритетные направления социально-экономического развития транспорта. Сборник материалов Международной научно-практической конференции – Курган: КИЖТ УрГУПС. – 2016. – С. 166–169.

102. Батрашов, А. Б. Анализ физических свойств материала контактного провода по характеристикам железнодорожной линии / А. Б. Батрашов // Эврика! : материалы семинара аспирантов УрГУПС. – 2016. – № 2 (217). – С. 6–18.

103. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов : в 2 т. / Н. С. Пискунов. – 13-е изд. – М. : Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 2 т. – 560 с.

104. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники. Учебник для вузов: в 3 т. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – 1 т. – 463 с.

105. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – М. : Вильямс, 2013. – 1328 с.

106. Левитин, А. В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / А. В. Левитин. – М. : Вильямс, 2006. – 576 с.

107. Collina, A. Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction / A. Collina, S. Bruni // Vehicle System Dynamics. – 2002. – №4 (Vol. 38). – pp. 261–291.

108. Pombo, J. Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains / J. Pombo, J. Ambrósio // Computers and Structures. – 2013. – Vol. 124. – pp. 88–101.

109. Батрашов, А. Б. Сравнение моделей токораспределения в контактных подвесках постоянного тока / А. Б. Батрашов // Известия Транссиба. – 2017. – № 4. – С. 54–67.

110. Альбом КС-160.6.0-10 Схемы подвески, сопряжений, узлы контактной сети с изолированными горизонтальными консолями. – СПб. : ЗАО «Универсал-контактные сети», 2010.

111. Smith, Steven W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / Steven W. Smith. – 2nd ed. – San Diego : California Technical Publishing, 1999. – 626 p.

112. 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.

113. Incropera, F. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine. – 6th ed. – New Jersey : John Wiley and Sons, 2006. – 1070 p.

114. Fourier, J. Théorie analytique de la chaleur / J. Fourier – Paris : Firmin Didot, 1822. – 684 p.

115. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М. : Мир, 2002. – 461 с.

116. Рихман, В. Труды по физике / В. Рихман. – М. : Изд-во АН СССР, 1956. – 711 с.

117. Bejan, A. Heat transfer handbook / A. Bejan, A. D. Kraus. – New Jersey: John Wiley and Sons, 2003. – 1481 p.

118. Lord Rayleigh, O. M. F. R. S. On convective currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side / O. M. F. R. S. Lord Rayleigh. – 32nd ed. – London : Philosophical Magazine, 1916. – pp. 529–546.

119. Reynolds, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels / O. Reynolds // The Royal Society. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1883. – Vol. 174. – pp. 935–982.

120. Churchill, S.W. Combined free and forced convection around immersed bodies. Section 2.5.9 in heat exchanger design handbook. – Düsseldorf : VDI Verlag, 1983. – 7 с.

121. Nußelt, W. Das Grundgesetz des Wärmeüberganges / W.Nußelt // Gesundh. Ing.– 1915. – № 38. – pp. 477–482 and pp. 490–496.

122. Пойнтинга – Робертсона – Стримеры / Стефана – Больцмана постоянная // Физическая энциклопедия : в 5 т. / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Большая российская энциклопедия, 1994. – 704 с. – 4 т.

123. Joule, J. P. On the Electric Origin of the Heat of Combustion / J. P. Joule // Philosophical Magazine, Series 3. – 1841. – Т. XX. – С. 98.

124. Cooper, M. G. Thermal contact conductance / M. G. Cooper, B. B. Mikic, M. M. Yovanovich // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1969. – Vol. 12. – pp. 279–300.
125. Mikic, B. B. Thermal contact conductance: theoretical considerations / B. B. Mikic // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1974 – Vol. 17. – pp. 205–214.
126. Churchill, S. W. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate / S. W. Churchill, H. H. S. Chu // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 1975. – Vol. 18. – pp. 1323–1329.
127. D'Agostino, R. B. Transformation to normality of the null distribution of G_1 / R. B. D'Agostino // *Biometrika*. – 1970. – Vol. 57. – pp. 679–681.
128. D'Agostino, R. B. Simulation probability points of B_2 for small samples / R. B. D'Agostino, G. L. Tietjen // *Biometrika*. – 1971. – Vol. 58. – pp. 669–672.
129. Pearson, E. S. Test for departure from normality: Comparison of powers / E. S. Pearson, R. B. D'Agostino, K. O. Bowman // *Biometrika*. – 1977. – Vol. 64. – pp. 231–246.
130. Проскуряков, Е. Л. Основные способы снятия ограничений по системе электроснабжения постоянного тока / Е. Л. Проскуряков, А. В. Паранин // *Железнодорожный транспорт*. – 2016. – № 11. – С. 23–25.
131. Roman, Z. Współpraca dynamiczna odbieraka prądu z siecią trakcyjną i jej wpływ na warunki odbioru prądu poprzez silnie obciążony zestyk ślizgowy / Z. Roman // *Prace COBiRTK*. – 1980. – zeszyt 75, 76.
132. Батрашов, А. Б. Конструкционные решения по выравниванию токовой и тепловой нагрузки проводов контактной сети постоянного тока / А. Б. Батрашов // *Вестник УрГУПС*. – 2019. – № 1. – С. 79–88.
133. Брон, О. Б. Электрические аппараты с водяным охлаждением / О. Б. Брон. – Ленинград: Энергия, 1967. – 265 с.
134. Брон, О. Б. Явления в контактах низковольтных аппаратов при включении ими больших токов короткого замыкания / О. Б. Брон, В. И. Гусев // *Электросила*. – 1973. – № 29. – С. 124–128.
135. Залесский, А. М. Основы теории электрических аппаратов / А. М. Залесский. – М.: Высшая школа, 1974. – 184 с.

136. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М. : Издательство иностранной литературы, 1961. – 464 с.

137. Мелькумов, А. М. Износ контактов в высоковольтных маломасляных выключателях / А. М. Мелькумов, И. Л. Шлейфман // Электротехника. – 1968. – № 9. – С. 21–24.

138. DIN EN 12385–1 : 2009 : 1981 Steel wire ropes – Safety – Part 1: General requirements. – Berlin : Deutsches Institut für Normung, 2009. – 25 pp.

139. ЦЭ-197-5/3 Технологические карты на работы по содержанию и ремонту устройств контактной сети электрифицированных железных дорог. Книга I. Капитальный ремонт. – М. : НИС Э ПВЦ МПС РФ, 1997. – 352 с.

140. Проект КС-160.15-12 Питающие линии контактной сети КС-160 на металлических опорах. – СПб. : ЗАО «Универсал-контактные сети», 2012.

141. Альбом КС-200-06-К Схемные конструктивные решения узлов контактной сети постоянного тока для скоростей движения до 200 км/ч. – СПб. : «Универсал-контактные сети», 2009.

142. РД 153-34.0-20.363-99 Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. – М. ОАО «Фирма по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС», 2000. – 136 с.

143. МДС.353.000 РЭ Система тепловизионной диагностики конструктивных элементов контактной сети. Руководство по эксплуатации. – СПб : ООО «МДС холдинг», 2015. – 10 с.

144. MSD ТеплоWork 3.1.x.x Программа тепловизионного диагностирования изоляторов контактной сети. Инструкция пользователя. – СПб. : ООО «МДС Холдинг», 2015. – С.12.

145. Самохвалова, Ж. В. Совершенствование конструкций электрических соединений многопроволочных проводов контактной сети : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Самохвалова Жанна Владимировна. – Самара, 2006. – 134 с.

146. Паранин, А. В. 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.

147. Паранин, А. В. Экспериментальное исследование работы электрического контакта «контактный провод – токосъемная пластина» в статическом положении / А. В. Паранин, Н. А. Акиншин, А. Б. Батрашов // Транспорт Урала. – 2013. – № 4 (39). – С. 93–96.

ПРОГРАММА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА ELTECAT АВ УрГУПС

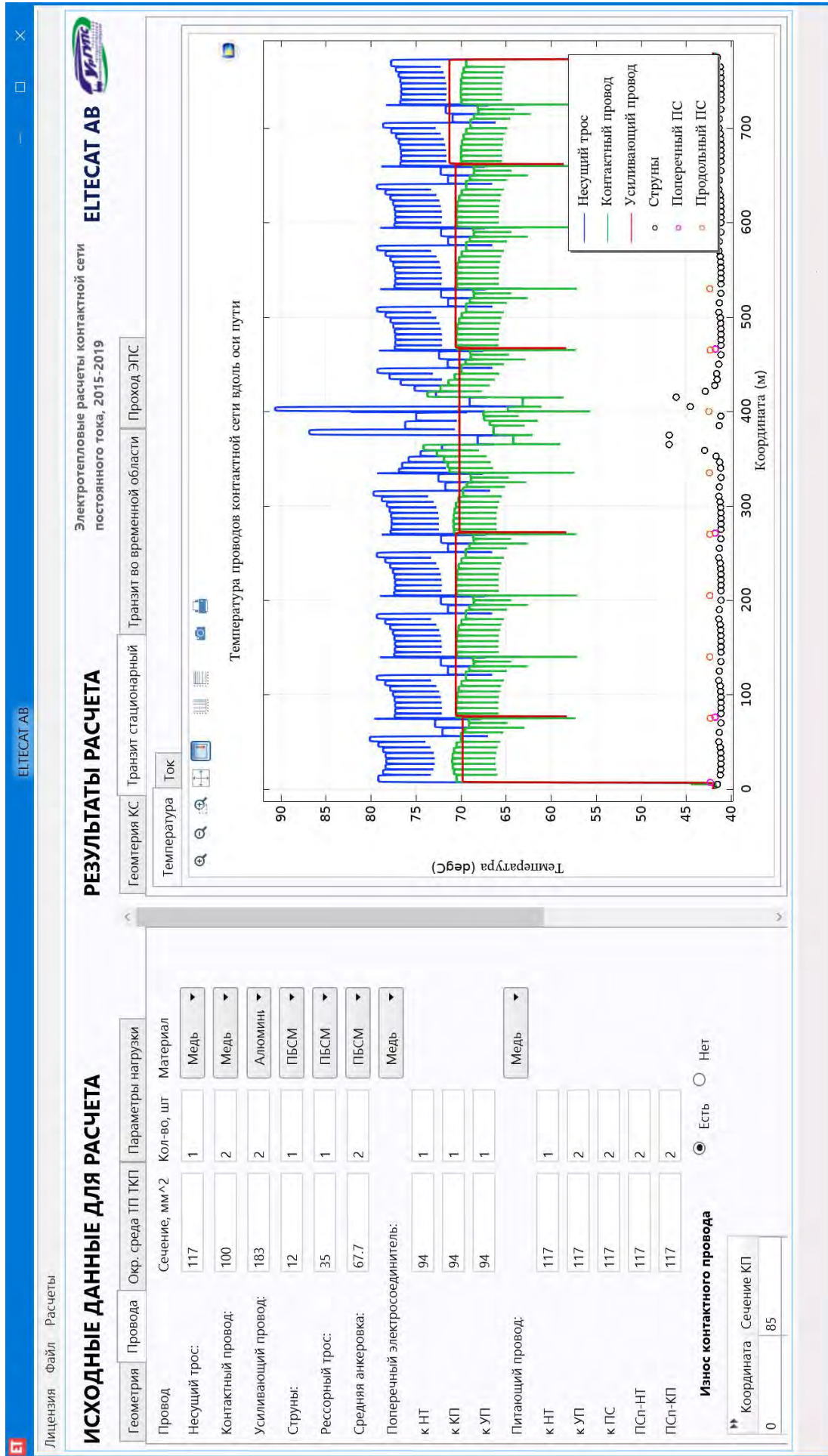


Рисунок А.1 – Рабочее окно программы ELTECAT AB УргУПС

ДОПУСТИМЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОВОДА
КОНТАКТНОЙ СЕТИ

В данном приложении приведена сводная таблица допустимых температур из нормативно-технической документации для проводов контактной сети.

Таблица Б.1 – Максимальные температуры материалов проводов в зависимости от времени воздействия

Материал провода	Максимальная температура, °С				
	1 с	1 мин	3 мин	30 мин	Длительно
Медь					
EN 50119:2009	170	–	–	120	80
ЦЭ-868 контактный провод	–	140	120	–	95
ЦЭ-868 многопроволочный	–	140	120	–	100
Медно-серебряный сплав					
EN 50119:2009	200	–	–	150	100
Медно-оловянный сплав					
EN 50119:2009	170	–	–	130	100
ЦЭ-868 контактный провод	–	150	130	–	110
Медно-магниевый сплав (0,2 % Mg)					
EN 50119:2009	170	–	–	130	100
ЦЭ-868 контактный провод	–	160	140	–	120
Медно-магниевый сплав (0,5 % Mg)					
EN 50119:2009	200	–	–	150	100
ЦЭ-868 контактный провод	–	160	140	–	120
ЦЭ-868 многопроволочный	300	–	–	–	–
Алюминий					
EN 50119:2009	130	–	–	–	80
ЦЭ-868 многопроволочный	–	110	100	–	90
Сталемедный биметаллический					
EN 50119:2009	–	150	140	–	120
Сталеалюминевый биметаллический					
ЦЭ-868 многопроволочный	160	–	–	–	80

ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ



АО «УНИВЕРСАЛ — КОНТАКТНЫЕ СЕТИ»

ул. 7-я линия В.О., д. 76,
г. Санкт-Петербург, 199178,
Тел.: (812) 323-16-16, факс: (812) 323-45-34,
E-mail: uks@uks.ru

УТВЕРЖАЮ

Генеральный директор

АО «Универсал — контактные
сети»



А. А. Курилов

2019 г.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

1. Разработчики: Батрашов Андрей Борисович, Паранин Александр Викторович.
2. Предмет внедрения: методика электротеплового расчета контактной сети постоянного тока.
3. Место внедрения: АО «Универсал — контактные сети».
4. Техничко-экономический эффект: разработанная методика электротеплового расчета контактной сети постоянного тока с учетом геометрии соединения проводов, токоведущих зажимов и поддерживающей арматуры, неравномерного по длине износа контактного провода, а также теплообмена контактных проводов с токосъемными пластинами позволяет производить обосновывающие расчеты при проектировании новых конструкций контактных подвесок, поиске «узких мест» с точки зрения токовой и тепловой нагрузки, усилении и модернизации контактной сети, повышении эффективности тепловизионной диагностики, анализе причин возникновения отказов элементов от воздействия тепловой нагрузки для таких эксплуатационных режимов работы контактной сети, как: транзит тягового тока, токосъем, потребление тока при стоянке, перегрузка и короткое замыкание.
5. Дата внедрения: 21 января 2019 года.
6. Предложение о дальнейшем использовании: предлагается применение разработанной методики при проведении электротепловых расчетов контактных подвесок постоянного тока.

Заместитель

главного инженера по НИОКР, к.т.н.

Е. В. Кудряшов



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ТРАНСЭНЕРГО
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ПО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЮ**

ул. Челюскинцев, 116,
г. Екатеринбург, 620013,
Тел.: (343) 358-48-23, факс: (343) 358-57-27,

E-mail: Nees@svrw.ru
«05» 02 2019 г. №ИСХ- 577 /СВЕРД НТЭ

На № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

1. Разработчики: Батрашов Андрей Борисович, Паранин Александр Викторович.

2. Предмет внедрения: конструкционные решения по устранению «узких мест» с точки зрения токовой и тепловой нагрузки контактной сети постоянного тока и результаты математического моделирования по эффективности выявления дефектных элементов контактной сети при тепловизионной диагностике.

3. Место внедрения: Свердловская железная дорога, филиал ОАО «Российские железные дороги», Свердловская дирекция по энергообеспечению, Дорожная электротехническая лаборатория.

4. Технико-экономический эффект: разработанные конструкционные решения направлены на выравнивание токовой и тепловой нагрузки проводов контактной подвески в районе узла средней анкеровки контактного провода, в месте подключения питающих проводов и шлейфов разъединителей, на сопряжениях анкерных участков с обводом усиливающих проводов, а результаты математического моделирования дефектных элементов контактной сети направлены на повышение эффективности тепловизионной диагностики.

5. Дата внедрения: 21 января 2019 года.

6. Предложение о дальнейшем использовании: предлагается применение результатов научно-исследовательской работы при усилении и модернизации участков контактной сети, а также для повышения эффективности тепловизионной диагностики при выявлении дефектных элементов контактной сети.

Начальник дирекции

Начальник электротехнической
лаборатории



О.В. Халуев

И.А. Пятецкий

Рисунок В.2 – Акт внедрения на Свердловской железной дороге



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ТРАНСЭНЕРГО
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ПО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЮ**

ул. Челюскинцев, 116,
г. Екатеринбург, 620013,
Тел.: (343) 358-48-23, факс: (343) 358-57-27,
E-mail: Nees@svrw.ru

«28» 08 2019 г. №ИСХ-25 /СВЕРДНТЭ

На № _____ от _____

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

1. Разработчики: Батрашов Андрей Борисович, Паранин Александр Викторович.
2. Предмет внедрения: ELTECAT АВ УрГУПС – программа для ЭВМ.
3. Место внедрения: Свердловская железная дорога, филиал ОАО «Российские железные дороги», Свердловская дирекция по энергообеспечению, Дорожная электротехническая лаборатория.
4. Техничко-экономический эффект: программное обеспечение предназначено для выполнения электротепловых расчетов контактной сети постоянного тока с учетом геометрии контактной сети, токоведущей и поддерживающей арматуры, неоднородных параметров элементов, нелинейных свойств материалов, нагрева контактного провода токосъемными пластинами, а также положения расчетного участка на межподстанционной зоне для режимов стационарного протекания транзитного тока, протекания транзитного тока во временной области, а также токосъема одним или двумя токоприемниками.
5. Дата внедрения: 28 августа 2019 года.
6. Предложение о дальнейшем использовании: внедряемое программное обеспечение направлено на использование при уточнении и обосновании таких эксплуатационных параметров, как нагрузочная способность контактной сети постоянного тока, распределение тока и температуры в проводах контактной сети, межпоездной интервал, и др.

Начальник дирекции

Начальник электротехнической
лаборатории

О.В.Халуев

И.А.Пятецкий



ОАО «РЖД»
Акционерное общество
«СКОРОСТНЫЕ МАГИСТРАЛИ»
(АО «Скоростные магистрали»)
 107078, г. Москва, ул. Маши Порываевой, д. 34
 Тел.: (495) 789-98-70, факс: (495) 789-98-71,
 E-mail: info@hsrail.ru, www.hsrail.ru

« 23 » августа 20 19 г. № исх-1911/СМ

На № _____ от _____

В совет по защите
 диссертаций на соискание
 ученой степени кандидата
 наук Д 218.013.01 на базе
 ФГБОУ ВО «Уральский
 государственный университет
 путей сообщения»

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Материалы диссертации соискателя Батрашова А.Б. на тему: «Совершенствование электротепловых расчетов и характеристик контактной сети постоянного тока» используется в практической деятельности Службы главного инженера АО «Скоростные магистрали». В частности, применяется разработанная автором методика электротеплового расчета контактной сети постоянного тока для определения температуры элементов контактной сети при таких эксплуатационных режимах работы контактной сети, как транзит тягового тока, токосъем, потребление тока при стоянке и перегрузка.

По материалам исследования внедрены обоснования по допустимости применения одинарного контактного провода взамен двойного для контактной сети постоянного тока, предназначенной для скоростей движения до 250 км/ч включительно.

Выводы и основные положения диссертации Батрашова А.Б. используются в практической работе АО «Скоростные магистрали» и способствуют деятельности организации в области создания и развития в России сети высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Исполняющий обязанности
 главного инженера



С.А. Алексеев

Рисунок В.4 – Акт внедрения на предприятии АО «Скоростные магистрали»