

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

СОЛДАТОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ДИАГНОСТИКА ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТОВ
В СЕТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ
МЕТОДОМ**

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Суржиков Анатолий Петрович

Томск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КОНТАТНОГО СОЕДИНЕНИЯ	10
1.1. Характеристика объекта контроля. Типы соединений	10
1.2. Типы изоляций	18
1.3. Виды контроля контактных соединений	26
1.4.1. Визуальный контроль	28
1.4.2. Термоиндикация.....	30
1.4.3. Тепловидение	32
1.4.4. Фотоакустическая микроскопия.....	33
1.4.5. Рентгеноскопия	36
1.4.6. Прямые и косвенные методы контроля сопротивления контактов	38
1.4.7. Контроль контактного сопротивления термоэлектрическим методом	45
ВЫВОДЫ.....	49
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЯ КОНТАКТНОГО ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЭДС	50
2.1. Описание модели для исследования термоЭДС при контроле контактного сопротивления	51
2.2 Исследование влияния параметров контактных пар на возникающую термоЭДС.....	58
2.3 Исследование температурного поля контактной пары	65
2.4 Способы контроля термоЭДС контактного соединения в сети электроснабжения промышленной частоты.....	85
ВЫВОДЫ.....	94
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ТЕРМОЭДС.....	95
3.1 Экспериментальная установка для определения термоЭДС.....	95

3.2 Экспериментальные исследования зависимости термоЭДС от контактного сопротивления	103
3.3 Система мониторинга контактного соединения.....	105
ВЫВОДЫ.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	110
Приложение	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Важнейшей составляющей национальных интересов является обеспечение безопасности личности, общества и государства в условиях чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и их последствий. Согласно статистике в 2021 году в России случилось 57390 пожаров, произошедших вследствие нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования и бытовых электроприборов, погибло 2289 человека, еще 2545 было травмировано. Причиненный материальный ущерб составил 15 244,7 млн. рублей.

Существующие системы мониторинга состояния электросети ориентированы, в основном, на мониторинг объемов потребления электроэнергии, качества питающего напряжения и наличия аварийных ситуаций. Одна из трудно решаемых задач в этой области – это контроль большого переходного сопротивления (БПС) контактов, которые являются одной из причин пожаров в электроустановках.

Переходные сопротивления образуются в местах соединения проводников между собой, а также в местах присоединения проводников к машинам, аппаратам, приборам. В нормативных документах указано, что величина переходного сопротивления, которая регламентируется РД 34.45-51.300-97 и ПТЭЭП, не должна превышать 0,05 Ом (во взрывоопасных помещениях и зонах переходное сопротивление контактов должно быть не более 0,03 Ом). БПС возникают в местах плохих контактов за счет слабого сжатия, малой поверхности соприкосновения, неплотного прижатия и неровностей в местах соединения и оконцевания проводов (особенно при наличии вибрации оборудования), уменьшения сечения в месте соединения, окисления металлов, которое часто возникает в сырых, особо сырых или с химически активной средой помещениях. Наличие контактного сопротивления отмечается многими исследователями, в том числе предлагаются различные методы его уменьшения.

В этом случае площадь действительного соприкосновения уменьшается, сопротивление в данном месте увеличивается. Возрастает количество выделяющегося в этом месте тепла. Возникает локальный перегрев, что может приводить к воспламенению изоляции и сгораемых элементов конструкций и в конечном итоге стать причиной отказа электросети. Особенность БПС усугубляется тем, что их трудно обнаружить, а аппараты защиты по току не срабатывают, т.к. ток в цепи не увеличивается, а уменьшается.

Обнаруживают БПС обычно уже тогда, когда оно стало причиной отказа. Поэтому особое значение приобретают мероприятия, направленные на то, чтобы не допустить появления БПС. Это возможно при их своевременном обнаружении в контролируемой цепи и устранении причины их возникновения. Однако, профилактика БПС является очень трудоемкой задачей и на сегодняшний день выполняется только вручную, путем механической разборки контактного соединения. Температуру контактного соединения можно контролировать термонаклейками, которые выпускают как зарубежные, так и отечественные производители, например, компания ИНТЕМ. Электронных приборов непрерывного мониторинга БПС в настоящее время не существует. Применение термонаклеек не спасает положение, т.к. ежедневный осмотр трудозатратен, а при периодическом осмотре возможен пропуск аварийной ситуации. Кроме того, они являются одноразовыми и после срабатывания требуют замены. Поэтому существует актуальная задача по разработке научно обоснованных подходов к созданию методов и приборов контроля переходного сопротивления контактов.

В настоящее время измерение переходных сопротивлений контактных соединений производится микроомметрами или контактомерами, т.е. специальными приборами для измерения малых сопротивлений. Не каждый электротехнический персонал имеет такое оборудование, поэтому сопротивление в соединителях, разветвителях и т.п. не измеряется.

Поэтому актуальной задачей является провести исследования термоэлектрического метода для мониторинга переходного сопротивления

контактов в действующей сети электроснабжения без отключения потребителей в режиме реального времени.

Цель диссертационной работы: разработка метода и прибора диагностики переходного сопротивления контакта в сети электроснабжения на основе термоэлектрического метода без отключения потребителей энергии.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **основных задач:**

1. Провести анализ существующих систем диагностики переходного сопротивления контакта в сети электроснабжения.
2. Разработать математическую модель.
3. Провести исследования по нагреву контактного соединения, выполненного из разных материалов.
4. Разработать способ детектирования места БПС.
5. Разработать макет устройства.
6. Провести экспериментальные исследования.

Научная новизна работы. По результатам работы были получены следующие новые научные знания:

1. Предложен и исследован термоэлектрический метод для диагностики контактного сопротивления, основанный на изменении термоЭДС контактной пары при ее нагреве за счет тока нагрузки потребителя, защищенный патентом РФ №.2762526.

2. Разработана модель для исследования термоЭДС контактных пар, позволяющая изменять параметры контактных пар в широком диапазоне величин.

3. Разработан способ локализации мест большого переходного сопротивления контактов, основанный на анализе скорости изменения термоЭДС при включении и отключении нагрузки.

4. Разработана экспериментальная установка для выявления большого переходного сопротивления контактов на основе мониторинга термоЭДС, не имеющая аналогов, защищенная патентом РФ №.2762125

Практическое значение:

1. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем мониторинга электросети без отключения потребителей энергии.
2. Предложенный метод термоэлектрического контроля переходного сопротивления контактов позволяет прогнозировать пожароопасное состояние контактов.

Результаты исследования внедрены в учебный процесс в национальном исследовательском Томском политехническом университете и на предприятии АО «НПЦ «ПОЛЮС».

Основные положения, подлежащие защите:

1. Термоэлектрический метод диагностики переходного сопротивления контактов в сети электроснабжения без отключения потребителей энергии.
2. Модель проведения контроля термоЭДС различных контактных пар при их нагреве за счет протекания тока потребителя.
3. Способ анализа термоЭДС контактных соединений для определения места расположения контакта с большим переходным сопротивлением.
4. Система мониторинга контактного соединения без отключения потребителей энергии, обладающая лучшими техническими характеристиками по сравнению с аналогами.

Личный вклад автора:

Участие в постановке задач, разработке модели для исследования термоЭДС различных контактных пар, разработке и изготовлении экспериментальной установки, которая позволяет проводить исследования термоЭДС различных контактных пар, а также в разработке и исследовании способа выделения термоЭДС из гармонического сигнала сети электроснабжения. В составе авторского коллектива разработал способ анализа термоЭДС контактных соединений для локализации контакта с БПС.

Апробация работы и публикации.

Материалы, включенные в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XXII Международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения»;
- IV Национальная научно-практическая конференция «приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве»;
- Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020»;
- XVII международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ИННОВАТИКА-2021»;
- XIX Научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства», Томск, 16-17 апреля 2020 г. АО «НПЦ «Полус».

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 11 научных работах, из них работ, опубликованных в рецензируемых журналах (из перечня ВАК) – 2, индексируемых в базах Scopus и Web of science – 3, в их числе переводных из списка ВАК - 2, в материалах конференций опубликовано – 6 работ, получено 2 патента РФ на изобретения.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 120 страниц, 66 рисунков и 4 таблицы. Список использованных источников содержит 116 наименований.

Введение показывает актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, ее научную новизну и практическое значение, а также положения, выдвигаемые для защиты.

В первой главе проведен аналитический обзор уже существующих систем контроля контактного сопротивления, рассмотрены стандартные методы контроля контактов, а также описаны основные виды неисправностей и отклонений электрических параметров от нормы, возникающие в процессе эксплуатации электроприборов.

Во второй главе проведен математический расчёт тепловых процессов нагрева контактного соединения, в котором учтены физические процессы, происходящие в нагреваемом за счет протекания тока контактом сопротивлению и охлаждаемом за счет теплопроводности, излучения и конвекции. Был проведен анализ влияния на возникающую термо ЭДС в контактных переходных сопротивлениях различных параметров, таких как: масса, типы контактных материалов, условия окружающей среды, время и, естественно, само контактное сопротивление. Была создана модель контактного соединения в среде AutoCAD 2019 (Russia) и конвертирована в COMSOL Multiphysics. В этом пакете было проведено моделирование физических процессов.

В третьей главе описана экспериментальная установка и приведены результаты экспериментальных исследований, выполненные на этой установке. Установка позволяет проводить мониторинг величины постоянной составляющей в гармоническом сигнале, не проводя специальных мероприятий по отключению потребителей от сети питания. Получены корреляционные зависимости термоЭДС от величины сопротивления контактного соединения.

Выводы по работе сделаны в конце каждой главы.

В заключении отражены основные результаты, полученные в диссертации.

ГЛАВА 1 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ

1.1. Характеристика объекта контроля. Типы соединений

Системы электроснабжения являются неотъемлемой частью каждого процесса как технологического, так и бытового. Электроэнергия поступает к потребителям посредством линий электропередач. Протяженность линий достигает тысячи километров, что неуклонно приводит к наличию контактных соединений.

Контактные соединения бывают двух видов: разъемные и неразъемные. К неразъемным соединениям относят опрессовку, пайку и сварку. К разъемным относят скрутку, соединения клеммными колодками, самозажимными клеммниками, болтовое соединение.

Рассмотрим разъемные соединения подробнее.

Метод скрутки - это один из распространенных способов соединения проводников. Он широко используется в электротехнике и электроустановках. Процесс скрутки состоит в том, чтобы перематывать концы проводников друг вокруг друга для создания надежного электрического соединения (рис.1.1).

Преимущества скрутки:

1. Простота и доступность.

Метод скрутки не требует специальных инструментов или оборудования, поэтому он достаточно доступен.

2. Надежность.

Хорошо выполненная скрутка обеспечивает прочное и надежное соединение проводников.

3. Гибкость.

С помощью метода скрутки можно соединять проводники разной толщины и материалов, а также осуществлять соединения с несколькими проводниками.

При выполнении скрутки руководствуются следующими принципами:

- Подготовка проводников: необходимо, чтобы концы проводников были обнажены и очищены от изоляции для достижения хорошего контакта между ними.

- Выравнивание проводников: концы проводников должны быть выровнены вдоль друг друга, чтобы их можно было легко и точно скрутить.

- Скрутка: проводники перематываются друг вокруг друга, используя специализированные инструменты, такие как комбинированные пассатижи или специальные зажимы для скрутки проводов.

- Фиксация соединения: после завершения скрутки рекомендуется использовать изолирующий материал, такой как электроизоляционная лента или термоусадочная трубка, чтобы зафиксировать и защитить соединение от коррозии.

При выполнении данного метода необходимо:

- Убедиться, что проводники хорошо зачищены и обнажены перед скруткой, чтобы обеспечить хороший контакт и минимизировать потерю сопротивления.

- При соединении проводников разной толщины убедиться, что более тонкий проводник завернут вокруг более толстого, чтобы обеспечить равномерное распределение тока.

- Плотность скрутки должна быть достаточной, чтобы обеспечить прочное соединение, но не слишком плотной, чтобы не повредить проводники.

- Выравнивание проводников перед скруткой, которое обеспечит отсутствие перекрестных соединений и повреждений изоляции.

Хотя метод скрутки является популярным и надежным способом соединения проводников, в некоторых критических приложениях может потребоваться дополнительное использование других методов соединения,

таких как пайка или прессование.

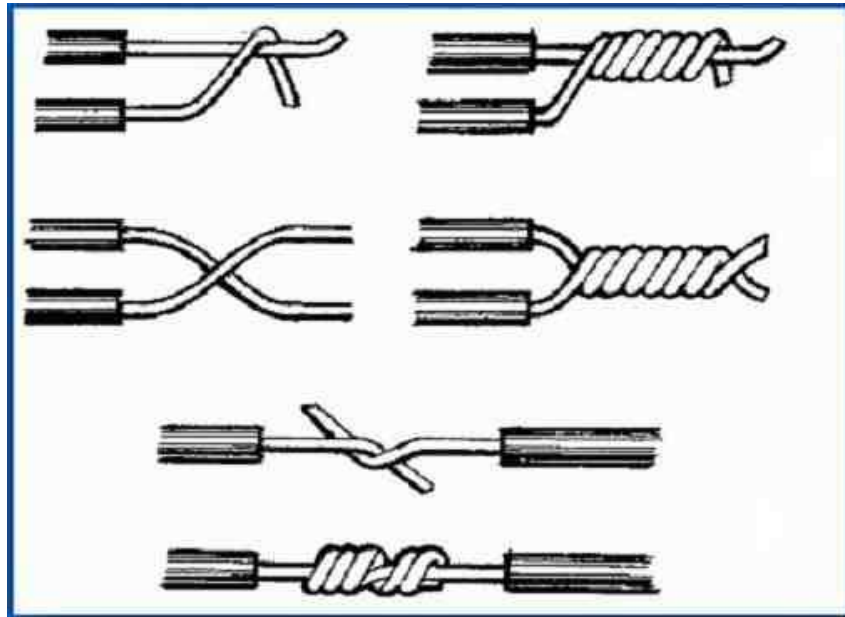


Рисунок 1.1 – Типы соединения проводников методом скрутки

Главной проблемой метода соединения проводников скруткой является пожароопасность ввиду невозможности обеспечения качества контактного соединения и возможности его контролировать. Качество контактного соединения напрямую зависит от усилия между проводниками, которое ослабевает в процессе эксплуатации из-за старения материалов и вибрации в сетях переменного тока, что может привести к нагреву контактного соединения и воспламенению изоляции (рис.1.2).



Рисунок 1.2 – Последствия большого переходного сопротивления при соединении проводников методом скрутки

Использование такого соединения крайне нежелательно из-за невозможности определения поведения качества контактного соединения в

процессе эксплуатации.

Болтовое соединение является так же распространённым способом соединения проводов, поскольку позволяет делать удобное разъемное соединение с контролем усилия сжатия (рис.1.3).

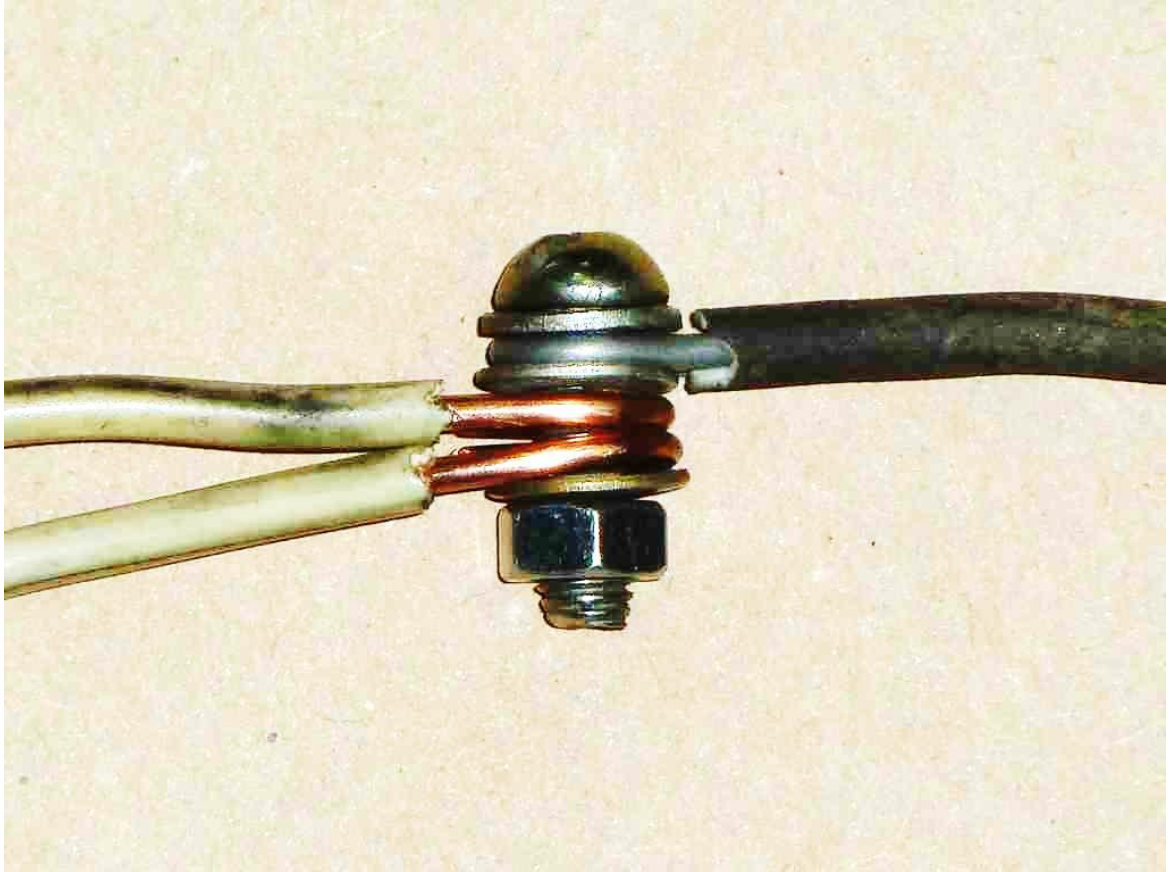


Рисунок 1.3 – Болтовое соединение проводников

Существует несколько правил при формировании болтового соединения.

1) Проводник должен иметь характерный изгиб по ходу направления вращения винта (рис.1.4). Это позволит сохранить качества контактного соединения при стягивании болта. В противном случае проводник будет неконтролируемо располагаться между шайбами.

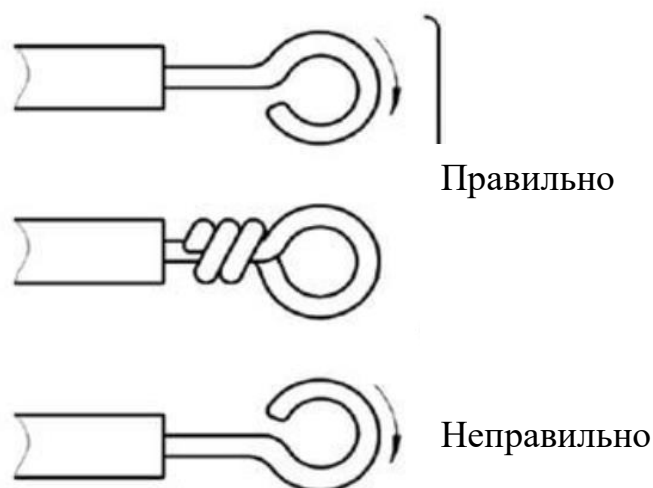


Рисунок 1.4 – Направление затяжки болта при соединении проводников

2) Проводники между собой должны быть разделены шайбами, что позволит обеспечить плоскостное соединение, с равномерным усилием по всей площади (рис.1.5).

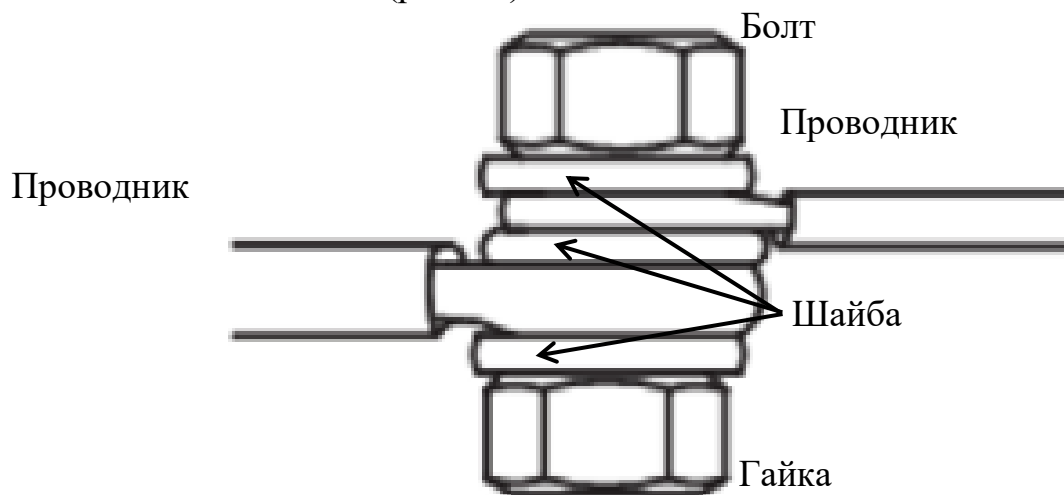


Рисунок 1.5 – Основные составляющие болтового соединения

3) Согласно правилам устройства электроустановок допускается соединение не более 3х проводников.

Соединение проводников клеммными колодками схоже с принципами болтового соединения, в котором прижимающей силой служит подпружиненная медная пластина (рис.1.6). В некоторых случаях в клеммную

колодку добавляют токопроводящую пасту, для снижения контактного сопротивления.



Рисунок 1.6 – Соединение проводников клипсами Wago

Такие соединения позволяют производить коммутацию намного быстрее, а также в связи с новыми требованиями ПУЭ и запретом на скрутки такие соединения являются самыми популярными.

Одной из особенностей клеммных колодок является возможность соединения проводников разного сечения.

Для увеличения надёжности соединений и унификации на соединяемые проводники надевают наконечники, которые бывают разных размеров (рис.1.7).



Рисунок 1.7 – Типоразмеры наконечников

Наконечники имеют плоскую контактную площадку для уменьшения контактного сопротивления и отверстие в середине площадки для возможности соединения болтом. Наконечники позволяют соединять кабели любого диаметра в любом сочетании. При необходимости соединить медный кабель с алюминиевым используют специальные наконечники, у которых одна часть медная, а другая алюминиевая. Также возможен вариант, при котором между наконечниками прокладывается шайба, латунная или медная лужёная.

Наконечник можно как запрессовать проводником, так и напаять. Паяный наконечник обладает лучшей электропроводностью, но значительно снижает скорость электромонтажных работ. Также пайка наконечников требует применения сложного основного и вспомогательного оборудования.

Помимо наконечников широкое применение находит простая опрессовка проводников. Это способ, при котором на соединяемые провода или кабели одевается медная или алюминиевая гильза, после чего опрессовывается специальным опрессователем (рис.1.8). Для тонких гильз используют ручной опрессователь, а для толстых - гидравлический. Этим

способом можно даже соединять медные и алюминиевые провода. В зависимости от местных условий кабели можно сложить концами в одну сторону или встречно. На надежность соединения это не влияет.

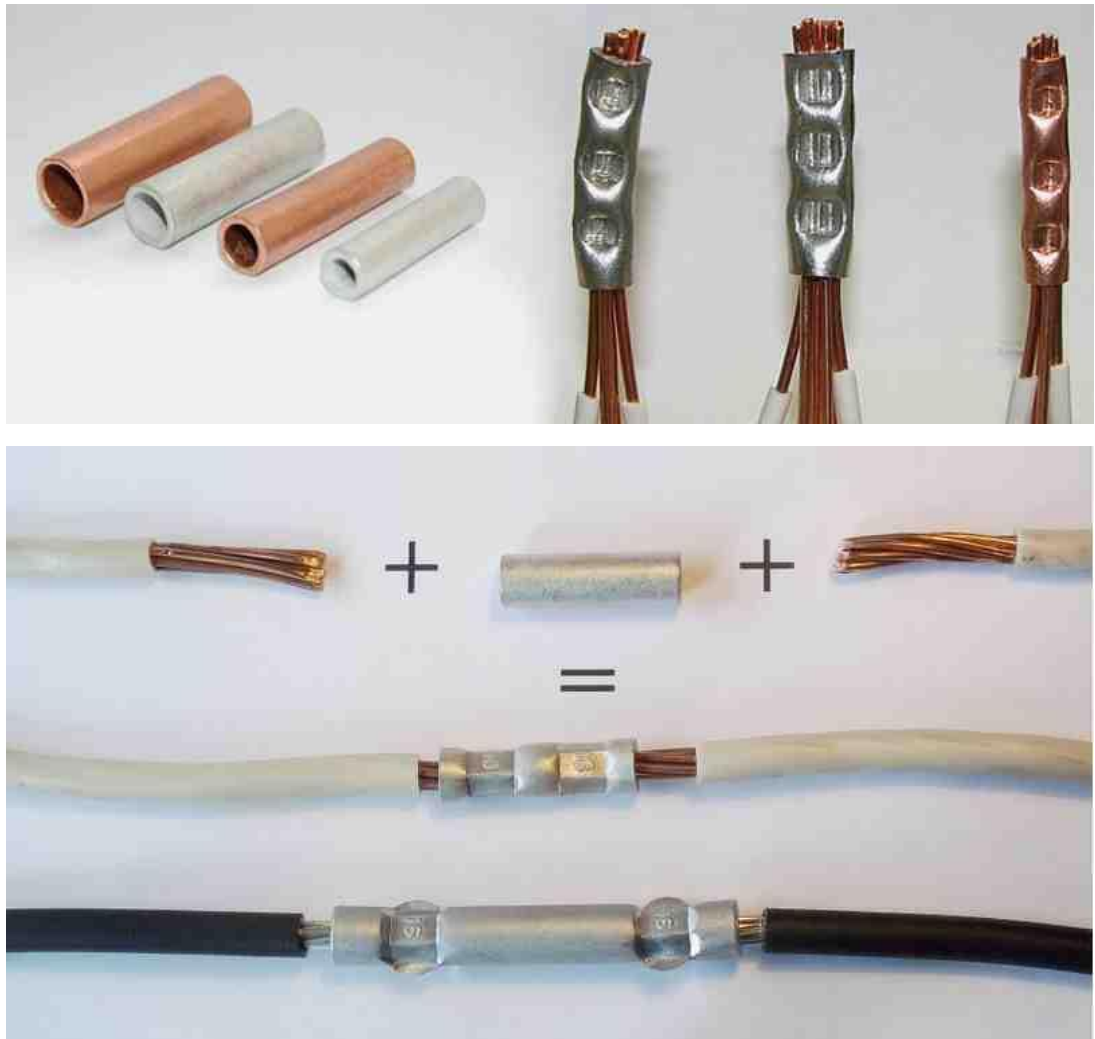


Рисунок 1.8 – Соединение проводников гильзами

Достоинством этого способа является то, что он позволяет соединять провода разного сечения и из разных материалов, что затруднительно при других способах соединения.

Аналогичными свойствами обладают соединения посредством муфт (рис.1.9). При сложных условиях внешней среды, при прокладке кабелей в земле, воде или под дождем обычные методы соединения не подходят. Для обеспечения надежности соединения и обеспечения герметичности применяют специальные соединители – муфты.

Муфты бывают в металлическом и пластиковом исполнении, заливные

и термоусаживаемые, высоковольтные и низковольтные, малогабаритные и обычные.

Такой вид соединения является самым сложным и требует высокого уровня профессиональной подготовки исполнителей. Ответственные соединения проводников осуществляют на специализированном заводе.

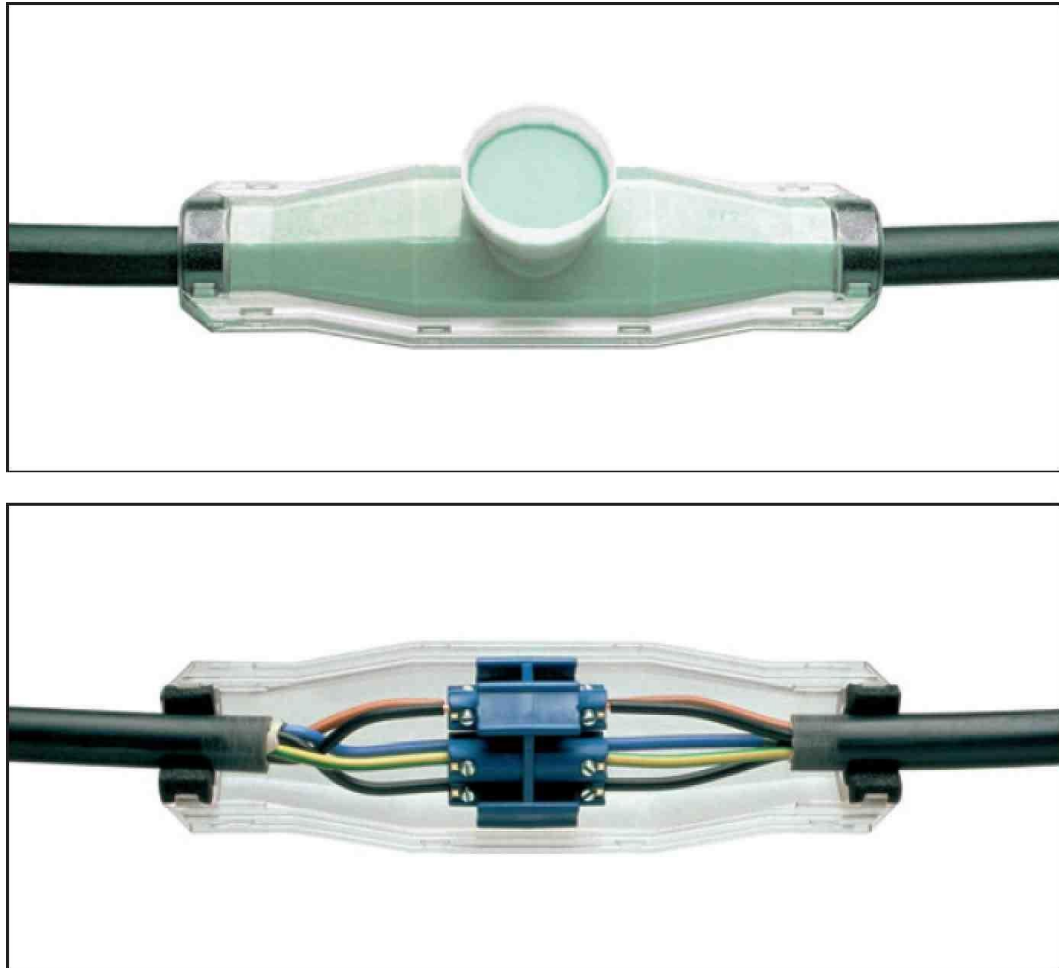


Рисунок 1.9 – Соединение проводников муфтой

1.2. Типы изоляций

В производстве кабелей используют множество текстур и материй, обладающих способностью к изоляции. Основным свойством изолирующего покрытия признается полная неспособность проводить электрический ток.

Примерами такого покрытия служат:

- резиновое;
- ПВХ;
- полиэтиленовое;
- фторопластовое;
- бумажное;
- шелковое;
- полистироловое.

Менее популярным изолятором служит окись магния. В зависимости от особенностей кабеля, его конструкции и эксплуатируемого сетевого напряжения, подбирается тип изолирования:

- оболочные и безоболочные кабели с показаниями постоянного напряжения до 700 В, переменным током 220 В для однофазных и 380 В для трехфазных сетей;
- оболочные и безоболочные кабельные системы с постоянным напряжением в диапазоне 700-1000 В, переменным 220-400 В;
- кабеля с постоянным напряжением 3600 В, переменным от 400 до 1800 В;
- кабеля с постоянным напряжением 1000-6000 В, переменным 400-1800 В.

Информация о видах изоляции с учетом их особенностей и специфики применения поможет максимально использовать потенциал кабелей в производстве.

Изоляцию также различают по агрегатному состоянию окружающей среды, позволяющей повышать пробивное напряжение:

- Жидкая;
- Твердая;
- Газообразная.

1) Жидкая изоляция

Жидкая изоляция проводников - это процесс нанесения специальной жидкой смеси на поверхность проводников для обеспечения электрической

изоляции и защиты от внешних воздействий. Жидкая изоляция широко применяется в электрической индустрии, особенно при производстве проводов и кабелей.

Одним из основных компонентов жидкой изоляции проводников являются полимерные материалы. Эти материалы образуют пермеабельную пленку на поверхности проводника, предотвращая проникновение влаги и ионов в проводник, а также электростатическое взаимодействие с окружающими объектами. Это способствует сохранению электрической изоляции и предотвращению возникновения короткого замыкания.

Жидкая изоляция проводников может быть основана на разных типах полимерных материалов, таких как эпоксидные смолы, полиимиды, силиконы и полиуретаны. Эти материалы обладают высокой электрической изоляцией и термической стабильностью, что делает их идеальными для защиты проводников в различных условиях эксплуатации.

Процесс нанесения жидкой изоляции на проводник может осуществляться различными методами, включая покрытие, погружение или распыление. После нанесения жидкая изоляция отвердевает, образуя тонкую, однородную и электрически устойчивую пленку на поверхности проводника.

Помимо электрической изоляции жидкая изоляция проводников также может обеспечивать защиту от механических повреждений, снижение электромагнитных помех и улучшение общей надежности и долговечности проводников. Она также может быть дополнительно обработана для улучшения ее свойств, таких как устойчивость к огню, водоотталкивание и химическая стойкость.

Положительные свойства покрытия:

- высокая стойкость к внешним, неблагоприятно влияющим факторам;
- способность к диэлектрическому покрытию;
- устойчивость к вибрации;
- способность переносить воздействие ультрафиолетовых

излучений;

- легкость в применении ремонтных работ;
- пластичность и укывистость провода в труднодоступных местах

и сгибах.

Недостатки изоляции:

- токсичность;
- высокая стоимость;
- летучесть жидкости, что приводит к высокому расходу

материалов.

Характеристики жидкой изоляции:

- субстанция представляет собой вязкое, тянущееся вещество;
- выпускается в трех видах — в тубике, банке и в виде спрея;
- нанесение производится кистью, за исключением распылителя.

Менее экономичный по расходу спрей-изолятор. Однако он способен проникнуть в самые труднодоступные места. Тубик позволит более дозированно расходовать материал без применения дополнительных приспособлений. Банка со средством подойдет в массовом использовании.

2) Твердая изоляция

Твердая изоляция проводников – это технология, которая включает в себя применение специальных твердых материалов для обеспечения электрической изоляции и защиты проводников от нежелательного контакта с окружающими поверхностями, а также от воздействия влаги, пыли и других вредных факторов. Твердая изоляция проводников имеет широкое применение в различных областях электротехники и электроэнергетики.

К основным видам твердой изоляции относятся:

- Бумажная обмотка.

Ленты из хлопчатобумажной основы пропитываются жидкими составами диэлектриков — маслами, после чего производится плотная обмотка кабеля. Преимуществами данного вида признаны долговечность применения, низкая стоимость и способность противостоять сырым грунтам и

высокой влажности. Из недостатков выявлено смещение жидкости при вертикальном и наклонном положении кабеля. Данная деформация неизменно приводит к износу и потере диэлектрических способностей;

- Резиновые диэлектрики.

Такой способ изоляции гарантирует гибкость кабеля, полную непроницаемость влаги и среднюю износостойкость. Минусами признаны невысокая температурная граница применения (не более 65 °С), высокая стоимость и потеря эластичности со временем;

- Пластмассовая изоляция.

В качестве основы используют полиэтилен, полихлорвинил и сшитый полиэтилен. Плюсы такого вида покрытия — расширенный диапазон рабочей температуры, экологичность, повышенная устойчивость к влаге, пропорциональность прочности и веса, нейтральность химического и электрического типа, устойчивость к механическим повреждениям. Недостатки — деформация при температуре свыше 140 °С;

- ПВХ.

Преимущества данного вида изоляции в высоком сопротивлении к деформациям, экологичность, небольшие потери при допустимом токе нагрузки, оптимальность использования на сложных трассах ввиду небольших диаметров и массы. Из недостатков выявлена низкая устойчивость к минусовой температуре (не более –60 °С) и ультрафиолетовым излучениям;

- Шелковая обмотка, аналогичная бумажной, пропитываемой специальными маслами.

Прочность материала гарантирует высокую износостойкость. Однако воздействие температур губительно для такой изоляции. В результате обмотка шелком нашла себя лишь во внутренних трассах и конструкциях кабеля в помещениях с постоянной температурой.

Важно отметить, что выбор подходящего материала для твердой изоляции проводников зависит от конкретных условий эксплуатации, требований к проекту и типу используемого оборудования. Проектировщики

и инженеры должны учитывать электрические, механические и термические характеристики материалов, чтобы обеспечить оптимальную производительность и безопасность системы.

В целом, твердая изоляция проводников является неотъемлемым элементом в электротехнике, обеспечивая защиту проводников, предотвращение повреждений и обеспечение безопасной работы электрических систем. Это важный фактор, который способствует эффективной и надежной передаче электрической энергии и сигналов в различных областях применения

3) Газообразная изоляция

Газообразная изоляция – это техника, которая использует газообразные среды для создания электрической изоляции и защиты электрических проводников от внешних воздействий. Газообразная изоляция широко применяется в высоковольтных системах и устройствах, таких как газоизолированные высоковольтные ключи, трансформаторы и генераторы.

Одним из основных газов, используемых в газообразной изоляции, является серафгекс (SF₆). Этот газ обладает высокой электрической прочностью и хорошей теплопроводностью, что делает его эффективной изоляцией для высоковольтного оборудования. Кроме того, SF₆ имеет высокую стойкость к электрическим дугам и огнеупорность, что способствует безопасности и надежности системы.

Газообразная изоляция обеспечивает электрическую изоляцию путем создания диэлектрического слоя вокруг проводников, предотвращая протекание электрического тока и короткое замыкание. Она также обеспечивает защиту от влаги, грязи и агрессивных веществ, поддерживая электрическую стабильность и работоспособность системы в различных условиях эксплуатации.

Применение газообразной изоляции связано с определенными преимуществами. Во-первых, газы, используемые в газообразной изоляции, обладают хорошей термической стабильностью, что позволяет поддерживать

стабильные рабочие условия в системе. Во-вторых, газы являются невоспламеняемыми и нетоксичными, что способствует безопасности при использовании. Кроме того, газы обладают химической стабильностью и не подвержены химическим реакциям с окружающей средой.

Однако существуют и некоторые ограничения при использовании газообразной изоляции. В частности, необходимы специальные системы и оборудование для генерации и обработки газа, а также для обеспечения его распределения и контроля в системе. Кроме того, некоторые газы, такие как SF₆, являются парниковыми газами, что вызывает озабоченность в отношении их влияния на окружающую среду.

В целом, газообразная изоляция проводников является важной техникой, применяемой в высоковольтных системах, обеспечивая электрическую безопасность и эффективность работы. Дальнейшее развитие газообразной изоляции направлено на разработку новых газовых смесей или альтернативных технологий с меньшими негативными воздействиями на окружающую среду.

Преимущества данного вида диэлектриков заключаются в способности к охлаждению кабеля, снижению опасности взрыва. Недостатки — герметичность при использовании, вероятность окисления, приводящая к снижению электрической прочности.

Нагревостойкость изоляционных материалов

Одной из важнейших характеристик электроизоляционных материалов является их классификация по нагревостойкости. Эта классификация, нашедшая свое отражение в ГОСТ 8865—70, разработана на основе опыта эксплуатации и соответствующих испытаний, показывающих пригодность этих материалов для работы при температуре данного класса (рис.1.10). По определению нагревостойкость — это способность электроизоляционного материала или изоляции без повреждения и без существенного ухудшения важных практических свойств длительное время выдерживать воздействие повышенной температуры, а также резкие изменения температур. Снижение

таких механических свойств, как эластичность или появление хрупкости, обнаруживаются раньше, чем ухудшение электроизоляционных свойств.

Класс изоляции	Предельно допустимая температура	Краткая характеристика изоляционного материала
Y	90	Непропитанные волокнистые материалы из целлюлозы и шелка
A	105	Пропитанные волокнистые материалы из целлюлозы и шелка
E	120	Синтетические органические пленки
B	130	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами
H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами
C	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов

Рисунок 1.10 – Классификация изоляционных материалов

Различают длительную и кратковременную нагревостойкость.

Длительная нагревостойкость характеризуется максимальной температурой, с которой изделие, предназначенное работать в силовых установках, может эксплуатироваться в течение 20-30 лет, а изделие, предназначенное работать в радио- и электронной аппаратуре, может эксплуатироваться около 10 тыс. ч.

Кратковременная нагревостойкость характеризуется температурой, при которой изделие в четко определенных условиях может работать в течение некоторого ограниченного и заранее обусловленного времени.

Изменения, происходящие в изделиях под действием повышенной температуры, могут быть различные. Определение нагревостойкости изделий весьма сложная задача, так как она не может быть решена исследованием влияния температуры только на одну из характеристик изделия. Она может быть определена лишь комплексными испытаниями, выбор параметров последних зависит от условий, при которых будет эксплуатироваться изделие, и применяемых материалов для его изготовления.

При определении нагревостойкости изделий наблюдают за изменением характеристик, определяющих надежную работу этих изделий, в результате воздействия повышенных температур. К таким характеристикам относятся: электрическая прочность, тангенс угла диэлектрических потерь, сопротивление изоляции, емкость, деформация изделия под влиянием механических усилий, возгорание и т.п.

Изоляционные и кабельные изделия могут быть отнесены в соответствии с ГОСТ 8865—70 к следующим классам длительной нагревостойкости (табл. 9.2).

Кратковременная нагревостойкость зависит не только от вида применяемых материалов в изделии и требуемого срока службы, но и от условий монтажа и эксплуатации.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) откорректировала методы оценки нагревостойкости и заменила понятие «класс нагревостойкости электроизоляционных материалов» понятиями «диапазон нагревостойкости» и «температурный индекс».

Температурный индекс (ТИ) — это число, соответствующее максимальной температуре в градусах Цельсия, взятой из «кривой жизни», при которой ресурс материала по данному конкретному свойству составляет 5 или 20 тыс. ч.

1.3. Виды контроля контактных соединений

В промышленности нашли широкое применение два основных метода контроля постоянных соединений, которые чаще всего используются в комбинации: деструктивный (селективный) контроль качества в зависимости от прочности разделения и характера остаточного разрушения соединения и неразрушающий метод визуального контроля - отказ от контактов, в которых возможно нарушение сплошности контакта в соответствии с результатами визуального контроля. Подход с такой стороны недостаточен для мониторинга процесса установки межкомпонентных соединений и прогнозирования их

надежности из-за низкого содержания информации [1].

Деструктивный контроль предполагает проведение операций на исследуемом объекте, после чего его дальнейшее применение по прямому назначению невозможно. К деструктивным воздействиям относят усилие на разрыв, разрез по линии контроля для проведения исследования качества внутренней структуры, влияние агрессивных веществ и сред, повышенное напряжение [2, 3]. На рисунке 1.11 показаны фотографии электрических контактов, прошедшие метод разрушающего контроля.

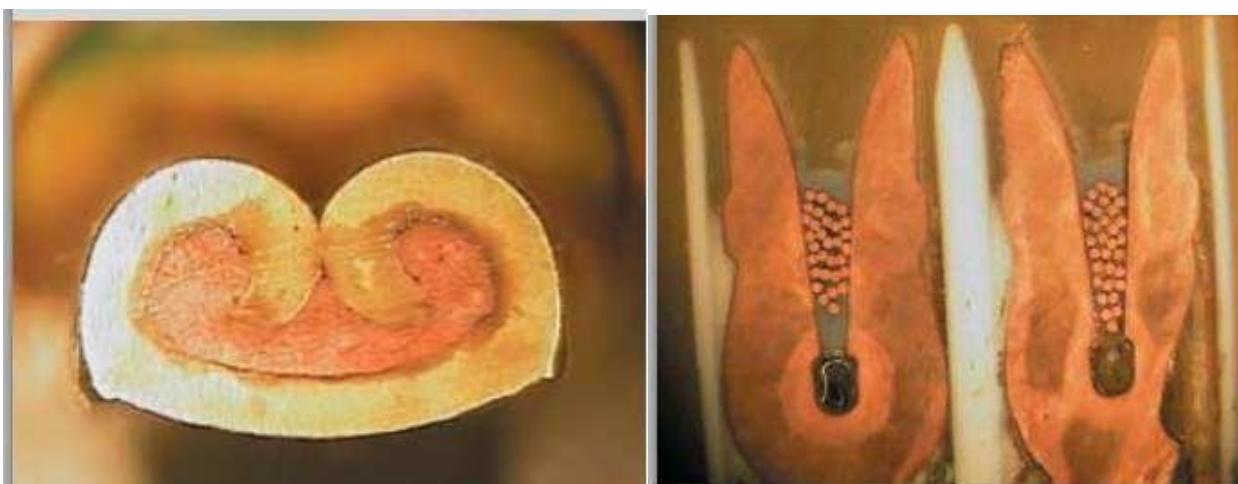


Рисунок 1.11 – Соединения, подвергшиеся методу разрушающего контроля

Имея в виду специфику образования соединений методом пайки, контакты подвергаются, в основном, неразрушающему контролю. Неразрушающий контроль обладает принципом обратимости и воплощается методами наблюдения, мониторинга, записи результатов и анализом способов и методов контроля.

Результат неразрушающего контроля зависит от множества факторов, таких как химический состав объекта контроля, механическое воздействие, структура кристаллической решетки и прочих. В зависимости от способа воздействия на объем, контроль делится на:

- Оптический;

- Акустический;
- Вихретоковый;
- Электрический;
- Тепловой;
- Метод проникающих веществ;
- Магнитный;
- Радиоволновой.

Каждый из данных методов нацелен на решение определенного круга вопросов, при этом все имеют как свои достоинства, так и недостатки. Рассмотрим методы, наиболее часто используемые для определения контактных соединений.

1.4.1. Визуальный контроль

Визуальный контроль – это метод неразрушающего контроля, который основан на визуальном осмотре и оценке поверхности или структуры материала с использованием человеческого глаза или оптических устройств. Этот метод предоставляет возможность обнаружить и оценить поверхностные дефекты, трещины, механические повреждения, неравномерность и другие аномалии, которые могут повлиять на качество или безопасность материала или конструкции.

Визуальный контроль обычно проводится квалифицированными инспекторами, которые осматривают поверхность визуально, исследуя ее на наличие дефектов. Инспекторы могут использовать различные инструменты и оптические устройства, такие как лупы, микроскопы, бинокли и эндоскопы, для улучшения видимости и выявления дефектов в труднодоступных местах.

Оценка и интерпретация результатов визуального контроля основывается на опыте и знаниях инспектора, который может определить существенность и потенциальные последствия обнаруженных дефектов. Некоторые из дефектов, которые могут быть обнаружены при визуальном контроле, включают трещины, покрытия, пузыри, коррозию, неровности и повреждения поверхности.

Визуальный контроль широко применяется в различных отраслях, включая производство, строительство и авиацию, для обеспечения качества, безопасности и соответствия стандартам. Он обычно является первым этапом неразрушающего контроля, так как он быстрый, недорогой и относительно простой в реализации. Однако, следует отметить, что визуальный контроль может ограничиваться только видимыми дефектами, и для более точной оценки внутренних дефектов или структуры материала могут быть необходимы дополнительные методы контроля [51].

Визуальный осмотр

Визуальный осмотр является самым часто встречаемым способом контроля. Рекомендуется при проверке неисправности электрической цепи обращать внимание на следующие особые факторы:

- Наличие неизолированного провода, который может привести к короткому замыканию как с нейтральным проводом, так и с другой фазой;
- Степень износа изоляции для недопущения несвоевременного разрушения изоляционного слоя и возможности возникновения короткого замыкания;
- Степень надежности крепления электрических контактов и соединений;
- Наличие неисправностей электрических цепей;
- Коррозию открытых токопроводящих частей;

После проведения контрольных мероприятий необходимо кратковременное периодическое включение и выключение напряжения питания. При периодическом включении и выключении необходимо обращать внимание на наличие искр и дыма, а также последствий выделения тепла. На рисунке 1.12 показаны примеры некачественных контактов, которые часто выявляются при визуальном осмотре.

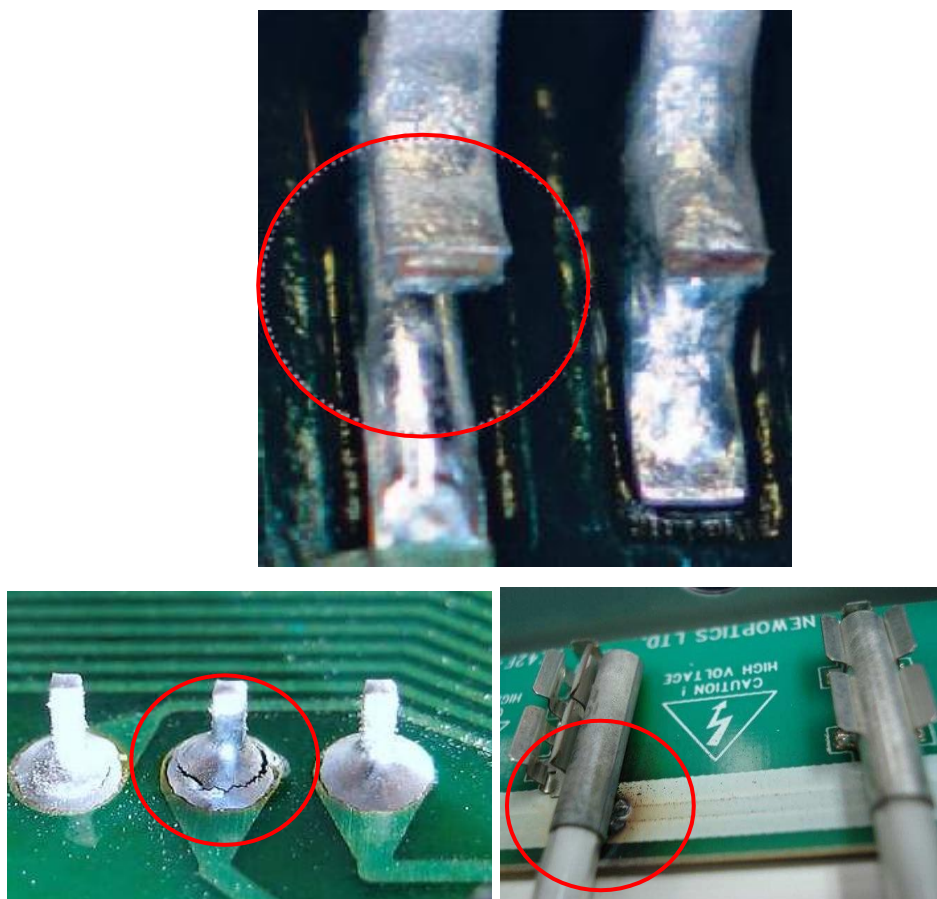


Рисунок 1.12 – Дефекты паяных электрических контактов

Органолептический метод (при использовании органов чувств) дает лишь субъективное понятие и позволяет определить лишь малую часть возможных причин аварий. Поскольку результат проверки зависит от квалификации персонала, проводившего проверку, то большое влияние оказывает человеческий фактор. Для уменьшения влияния человеческого фактора необходимо выработать методические рекомендации по проверке функционирования устройства, а также проводить систематическую, полную проверку [5].

1.4.2. Термоиндикация

Термоиндикаторный метод основан на химической реакции специальных составов, так называемых термондикаторов, которые изменяют цвет при достижении определенной температуры.

Специальные химические составы были открыты в 1888 году

Ф. Рейнитцером, австрийским ботаником.

Долгое время термин «жидкие кристаллы» был под гнетом сомнений и презрений, по причине противоречия теории о трех состояниях вещества (твердое, жидкое, газообразное). Доказать существование «жидких кристаллов» удалось профессору Леману из университета Карлсруэ в Отто после многолетних исследований. После долгих усилий в 1968 г. американским учёным удалось создать принципиально новые химические составы (индикаторы). Такие индикаторы были очень дорогими из-за сложности получения сырья. В 1973 году под руководством Джорджа Грея группе английских химиков удалось заполучить относительно дешевые индикаторы из доступного и дешевого сырья. Именно эти устройства вызвали технологический прорыв в области термоиндикации химическими составами в различных устройствах.

Любое действие в электрической цепи сопровождается выделением тепла и чем его больше, тем выше вероятность возникновения возгорания изоляции или самого электрооборудования. Одной из причин несчастных случаев и электрических перегрузок является перегрев электропроводки. Для обнаружения мест возникновения нагрева применяются специальные химические вещества – термондикаторы, которые при достижении определенной температуры изменяют свои физические свойства. Индикаторы изготавливают в виде специальных стикеров нужного размера. Их можно наклеивать на любую поверхность, в том числе на изогнутую, сферическую и цилиндрическую. Также термоиндикаторы могут быть представлены в виде лакокрасочного покрытия, которое наносят на потенциально ненадежные участки для последующего определения факта превышения температуры.

Тепловая индикация позволяет быстро выявить и устранить неисправную зону, если она доступна для оперативного контроля и не требует проведения специальных мероприятий по обеспечению безопасного доступа к электроприборам.

Недостатком данного вида индикации мест нагрева является

невозможность определения причин возникновения нагрева и служит только для постфакторного анализа. Кроме того, покрытие термоиндикаторами токоведущих частей может послужить причиной для создания условий, при которых возникнет аварийная ситуация. В связи с чем не рекомендуется нанесение термоиндикаторов на токоведущие части, а лишь на близлежащий объект, что может исказить данные о нагреве контактов.

1.4.3. Тепловидение

Тепловизоры гражданского назначения впервые были разработаны в НПП «Исток» в 70-х годах прошлого века. После этого началось серийное производство тепловизоров сканирующего типа. К моменту распада СССР производство тепловизоров было поставлено на поток, в котором выпускались все различные виды тепловизоров [15].

Военная промышленность начала применять тепловизоры в 70-х годах для авиационных оптических локационных станций (ОЛС) [16, 17]. К концу 80-х годов первые серийные тепловизоры стали устанавливаться и на танках [18].

В настоящее время тепловидение электрооборудования и электрических сетей очень популярно. Этот способ контроля позволяет выявить дефекты, а также информирует о производительности и предаварийных ситуациях. Преимущества способа в том, что для мониторинга электрооборудования не нужно прерывать работу, нет необходимости прикасаться к электрооборудованию, находящемуся под напряжением, или использовать другие контактные методы измерения. Применение тепловизоров целесообразно для проведения контрольных мероприятий на высоковольтном оборудовании из-за высокой вероятности поражения электрическим током. Все чаще тепловизоры и пирометры применяются и на более безопасных объектах по причине высокой скорости контроля. На рисунке 1.13 приведены примеры мониторинга электрических сетей и обнаружения дефектов в виде плохого контакта с завышенной температурой. [9].

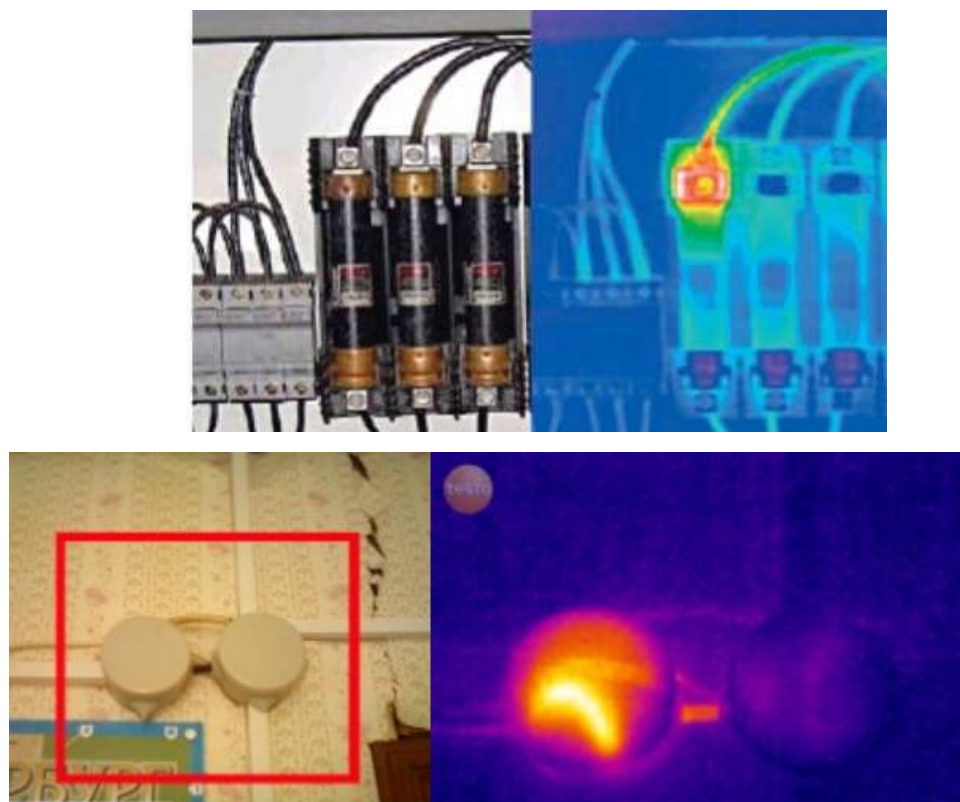


Рисунок 1.13 – Обнаружение нагрева электрических соединений и проводки

Получение инфракрасного изображения с помощью тепловизора позволяет захватывать нагретый объект и определять его местоположение. Тем не менее невозможно получить информацию о том, почему этот объект нагревается, поэтому неясно, что нужно сделать в результате, какие действия предпринять, чтобы устранить этот нагрев. Температура объекта определяется процессами генерации и отвода тепла от него, поэтому вполне возможно, что нагрев происходит в результате нормальной работы устройства и не вызван аварийным состоянием.

1.4.4. Фотоакустическая микроскопия

ОПТОАКУСТИКА (фотоакустика) - явление преобразования энергии оптического излучения в акустическую энергию при взаимодействии модулированного электромагнитного излучения с твёрдыми телами, жидкостями или газами. Оптоакустика также обобщает разнообразные

практические приложения, основанные на использовании фотоакустических явлений.

Основными механизмами возникновения акустических волн под действием света являются квадратично-нелинейные по оптическому полю эффекты: электро- и магнитострикция, тепловой эффект, давление света. При действии мощного лазерного излучения на вещество появляются дополнительные, весьма эффективные механизмы генерации звука. Они связаны с возможными фазовыми переходами и, в частности, с изменением агрегатного состояния среды. Эффект генерации акустических волн в замкнутом объеме газа под действием солнечного света, модулированного вращающимся перфорированным диском, обнаружен в 1880 г. А. Г. Беллом. Эффект получил название Фотоакустического (оптоакустического) эффекта; для его наблюдения Белл использовал устройство, названное им спектрофоном. В 1881 это открытие было подтверждено в работах Дж. Тиндаля и В. К. Рентгена.

В 1962 г. Р. Уайт (США) и А. М. Прохоров с сотрудниками (независимо друг от друга) обнаружили эффективное возбуждение звука в конденсированной среде под действием лазерных импульсов. Наиболее востребованным механизмом лазерной генерации звука является тепловой эффект.

При тепловом эффекте амплитуда акустической волны в облучаемой среде определяется объемной плотностью вложенной энергии, умноженной на так называемый параметр Грюнайзена.

Методы спектроскопии рассматриваются как разновидность калориметрической спектроскопии и широко применяются для исследования спектров поглощения света конденсированными и газообразными средами. Оптоакустическая спектроскопия конденсированных сред использует так называемые оптоакустические ячейки разнообразных конструкций.

При использовании современной лазерной техники метод прямой регистрации предполагает восстановление коэффициента поглощения света α

по данным амплитуды импульсного давления в цилиндрически расходящейся акустической волне конденсированных сред: варианты измерительных схем с прямой и косвенной регистрацией сигнала.

Схема с косвенной регистрацией допускает использование «нелазерных» источников упругих волн, схема проста в реализации и применяется в спектроскопии непрозрачных или сильно рассеивающих сред (например, промышленных жидкостей, порошков). Оптоакустическая спектроскопия газов является признанным методом детектирования газообразных и конденсированных примесей в атмосфере с чувствительностью, существенно превышающей чувствительность др. методов. Для генерации упругих волн в этом случае используется непрерывное модулированное по интенсивности излучение лазеров ближнего ИК-диапазона.

Для контроля паяных соединений используется фотоакустическая микроскопия, которая успешно развивается благодаря высокому содержанию информации, отсутствию значительного влияния на образец, однозначности и воспроизводимости получаемой информации, что полностью отражает физическую сущность контролируемых характеристик [9, 10].

Ряд дефектов в материалах и изделиях, связанных с разрывом (эмбриональные дефекты начальных стадий возникновения, включения, пустоты, трещины, неиспарение и т. д.), не всегда можно обнаружить с помощью существующих методов электронного, инфракрасного, рентгеновского исследования или микроскопии. Но они могут быть обнаружены в процессе изучения их теплофизических характеристик при воздействии на исследуемый образец интенсивно сфокусированного и модулированного электромагнитного излучения, в частности лазера. В этом случае в объекте возникают определенные физические процессы, которые могут служить источником информации о теплофизических свойствах [11]. На рисунках 1.14 и 1.15 показаны примеры дефектов, обнаруженных с помощью фотоакустической микроскопии [52].

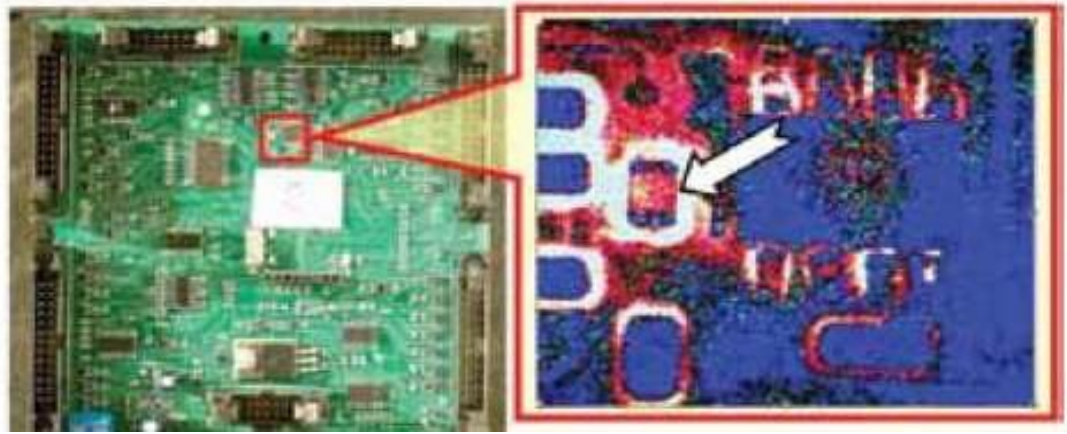


Рисунок 1.14 – Внешний вид печатной платы с SMD-элементами и лазерная фотоакустическая топограмма участка с некачественным (расслоившимся) чип- конденсатором

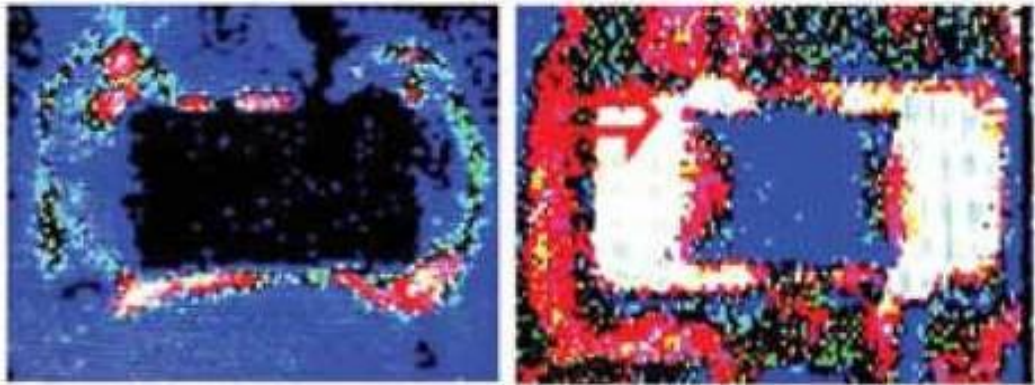


Рисунок 1.15 – Лазерные фотоакустические топограммы качественной пайки (слева) и некачественной «холодной» пайки (справа) чип-резистора

Использование описанного способа эффективно при контроле печатных сборок с высокой плотностью монтажа. К недостаткам данного способа относится тот факт, что необходимо обеспечить правильное разрешение и чувствительность, а это в свою очередь приводит к использованию дорогостоящего оборудования [53, 55]. В последнем случае контроль проводится в лабораторных условиях и требует демонтажа исследуемого объекта.

1.4.5. Рентгеноскопия

Наиболее распространенный метод контроля контактов является

рентгеновский контроль. Он позволяет определить большой объем дефектов, в том числе внутренних, что делает рентгеновский контроль незаменимым в обеспечении качества сложных сборных плат. В частности, рентгеновский контроль позволяет обеспечить высокое качество контроля паяных соединений между разъемами BGA и печатной платой. Ещё одним преимуществом является возможность встраивания рентгеновского контроля в технологический цикл для контроля изделий на этапе производства. На рисунке 1.16 показаны дефекты, обнаружить которые удалось с помощью рентгеновских лучей.

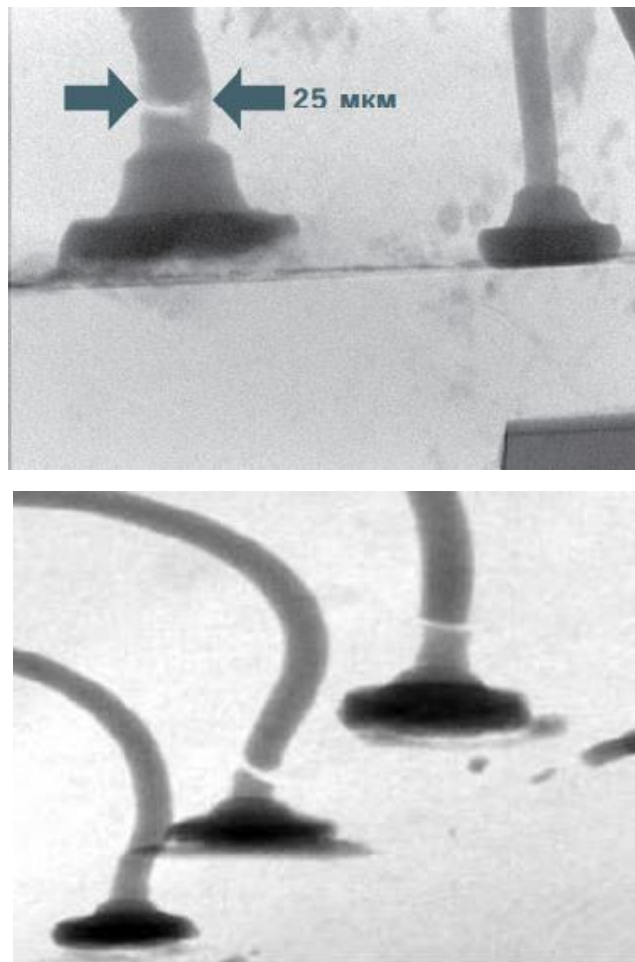


Рисунок 1.16 – Трещины в шариковом соединении золотой проволоки

При переходе на бессвинцовые технологии, связанные с высокими температурами пайки, появились новые типы дефектов, требующие использования рентгеновских систем с высокими техническими

характеристиками:

- разрешение более 1 мкм;
- геометрическое увеличение более 400 крат с углом обзора более 60 градусов;
- функция компьютерной томографии.

Рентгеноскопия является очень дорогостоящим методом диагностики и позволяет контролировать серийную продукцию, изготавливаемую на конвейере, либо при выборочном контроле, поэтому она используется главным образом при создании микрочипов. Контроль протяженных электрических цепей и контактов является очень длительным процессом, поэтому данный метод контроля не нашел широкого применения.

1.4.6. Прямые и косвенные методы контроля сопротивления контактов

Электрические методы позволяют контролировать электрические и физические параметры контакта и на основе оценки величины параметра делается вывод о качестве контакта, в отличие от визуального контроля, который основан на поиске дефектов в структуре контакта. Наиболее часто диагностика контактного соединения проводится путем измерения электрического сопротивления контакта (падения напряжения) или мониторинга температурного состояния контактных соединений [54].

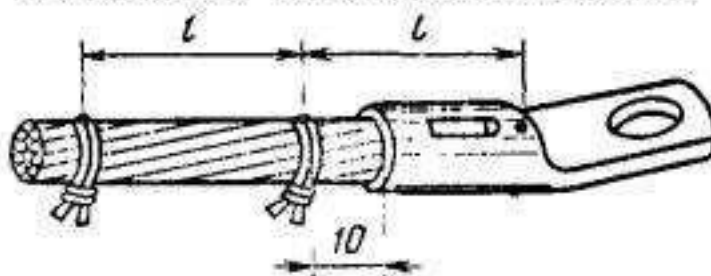
Прямой метод контроля сопротивления контактов

Для измерения сопротивления проводника применяют прямые и косвенные методы измерений. Наиболее простым и самым распространенным методом измерения сопротивления является прямой метод измерения с помощью омметра. Среди косвенных методов контроля сопротивления проводника можно выделить метод, заключающийся в измерении тока и напряжения на участке цепи (метод амперметра и вольтметра), и мостовой метод, заключающийся в сравнении измеряемого сопротивления с эталоном. При измерении низкоомного сопротивления возникает дополнительная погрешность, связанная с наличием контактного сопротивления в точках

подключения и сопротивлением проводов для подключения измерительного сопротивления. Для устранения этого недостатка используют четырехпроводное подключение. В основе метода лежит разделение измерительных проводов и проводов для подачи воздействия, т.е. используют две пары проводов: на первую пару подается воздействие (ток), а вторая используется для измерения напряжения. При этом оказывается, что контактные сопротивления и сопротивления проводов для подвода воздействия не включаются в измерительную схему.

При измерении электрического сопротивления соединения придерживаются рекомендаций ГОСТ17441-84, который определяет точки подключения измерительных приборов (рис.1.17). Однако в случаях, возникающих при проектировании изделий, сопротивление не измеряется. Сопротивление проводника измеряется на опорном сопротивлении (в целом сечение проводника равно условной длине l соединения, рис 1.7). Использование щупов с острыми иглами при измерении сопротивления изолированного проводника позволяет разрушить оксидную пленку и не учитывать ее влияние.

Оконцевание многопроволочной жилы



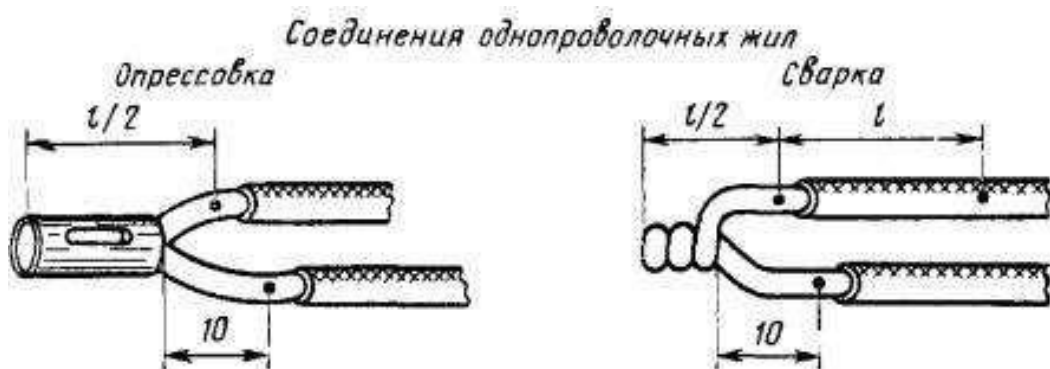


Рисунок 1.17 – Контактные соединения

При контроле сопротивления многожильных проводников в местах соединения измерительных (потенциальных) щупов необходимо обеспечить равномерное распределение тока по всем жилам. Для этого используют пайку, сплав, обжим гильзой или бандаж из двух-трех витков луженой медной проволоки диаметром (0,4 ... 1,5) мм [12].

В соответствии с ГОСТ 2933-83 сопротивление соединений может измеряться методом вольтметра-амперметра, микроомметром, одинарным или двойным мостами Уитстона. При использовании метода вольтметр-амперметр рекомендуется пропускать ток по измеряемому проводнику не более 30% от номинального значения. При этом измерения проводятся при температуре окружающей среды. Соединение считается прошедшим испытание, если среднее значение сопротивления образца соответствует требованиям, представленным в таблицах 1.1, 1.2 [7, 56].

Таблица 1.1 – Начальное электрическое сопротивление контактных соединений с медными и латунными выводами по ГОСТ 21242 - 75

Диаметр штыря, мм	3	4	5	6	8	10
Контактное сопротивление, мкОм	80	50	30	26	16	14

Таблица 1.2 – Максимально допустимая температура контактных соединений при подаче номинального тока (длительно допустимая) в установках до 1000 В.

Характеристика соединяемых проводников	Температура нагрева, °С
1. Проводники из меди, алюмомеди, алюминия и его сплавов без защитных покрытий рабочих поверхностей	95
2. Проводники из меди, алюмомеди, алюминия и его сплавов с защитными покрытиями рабочих поверхностей благородными металлами	110
3. Проводники из меди и её сплавов без изоляции или с изоляцией классов В, F и H по ГОСТ 8865-87 с защитным покрытием рабочих поверхностей серебром	135

Несмотря на широкое распространение этого метода контроля, у него имеется существенный недостаток: невозможен контроль электрического контакта, расположенного в недоступном месте, например, в коаксиальном кабеле. Если сопротивление контакта больше допустимого значения, то его невозможно детектировать путем измерения общего сопротивления коаксиального кабеля.

Контроль сопротивления четырехзондовым способом

Для измерения удельного сопротивления контакта или произвольного электропроводящего материала и коэффициента Холла применяют метод Ван Дер Пау, при этом используется четырёхзондовый способ. При контроле образец должен иметь плоскую форму, и его толщина должна быть много меньше расстояния между измеряемыми контактами, расположенными по периметру изделия. Трёхмерное (обычное) удельное сопротивление определяется путем умножения двумерного удельного сопротивления на толщину проводящего слоя.

Измерение температуры контактов можно проводить электрическими термометрами сопротивления, полупроводниковыми термометрами

сопротивления, термоэлектрическими термометрами, оптическими пирометрами, радиационными пирометрами, фотоэлектрическими пирометрами, цветовыми пирометрами. При контроле контактными термометрами чувствительный элемент должен иметь хороший тепловой контакт с измеряемым объектом. Для этого очень часто чувствительный элемент приклеивают к объекту или плотно прижимают через теплопроводящую пасту. При использовании жидкостных термометров зона сосредоточения термометрического вещества плотно прижимается к объекту контроля и покрывается снаружи теплоизоляционным материалом.

В многоканальных устройствах контроля температуры используют несколько чувствительных элементов, которые поочередно подключаются к индикаторному устройству (милливольтметр или гальванометр). Каждый чувствительный элемент должен иметь калибровочную таблицу, по которой производится пересчет показаний индикатора в температуру. Для термопар градуировочная таблица представляет собой разность температуры между холодным и горячим спаями (температура перегрева). При определении абсолютной температуры к температуре перегрева прибавляют температуру холодного спая, это, как правило, температура воздуха в месте установки измерительного прибора.

В некоторых случаях для контроля контактных сопротивлений применяют электрические методы. При использовании электрических методов контроля обязательным условием является доступ к контакту. При контроле качества контактов на печатных платах одновременное проведение внутрисхемного и функционального контроля может дать большой эффект. Для этого необходимы системы с летающим зондом. Пример использования такой системы показан на рисунке 1.18.

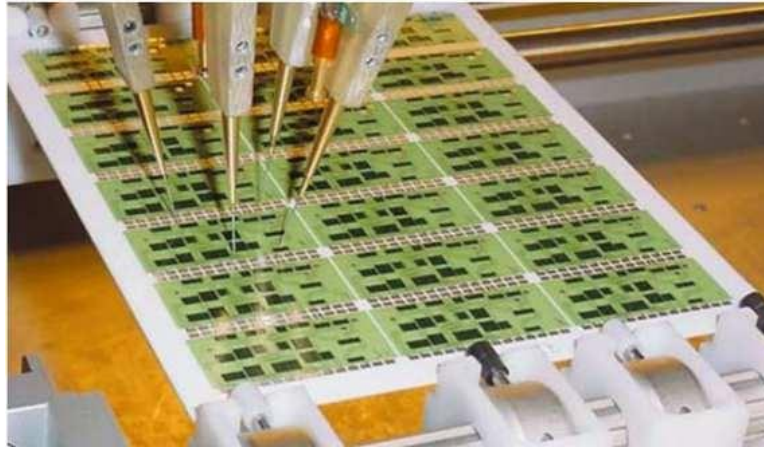


Рисунок 1.18 – Контроль контактов на печатной плате с помощью системы с летающим зондом

В некоторых случаях этот метод оказывается малоэффективным. Например, этим методом невозможно выявить дефекты в форме утончения проводника, которые практически не влияют на величину его полного сопротивления и, соответственно, их невозможно обнаружить путем измерения сопротивления.

Измерение коэффициента отражения

Принцип измерения коэффициента отражения (Γ) заключается в том, что тестовый импульс подается на вход схемы, и отражения из-за несоответствия импеданса характеристическому сопротивлению схемы записываются. Коэффициент отражения – это отношение напряжения отраженного сигнала к падающему сигналу, как показано в формуле (1.1):

$$\Gamma = \frac{U_{\text{отраженный}}}{U_{\text{падающий}}} = \frac{Z_K - Z_{\text{Ц}}}{Z_K + Z_{\text{Ц}}}, \quad (1.1)$$

где Z_K – импеданс исследуемого контакта, $Z_{\text{Ц}}$ – волновое сопротивление цепи.

Дистанционные (зондирующие, рефлектометрические) методы контроля электрических соединений используют принцип измерения

коэффициента отражения. Их применение особенно эффективно для выявления повреждений кабельных линий связи и систем электропитания. Эти методы являются перспективными и для выявления переходного сопротивления контактов, т.к. не нужен прямой доступ к контролируемым контактам для мониторинга их параметров. Теоретической основой методов зондирования является теория электромагнитных волн, распространяющихся в среде. Короткие импульсы электромагнитных волн (длительностью много меньше времени распространения по кабельной линии) вводятся в кабельную линию и распространяются по ней. С учетом малой длительности этого импульса в разные моменты времени он присутствует на разных участках линии. При отсутствии неоднородностей в линии (повреждений, ответвлений и т.д.) импульс доходит до конца линии без изменений. Если в линии имеются неоднородности (пробой изоляции между проводниками, плохой контакт и т.д.), то некоторая часть энергии электромагнитного импульса отражается и возвращается в начало линии, а оставшаяся часть проходит дальше. По времени прихода отраженного сигнала определяют расстояние до места нахождения препятствия. Таким образом, дистанционное зондирование способно определять расстояние (длину электрической линии) до проблемного места (муфта, кабельная вставка) и тип повреждения (короткое замыкание, обрыв, утечка, запутывание проводов и т. д.), используя данные о коэффициенте отражения.

Импульсные методы контроля нашли особенно широкое применение для поиска мест повреждений электрических сетей, кабельных и оптоволоконных линий связи [13-25]. Дальнейшее развитие этих методов связано с улучшением качества тестовых импульсов, приемом и алгоритмами обработки отраженных сигналов [26–30]. Теоретические основы и дальнейшее совершенствование импульсных методов контроля и диагностики были представлены отечественными учеными С.И. Баскаковым, Г.В. Глебовичем, И.П. Ковалевым, В.Л. Бакинским, А.П. Осадчим, Б.П. Богдановым, А.С. Воронцовым, М.С. Былиной, В.Н. Семеновым и другими, а также

зарубежными учеными А. Clunie (Англия) М. Turvey, W. Blohm (Германия), Paul Smith, Cynthia Furse, John Pickerd, Kan Tan, Joe Rowell Joel Dunsmore, Les Brabetz (США), Bernardo Celaya de la Torre (Канада) и другими.

Совершенствование импульсных методов предоставляет возможность для создания дефектоскопов-рефлектометров, сфера использования которых включает кабельные линии, печатные платы (ПП) [31 - 34]. Предложены способы использования коэффициента отражения для диагностики трещин в местах пайки и обнаружение зоны контакта на ПП [35–38]. Ряд отечественных компаний уже выпускают такие приборы (ОАО «Стелл», ЗАО «Эрстед», ООО «Связьприбор», ООО «Аналитик-ТС»), также можно отметить и зарубежных производителей (Tektronix, Rise Bond, Hewlett Packard (США), Vicotest (Англия) и др.).

1.4.7. Контроль контактного сопротивления термoeлектрическим методом

Сравнительный анализ существующих методов контроля большого переходного сопротивления (таблица 1.1) показал, что их всех объединяет одно: неспособность детектировать предаварийные и аварийные режимы в большом количестве различного рода контактных соединений в отсутствии оператора. На этом основании, был предложен метод, устраняющий существенные недостатки существующих методов контроля.

Таблица 1.1 Сравнительный анализ методов контроля

Метод / Показатель	Визуальный метод контроля	Метод термоиндикации	Тепловой неразрушающий контроль	Фотоакустический метод	Метод прямых и косвенных измерений	Метод термоЭДС
Индикация	-	+	+	-	-	+
работа без оператора	-	+	-	+		
Непрерывность мониторинга	-	-	+	-	-	+
Контроль предаварийного состояния	-	-	+	-	+	+
Установка средств мониторинга без демонтажа контактов	-	-	-/+	-	-	+
Способность работать без отключения потребителей	+	+	+	-	-	+
Универсальность метода	-	-	+	-	-	+
Возможность автоматизации процесса	+	-	-	+	+	+

Измерение сопротивления методом термоЭДС относится к косвенному методу измерению температуры и позволяет дистанционно получать сведения о температуре и возможном возгорании.

При протекании тока через проводник в месте соединения выделится тепло и по эффекту Зеебека [2] на концах этого проводника появится термоЭДС в виде постоянного напряжения, величина которого прямо пропорциональна разности температур контактов проводника [3]:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} [S_1(T) - S_2(T)] dT \quad (1.1)$$

где T_2 и T_1 - температура горячего и холодного контакта

соответственно, S_1 и S_2 коэффициенты Зеебека для первого и второго материала соответственно.

Если температура горячего и холодного контактов изменяются в небольшом интервале, можно считать изменение коэффициентов Зеебека линейным.

Величины термоЭДС, возникающих в контактных соединениях, варьируются от 1 мкВ до 15 мВ. Сложностью в определении термоЭДС является наличие помех, исходящих из самой сети. При этом помехи носят случайный характер, в то время как термоЭДС возникает в сети при появлении нагрузки.

Описание прибора на основе вышеописанного метода приведено ниже. Прибор может использоваться для предупреждения пожаров, возникающих в результате неисправности в электрической сети или электроустановке.

На рисунке 1.19 представлена схема для подключения прибора к электросети. Принцип работы прибора заключается в измерении термоЭДС, возникающей на контактном сопротивлении $R_{\text{конт}}$ при протекании тока в цепи. Для этого прибор подключается к вводным клеммам электроустановки. Контактное сопротивление $R_{\text{конт}}$ в месте соединения будет нагреваться, исходя из закона Джоуля-Ленца $Q=I^2 \cdot R \cdot T$ [7, 8]. При нагреве разнородных проводников в соответствии с эффектом Зеебека будет возникать термоЭДС, величина которой будет свидетельствовать о наличии проблемы в электропроводке. Величину термоЭДС можно использовать для расчета температуры контактного соединения и тем самым предупредить возникновение пожароопасной ситуации.

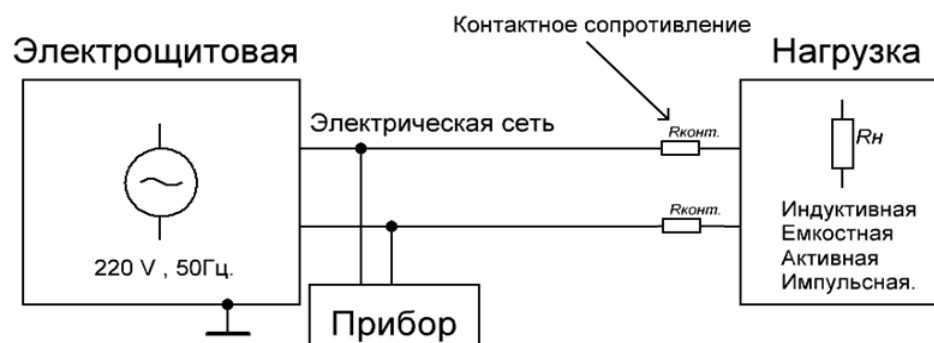


Рисунок 1.19 – Структурная схема мониторинга электросети

Таким образом, использование предложенного способа предупреждения пожара при неисправности в электрической сети или электроустановке позволяет повысить защиту людей, жилых, производственных и др. объектов от поражающего действия пожаров, а также обеспечит существенную экономию материальных и финансовых средств каждого гражданина и государства в целом.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ существующих видов соединений и типов изоляции показал, что обеспечить безопасность и долговечность контактного соединения невозможно в настоящих реалиях высокого технологического прогресса. Рост технологичности бытовых и промышленных процессов неуклонно приводит к росту количества контактных соединений и, следовательно, к росту числа их отказов при неизменной вероятности отказов. При этом доступные методы контроля имеют существенные недостатки, не позволяющие осуществлять контроль качества контактных соединений без перерыва в электроснабжении электрических установок.

Для решения данной проблемы необходимо разработать модель, описывающую процессы, протекающие в контактном соединении, и на основе предложенного метода провести исследования о возможности и достоверности определения мест возникновения большого переходного контактного сопротивления.

Разработке модели и исследованию методов определения термоЭДС от контактного сопротивления объектов будет посвящена следующая глава.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЯ КОНТАКТНОГО ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЭДС

Контактное сопротивление – это сопротивление, возникающее на границе соприкосновения двух проводников. При этом возникает контакт между двумя поверхностями проводников с некоторым сопротивлением, что приводит к возникновению силы сопротивления потоку электрического тока. Этот процесс включает несколько физических явлений.

1. Соприкосновение поверхностей: при притяжении проводников друг к другу создается контакт между их поверхностями. Соприкосновение поверхностей проводников важно для обеспечения электрического контакта и передачи тока.

2. Поверхностные искажения: на поверхностях проводников могут присутствовать неровности, окислы или загрязнения, что может вызывать местные повышенные сопротивления. Это может быть вызвано различными факторами, включая окружающую среду, временные условия или износ материалов.

3. Контактная область: при взаимодействии поверхностей проводников создается контактная область, которая может быть частичной или полной. Чем больше площадь контакта, тем меньше сопротивление на этом участке и тем выше эффективность передачи электрического тока.

4. Электрический контакт: когда проводники установлены в контакт, начинает протекать электрический ток, и возникает сопротивление потоку. Это связано с физическими явлениями, такими как диффузия электронов или ионов, электростатические и электромагнитные взаимодействия, а также сопротивлением материалов проводников.

2.1. Описание модели для исследования термоЭДС при контроле контактного сопротивления

Протекающий ток вызывает разогревание мест соприкосновения проводников из-за эффекта Джоуля-Ленца. Эта энергия может привести к дополнительному повышению температуры и изменению свойств материалов, что влияет на контактное сопротивление.

В итоге процесс контактного сопротивления при протекании тока подразумевает взаимодействие между поверхностями проводников, наличие поверхностных искажений и место контакта, а также возникновение электрического контакта и сопротивления потоку.

В общем случае качество контактного соединения характеризуется электрическим сопротивлением между двумя контактами R . При протекании тока через переходное сопротивление контакта на нем выделится тепло, и по эффекту Зеебека [36] появится термоЭДС в виде постоянного напряжения, величина которого прямо пропорциональна разности температур контактов проводника [37]:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} [S_1(T) - S_2(T)] dT \quad (2.1)$$

где T_2 и T_1 - температура горячего и холодного контактов (спая) соответственно; S_1 и S_2 коэффициенты Зеебека для первого и второго материала соответственно.

Если температура горячего и холодного контактов изменяются в небольшом интервале можно считать изменение коэффициентов Зеебека линейным и использовать более простое выражение:

$$E = (S_1 - S_2) * (T_2 - T_1), \quad (2.2)$$

Мощность, выделяемая на контактном соединении, можно определить из тока и сопротивления:

$$P = I^2 R \quad (2.3)$$

Из закона Джоуля — Ленца можно вычислить выделяемое тепло:

$$dQ = P \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt \quad (2.4)$$

где dQ — количество тепла; I — действующее значение силы тока, через проводник; R — контактное сопротивление; t — время, в течение которого протекает ток.

Выделяемое тепло распределится на две части, одна часть — это нагрев контактного сопротивления, что повышает его температуру, другая часть — это теплотери за счет конвекции и излучения. Тепло, нагревающее контактное сопротивление, можно найти из выражения:

$$dQ_1 = m \cdot c \cdot \Theta \quad (2.5)$$

где m — масса контакта; c — удельная теплоемкость материала контакта; Θ — превышение температуры контакта над температурой окружающей среды (перегрев):

$$\Theta = T - T_0 \quad (2.6)$$

где T и T_0 — температуры контакта и окружающей среды соответственно.

Теплотери контактного сопротивления на конвекцию и излучение за времени dt можно найти из формулы:

$$dQ_2 = K \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt = K \cdot S \cdot \Theta \cdot dt \quad (2.7)$$

где K – общий коэффициент теплоотдачи, учитывающий все ее виды; S – площадь поверхности охлаждения контакта.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 \quad (2.8)$$

Учитывая (2.4), (2.5) и (2.6) уравнение теплового баланса примет вид:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot \Theta + K \cdot S \cdot \Theta \cdot dt \quad (2.9)$$

где m – масса, c – удельная теплоемкость.

После преобразования, получаем:

$$\frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} = \frac{d\Theta}{dt} + \frac{K \cdot S}{m \cdot c} \cdot \Theta \quad (2.10)$$

Если изменение температуры проводника происходит в небольшом диапазоне, то можно считать, что R , c , K будут константами. Решение дифференциального уравнения (2.10) примет вид:

$$\Theta = A \cdot e^{-\frac{K \cdot S}{m \cdot c} \cdot t} + \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \quad (2.11)$$

где A – постоянная, определяемая начальными условиями.

Начальным условием является равенство температур контакта и окружающей среды при $t = 0$. Отсюда можно найти постоянную A :

$$A = -\frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \quad (2.12)$$

С учетом (2.12) выражение (2.11) примет вид:

$$\Theta = T - T_0 = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \cdot (1 - e^{-\frac{K \cdot S}{m \cdot c} \cdot t}) \quad (13)$$

Выражение (2.13) описывает зависимость температуры проводника от времени. Установившееся значение температуры наступает при $t = \infty$. Исходя из этого уравнение (2.13) примет вид:

$$\Theta_{t=\infty} = T_{t=\infty} - T_0 = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \quad (2.14)$$

где $T_{t=\infty}$ – установившаяся температура контакта; T_0 – температура окружающей среды; $\Theta_{t=\infty}$ – установившееся значение превышения температуры контакта над температурой окружающей среды.

Пример изменения температуры проводника приведен на рис.2.1.

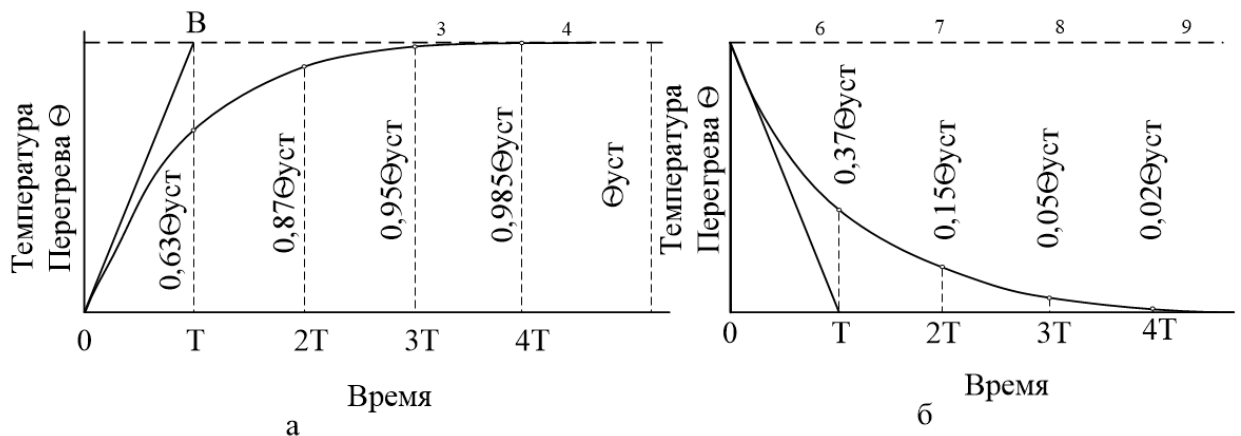


Рис. 2.1 – Зависимость температуры перегрева типового электрооборудования от времени, а - процесс нагрева, б - процесс охлаждения

Умножив левую и правую части уравнения (2.14) на $(K \cdot S)$, получим:

$$I^2 \cdot R = K \cdot S \cdot (T_{t=\infty} - T_0) \quad (2.15)$$

Анализ уравнения (2.15) позволяет сделать вывод о том, что установившийся режим характеризуется свойством отдавать в окружающую среду все выделяющееся в контакте тепло.

Обозначим $\tau = \frac{m \cdot c}{K \cdot S}$ и подставим в уравнение (2.13), после этого получаем:

$$\Theta = T - T_0 = \Theta_{t=\infty} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.16)$$

Переменная τ называется постоянной времени нагрева. Она определяется делением теплопоглощающей способности тела на его теплоотдающую способность и зависит от площади поверхности, массы, удельной теплоемкости материала и коэффициента теплоотдачи. Исходя из анализа уравнения (2.16), можно сделать вывод, что установившееся значение перегрева наступит через очень длительное время. Однако, для практических применений это время выбирают равным 3τ . Это время соответствует температуре перегрева порядка 90 % от максимального значения $\Theta_{t=\infty}$.

Постоянную времени нагрева простых токопроводящих конструкций определяют аналитически. Определение постоянной времени нагрева сложных аппаратов и машин осуществляется тепловыми испытаниями и последующем расчете на основе полученных данных, путем построения подкасательной к кривой нагрева. В качестве примера на рис. 2.1.а построена подкасательная линия ОТ к кривой нагрева. Касательная к кривой нагрева, проходящая через начало координат, характеризует скорость нагрева проводника при отсутствии теплоотдачи (линия ОВ на рис. 2.1.а).

Для большой плотности тока и быстром нагреве постоянную времени нагрева можно рассчитать по приближенному выражению:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{K \cdot S - \theta}, \text{ сек} \quad (2.17)$$

При условии нагрева проводника без потерь тепла на конвекцию и излучение уравнение нагрева примет вид:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot d\theta. \quad (2.18)$$

При этом зависимость температуры превышения над начальным значением от времени будет носить линейный закон:

$$\theta = \frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} \cdot t \quad (2.19)$$

Если в уравнении (2.19) вместо t использовать постоянную времени нагрева τ , то температура проводника при отсутствии теплоотдачи будет:

$$\theta_{t=\tau} = \frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} \cdot \tau = \frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} \cdot \frac{m \cdot c}{K \cdot S} = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S}. \quad (2.20)$$

Следует отметить, что τ может варьироваться от нескольких минут для шин питания до нескольких часов для больших электроустановок.

После отключения тока нагрев проводника заканчивается и начинается процесс охлаждения. Уравнение охлаждения принимает вид:

$$m \cdot c \cdot d\theta + K \cdot S \cdot \theta \cdot dt = 0 \quad (2.21)$$

Зависимость температуры от времени при охлаждении контакта, проводника или электрического оборудования имеет вид:

$$\theta = \theta_{t=\infty} \cdot e^{-\frac{t}{\lambda}} \quad (2.22)$$

где $\theta_{t=\infty}$ — температура превышения над температурой окружающей среды.

Анализ рис. 2.1.б, позволяет сделать вывод о том, что характеристики охлаждения и нагрева одинаковы, но выпуклость у одной вниз, а у другой вверх.

Есть другой способ определения постоянной времени нагрева – это вычисление тангенса угла наклона касательной к кривой охлаждения в начальной точке и деление установившегося значения на тангенс угла наклона касательной.

Приведенная выше методика расчета процесса нагрева и охлаждения для проводника может быть использована и для расчета процесса нагрева и охлаждения другого электрооборудования. А полученные уравнения для однородных проводников можно использовать для практических расчетов.

2.2 Исследование влияния параметров контактных пар на возникающую термоЭДС

На возникающую термоЭДС в контактных соединениях влияют характеристики и параметры контактных пар, такие как масса, сопротивление, электропроводность, марка материала контактной пары и т.д. Их изменение может иметь как прямое, так и обратное влияние на величину и характер термоЭДС. Для определения влияния этих параметров контактного соединения на термоЭДС были проведены исследования на модели.

При моделировании масса контакта варьировалась от 1 до 3 гр, переходное сопротивление контакта варьировалось от 0,01 Ом до 1 Ом, ток, протекающий через контакт равен 10 А, удельная теплоемкость меди $\alpha = 385 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

Изменение массы

Исследование влияния параметров контактного соединения на возникающую термоЭДС осуществляется с целью понимания взаимосвязи между этими параметрами и величиной термоЭДС. Одним из важных параметров, который может оказывать влияние на термоЭДС, является масса контактного соединения.

Масса контактного соединения может влиять на термоЭДС по нескольким причинам:

1. Контактное сопротивление: изменение массы контакта может изменить контактное сопротивление между проводниками. При увеличении массы контактирующих поверхностей возрастает объем материала, через который проходит ток. Это может привести к увеличению контактного сопротивления и, как следствие, к изменению термоЭДС.

2. Площадь контакта: изменение массы контакта может влиять на площадь контакта между проводниками. Увеличение массы контакта может привести к увеличению площади контакта, что способствует лучшей

электрической связи между проводниками. Это может привести к уменьшению сопротивления и уменьшению термоЭДС.

3. Коррозия и загрязнения: масса контакта также может влиять на присутствие коррозии и загрязнений на его поверхности вследствие большей площади поверхности. Контакты, подверженные коррозии или загрязнению, могут иметь повышенное сопротивление, что может сказываться на термоЭДС контакта.

В целом изменение массы контакта оказывает влияние на термоЭДС контактного соединения путем изменения контактного сопротивления, площади контакта и наличия коррозии или загрязнений.

Для полного понимания влияния массы на термоЭДС были проведены теоретические исследования по измерению термоЭДС при изменении массы контакта. Зависимость температуры контактной пары от времени, при различных значениях массы (1 г., 2 г. и 3 г.) при сопротивлении 0,1 Ом показана на рис.2.2.

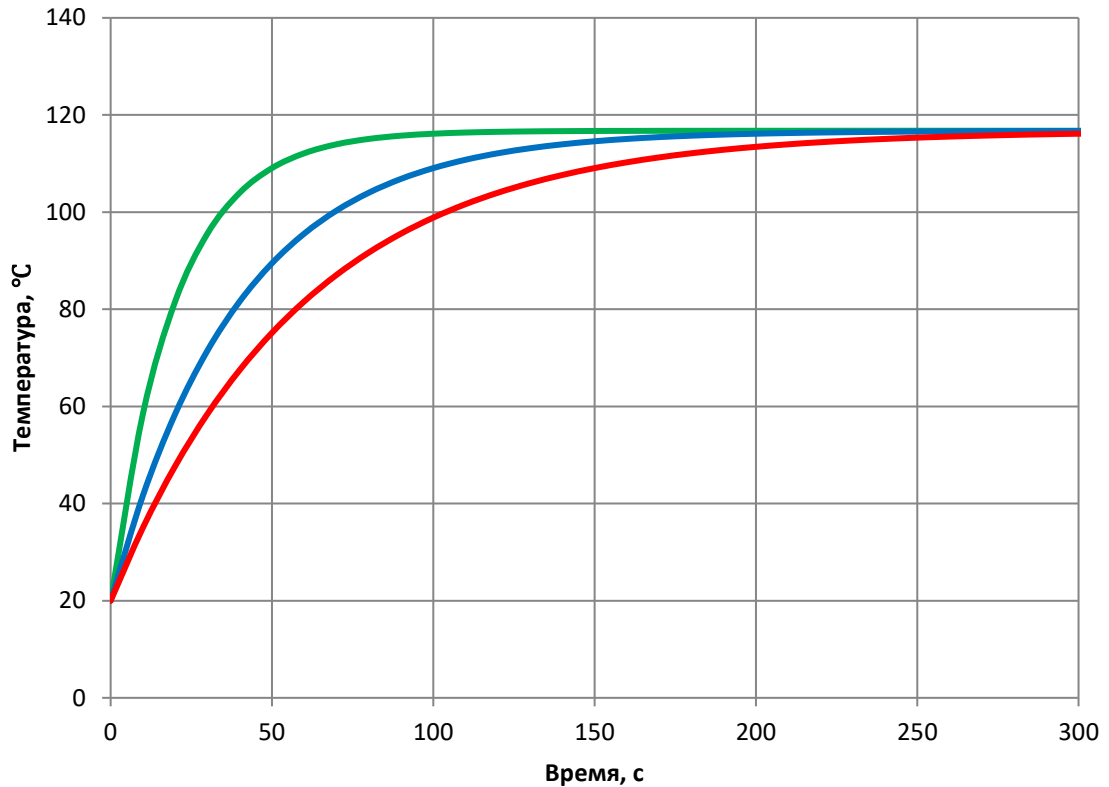


Рисунок 2.2 – Зависимость температуры контактной пары от времени, при различных значениях массы при сопротивлении равном 0,1 Ом:

— 1 г., — 2 г., — 3 г.

Из рис.2.2 видно, что в начальный момент времени идет рост температуры, обусловленный потерей мощности при протекании тока через контактное соединение, обладающее переходным сопротивлением. За счет небольшой разности температур конвекционная составляющая охлаждения не оказывает большого влияния на термодинамическую систему контактного сопротивления, при этом происходит нагрев всех элементов контактной пары.

Чем меньше суммарная масса контактного соединения, тем быстрее происходит процесс нагревания. Это обусловлено низкой теплоёмкостью, и, следовательно, для достижения максимальной температуры необходимо затратить меньше энергии.

Зависимость температуры контактной пары от времени, при различных значениях массы (1 г., 2 г. и 3 г.) при сопротивлении 1 Ом показана на рис.2.3.

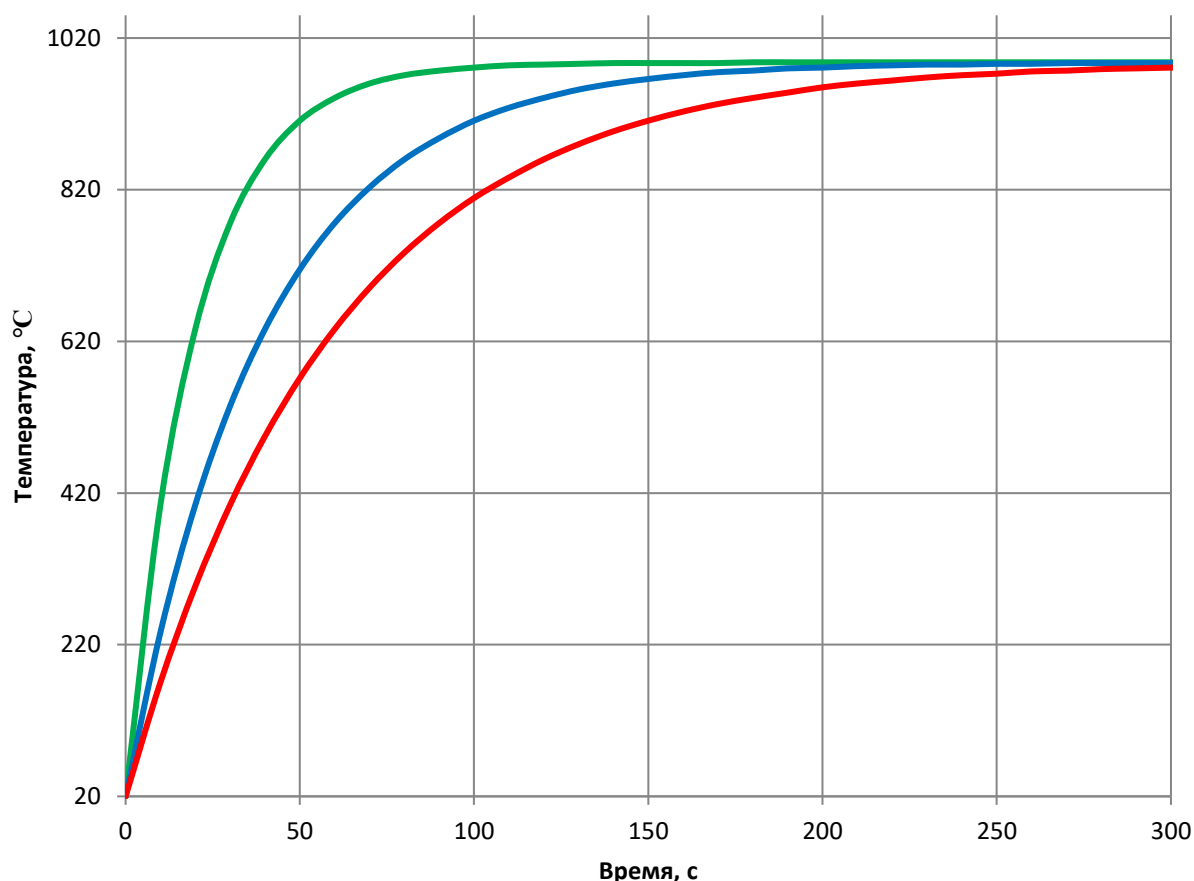


Рисунок 2.3 – Зависимость температуры контактной пары от времени, при различных значениях массы при сопротивлении равном 1 Ом:

— 1 г., — 2 г., — 3 г.

Из графиков зависимости температуры контактной пары от времени (рис.2.3) видно, что при равных значениях сопротивления меньшей термодинамической инерционностью обладает система с меньшей массой.

Также стоит отметить, что при изменении массы изменяется скорость нарастания температуры до максимальной температуры. Тогда как на максимальную температуру масса не оказывает никакого влияния.

Изменение сопротивления

Результаты исследования влияния сопротивления контактной пары на температуру контактного соединения приведены на рис.2.4 – 2.5. На рис.2.4

показана зависимость температуры контактной пары от времени, при различных значениях сопротивления (10 мОм, 20 мОм, 30 мОм и 100 мОм) при массе равной 1 г.

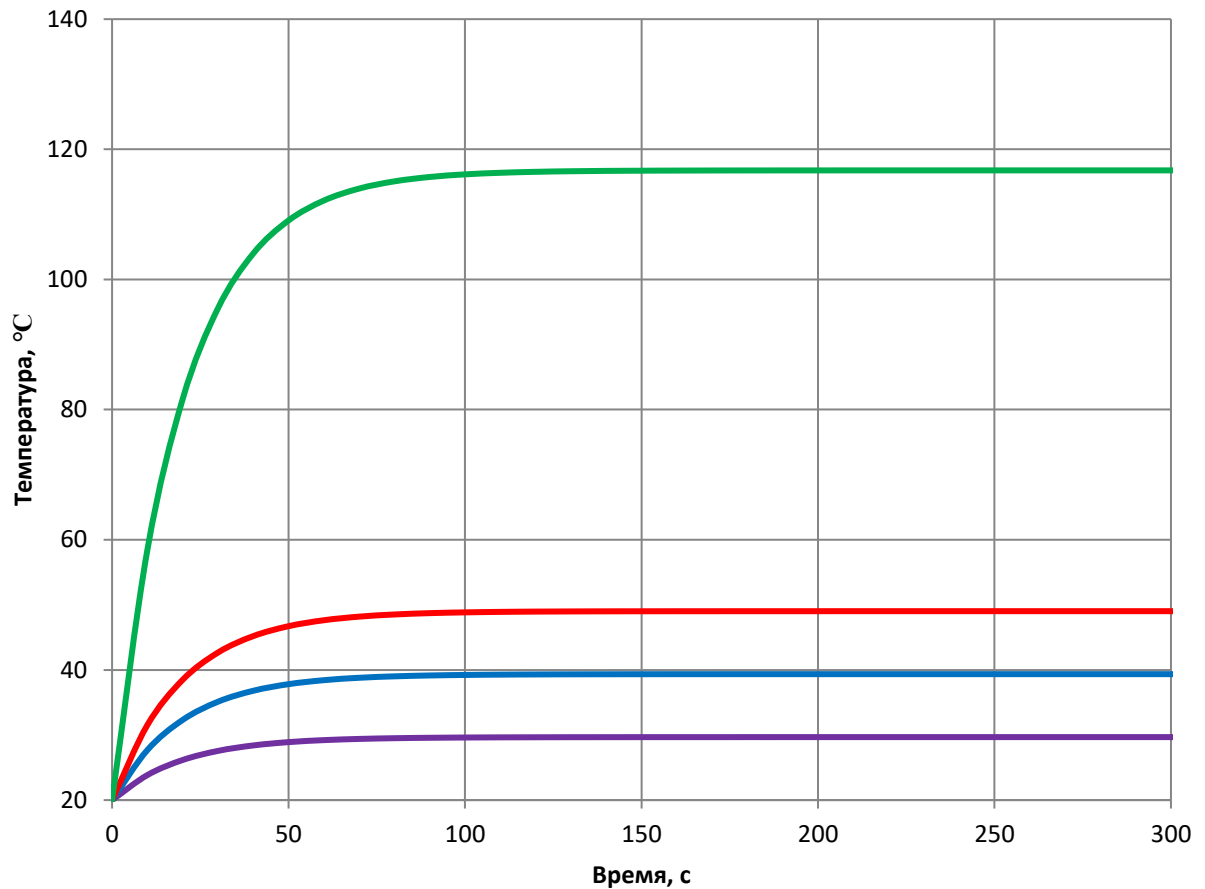


Рисунок 2.4 – Зависимость температуры контактной пары от времени, при различных значениях сопротивления при массе равной 1 гр: .. — 10 мОм, — 20 мОм, — 30 мОм, — 100 мОм,

Как видно из рис.2.4 максимальная температура прямо пропорциональна сопротивлению. При увеличении сопротивления увеличивается максимальная температура. При росте температуры увеличивается конвекционная составляющая охлаждения. При этом наблюдается незначительное увеличение времени нагрева термодинамической системы до максимальной температуры.

При увеличении массы контактного соединения увеличивается время нагрева (рис.2.5).

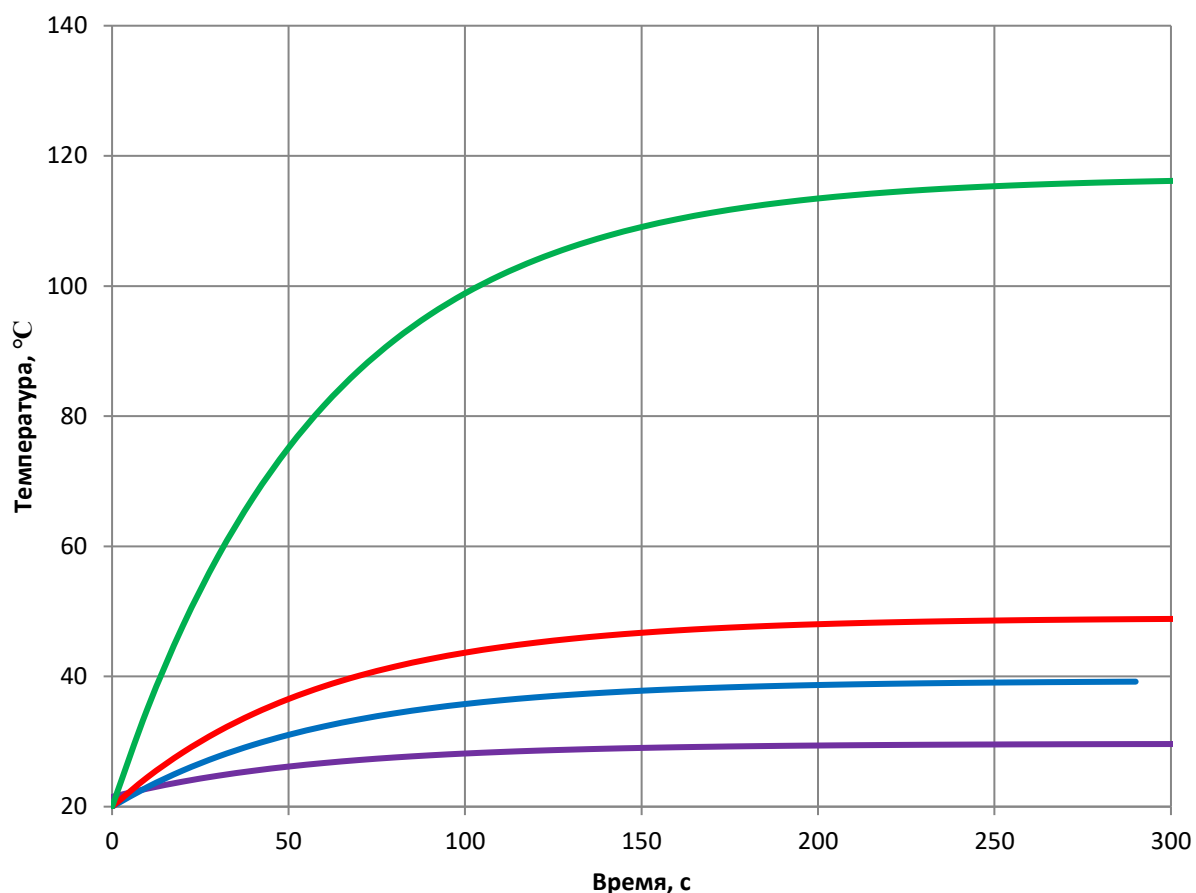


Рисунок 2.5 – Зависимость температуры контактной пары от времени, при различных значениях сопротивления при массе равной 3 гр: — 10 мОм, — 20 мОм, — 30 мОм, — 100 мОм

Сравнение графиков (рис.2.4 и рис.2.5) позволяет сделать вывод, что при изменении массы, как и на предыдущих графиках, изменяется время нагрева до максимальной температуры. Это объясняется тем, что при увеличении массы возрастает инерционность термодинамической системы. При этом значение максимальной температуры не изменяется.

Изменение материалов

Кроме изменения массы и сопротивления контактной пары могут использоваться разные материалы для создания контактного соединения. Результаты исследования влияния материалов контактного соединения на температуру контактного соединения приведены на рис.2.6.

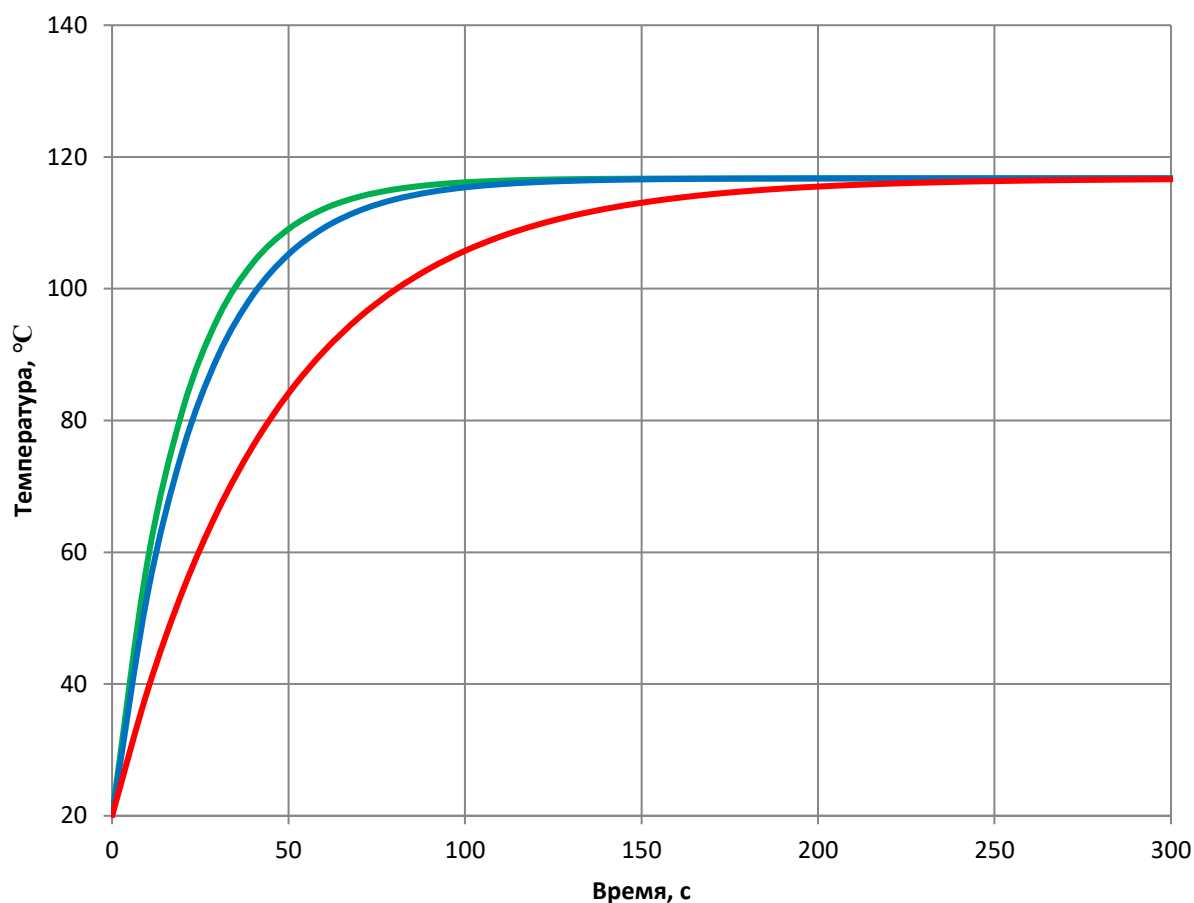


Рисунок 2.6 – Зависимость температуры контактной пары от времени, при различных типах материала: — медь, — сталь, — алюминий.

Как видно из полученного графика, чем выше удельная теплоемкость, тем меньше скорость нарастания температуры. Это обусловлено увеличенной инерционностью термодинамической системы. Чем выше удельная теплоемкость, тем дольше материалу необходимо запастись теплом и тем сложнее его отдавать.

2.3 Исследование температурного поля контактной пары

Теоретическое исследование распределения температурного поля в контактной паре проведем на модели в программном пакете Comsol Multiphysics.

Рассмотрим программную модель, геометрические формы которой спроектированы в AutoCAD 2019 (Russia) и затем конвертированы в COMSOL Multiphysics.

Для моделирования тепловых процессов был выбран узел силовой схемы электрической сети напряжением 220 В. В качестве узла выступает один контакт розетки (рис.2.7), к которой подключен проводник (один контакт выбран ввиду того, что он является блоком симметрии целой розетки, показанной на рис.2.8).

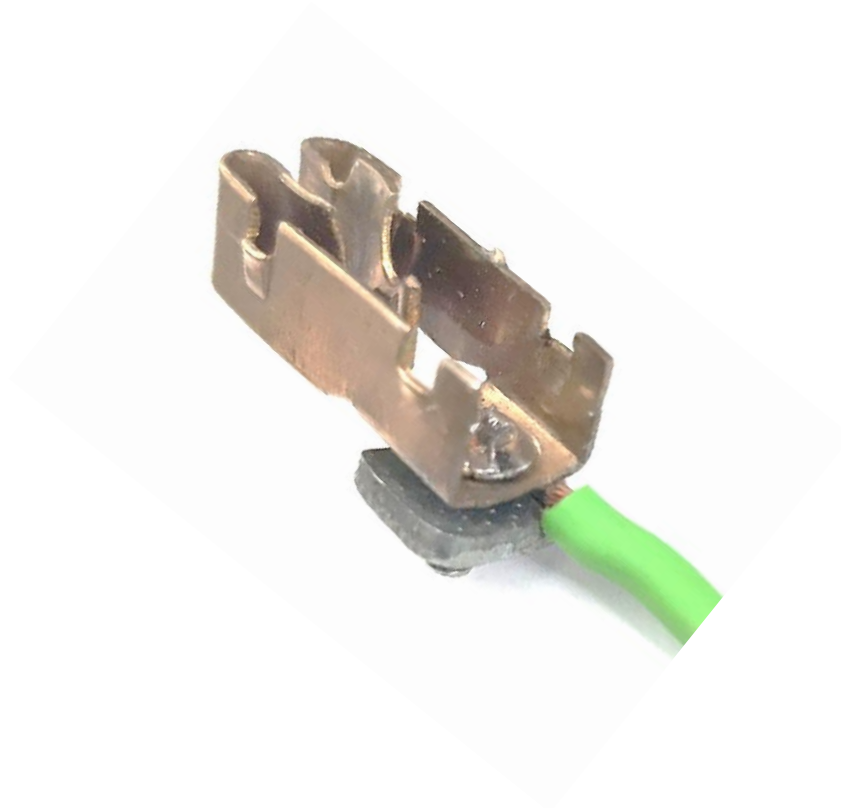


Рисунок 2.7 – Объект моделирования

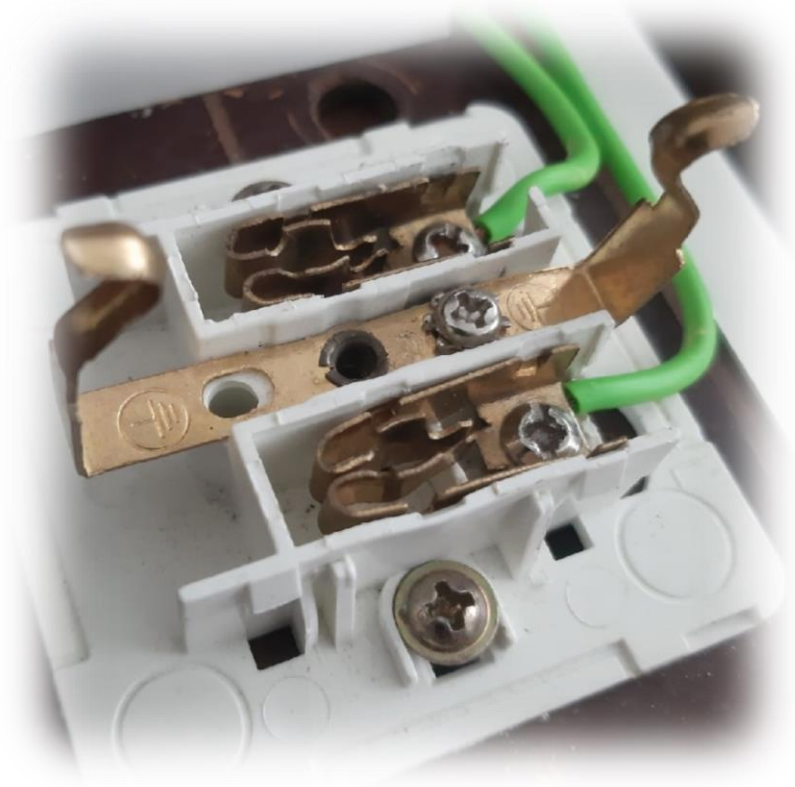


Рис. 2.8 – Двухконтактная розетка сети электроснабжения 220В

Модель контактного соединения розетки в пакете AutoCAD2019 показана на рис.2.9.

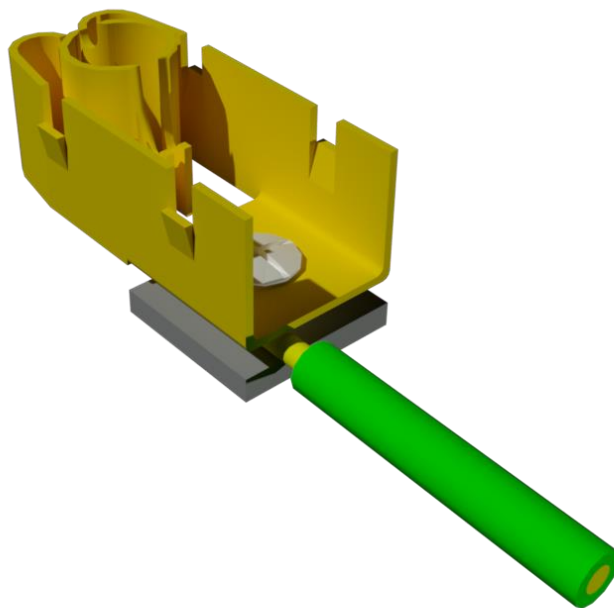


Рисунок 2.9 – Модель разъемного соединения розетки в пакете AutoCAD2019

Распределение температурного поля в контактном соединении, по результатам моделирования в пакете COMSOL Multiphysics, показано на рис.2.10 в виде псевдообъемного изображения.

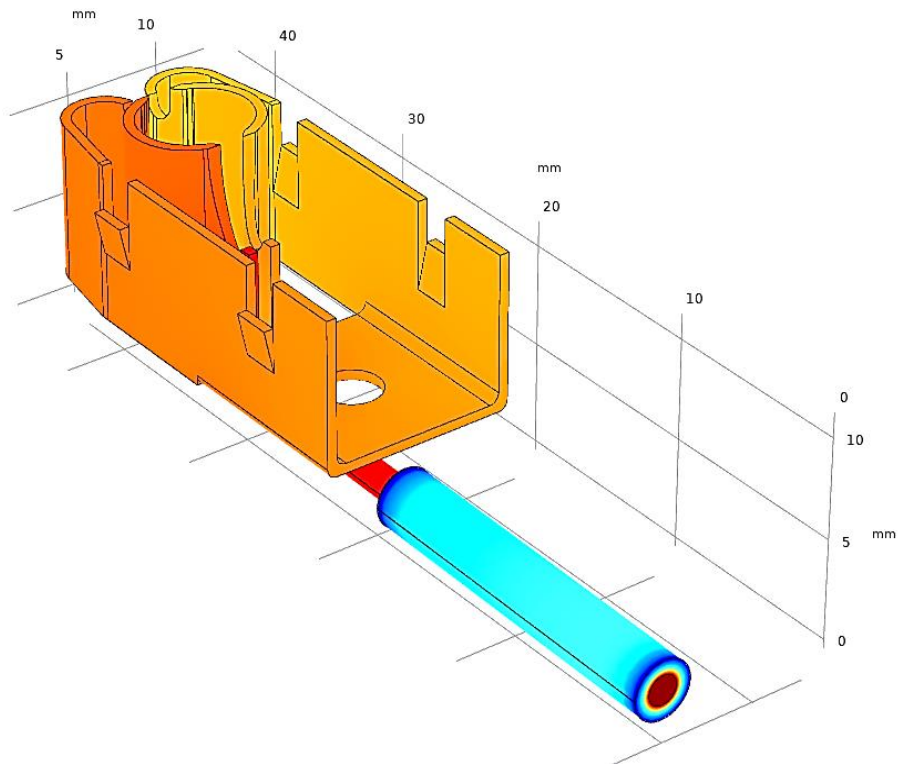


Рисунок 2.10 – Распределение теплового поля в контактном соединении (изометрия)

Температурное поле подводящего проводника показано на виде снизу.

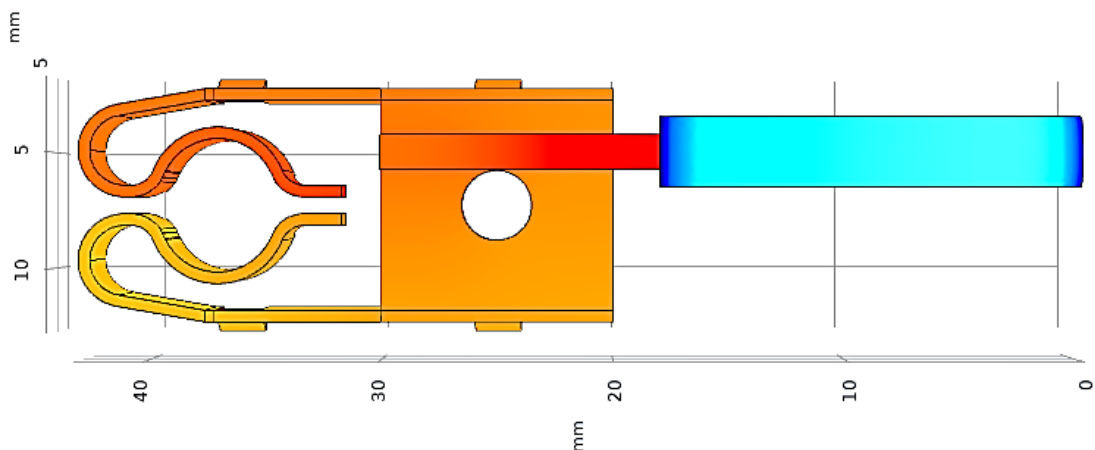


Рисунок 2.11 – Распределение теплового поля в подводящем проводнике и контактном соединении (вид снизу)

Результаты моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics показали, что нагревание контактной группы при протекании тока, в которой площадь контакта мала и, следовательно, большое контактное сопротивление, вызывает нагрев проводника до 700 градусов через 300 секунд с момента начала протекания тока (уровень установившегося значения температуры). При этом критических значений температуры для изоляции проводник достигает спустя 108 секунд после начала процесса протекания тока.

Повышение температуры в течение 108 секунд до 350 градусов приведет к увеличению термоЭДС согласно эффекту Зеебека.

Для оценки динамики изменения температуры контактного соединения проведем моделирование нагрева контактной пары путем пропускания тока. В начальный момент времени температура всего объекта и окружающей среды равна 22,4 градуса Цельсия, что соответствует нормальным условиям окружающей среды (рис.2.12).

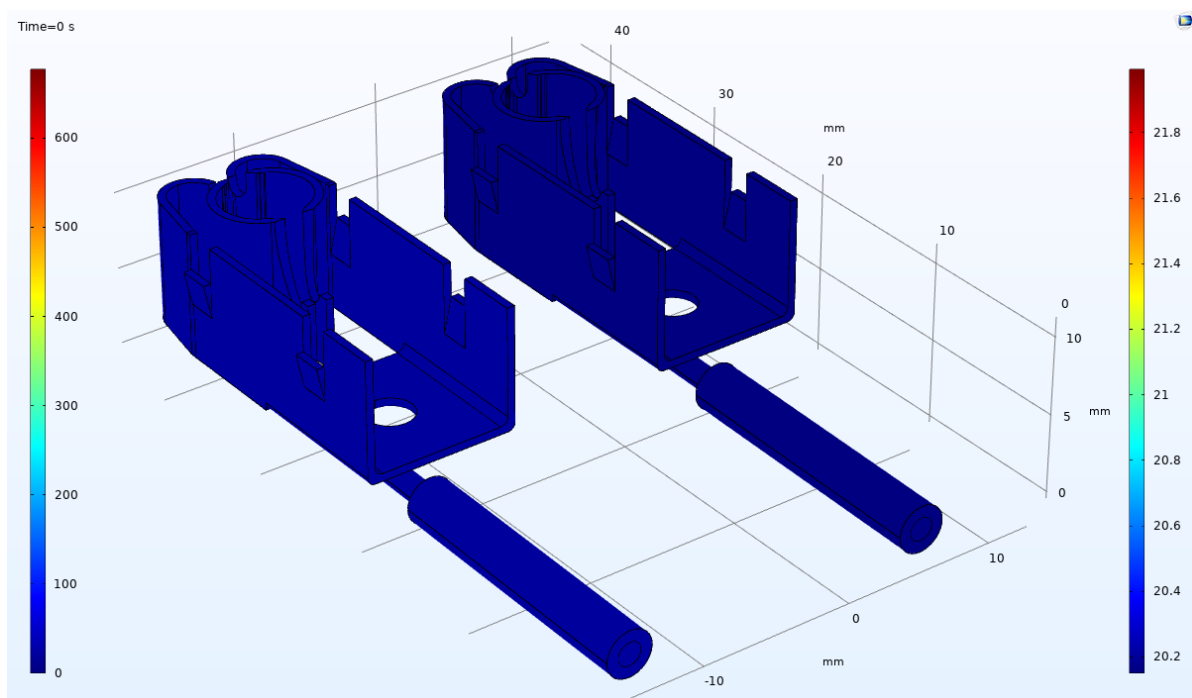


Рисунок 2.12 – Распределение температурного поля в начальный момент времени ($t=0$ с)

Через 100 секунд после начала протекания тока максимальная температура получается в месте соприкосновения двух материалов (рис.2.13).

Теплота за счет теплообмена распространяется во все стороны, нагревая другие области контактного соединения. Описать рис.2.13

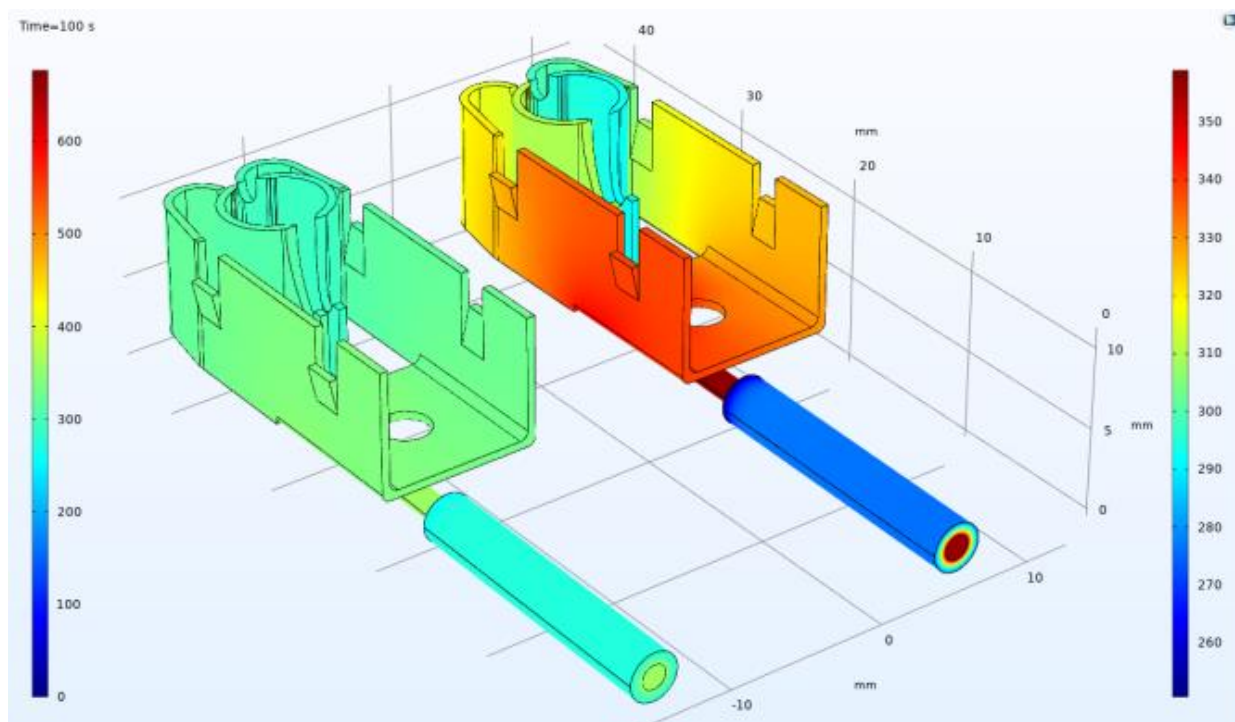


Рисунок 2.13 – Распределение температурного поля через 100с

Спустя 200 секунд температура вспоминающейся части объекта исследования (изоляции) достигает примерно 280 градусов Цельсия, что является критическим и предельным для изоляции (рис.2.14). Дальнейший нагрев приводит к увеличению температуры исследуемого объекта. Примерно через 300 секунд объект достигнет 90 % максимальной температуры и дальше происходит прогрев отдаленных областей объекта исследования.

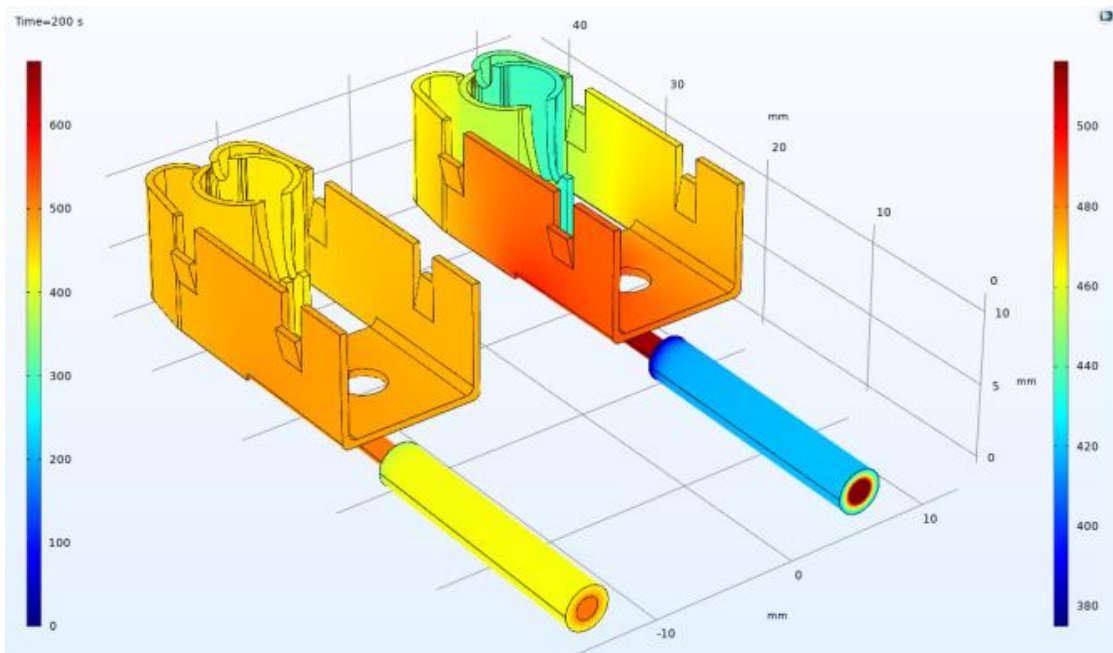


Рисунок 2.14 – Распределение температурного поля через 200 сек.

Спустя 500 секунд после начала протекания тока весь объект исследования нагревается до 95 % от максимальной температуры (рис.2.15). Дальнейшее моделирование приводит к незначительным увеличениям температуры.

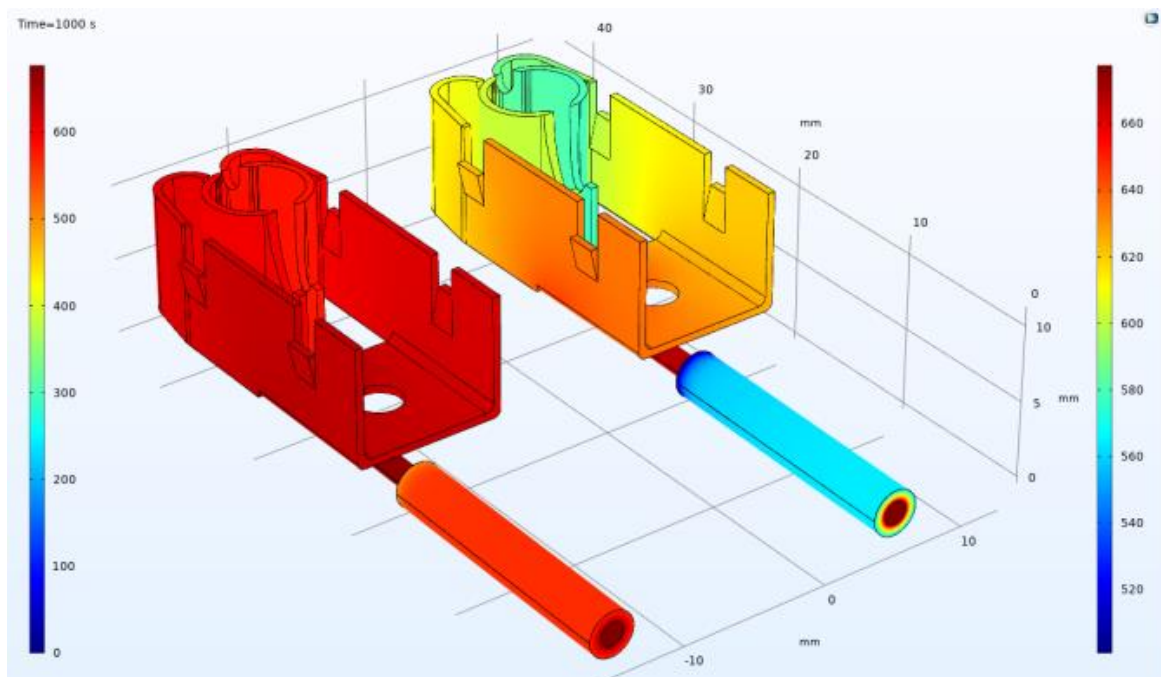


Рисунок 2.15 – Распределение температурного поля через 500 сек.

Для обеспечения хорошего контактного соединения используют прижимной контакт. Результаты моделирования в случае, когда электрический контакт осуществляется за счет передачи тока через стальную прижимную пластину в программной среде COMSOL Multiphysics, показали, что нагревание контактной группы при протекании тока, в которой площадь контакта мала, вызывает нагрев проводника до 590 градусов через 200 секунд (уровень установившегося значения температуры). Начальные условия соответствовали температуре 22,4 градуса Цельсия (рис.2.16). При этом критических значений температур для изоляции проводник достигает спустя 68 секунд.

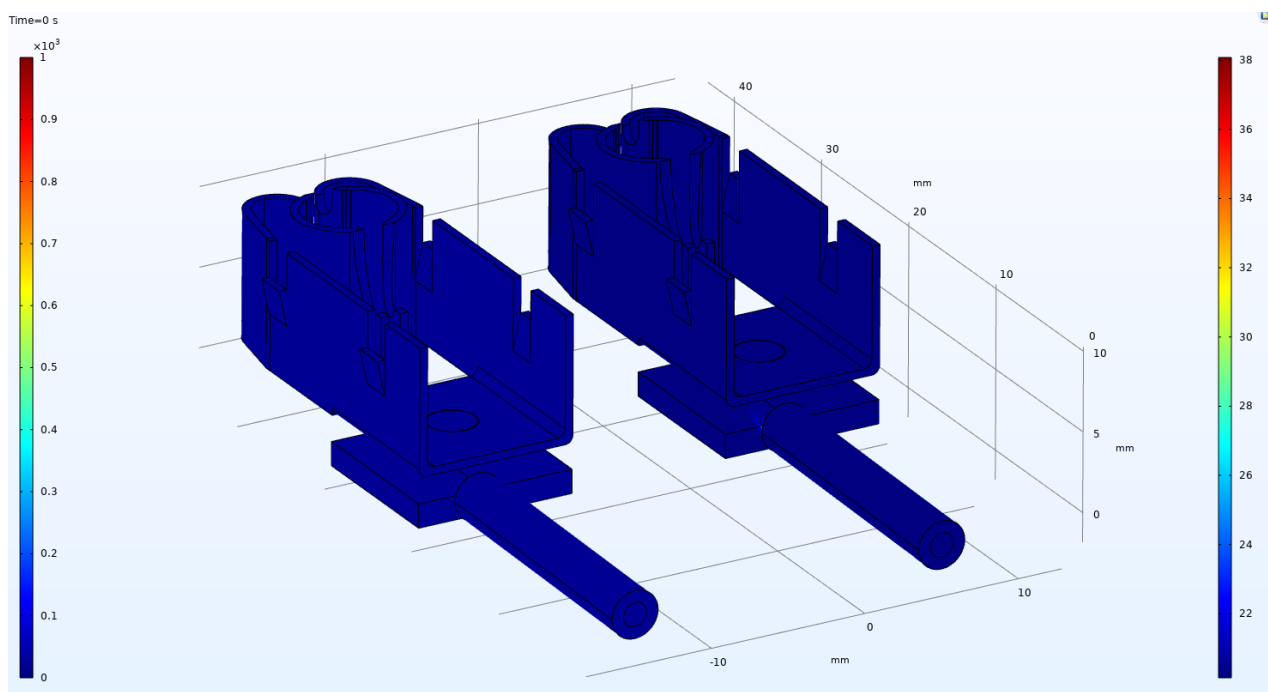


Рисунок 2.16 – Распределение температурного поля в начальный момент времени $t=0$ сек.

Спустя 800 секунд температура воспомяющейся части объекта исследования (изоляция) достигает примерно 280 градусов Цельсия, что является критическим и предельным для изоляции (рис.2.17).

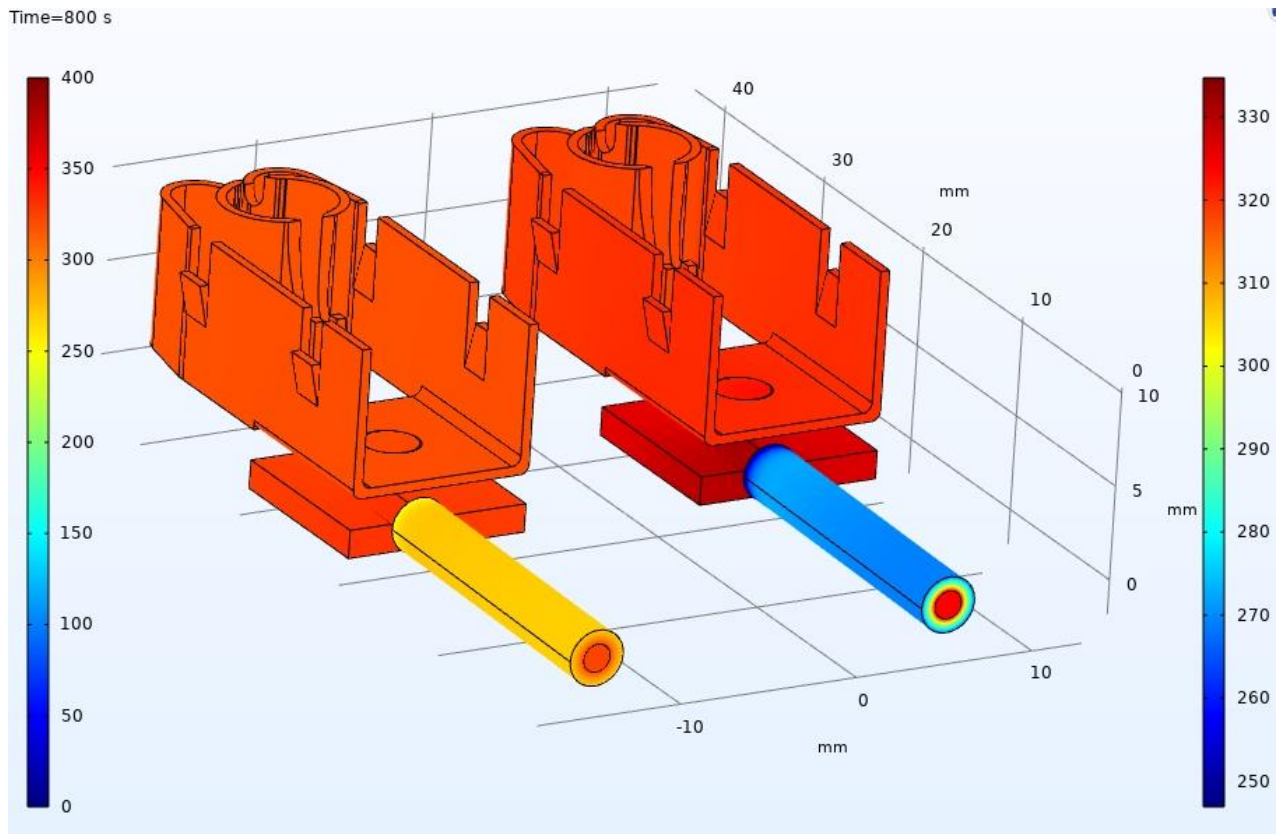


Рисунок 2.17 – Распределение температурного поля в момент времени $t=800$ сек.

Дальнейший нагрев приводит к увеличению температуры исследуемого объекта. Примерно через 1000 секунд объект достигнет 90 % от максимальной температуры и дальнейшего прогрева отдаленных областей объекта исследования. Спустя 2000 секунд после начала моделирования весь объект исследования нагревается до 95 % от максимальной температуры (рис.2.18).

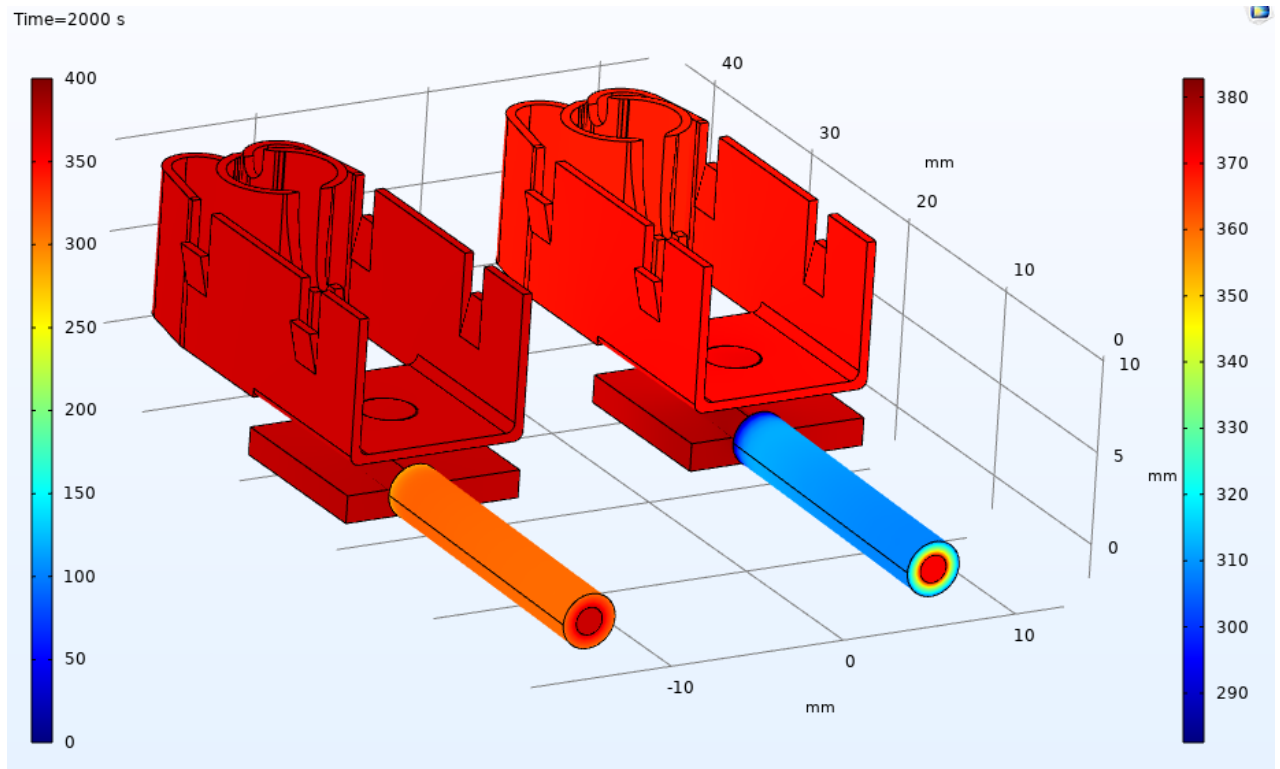


Рисунок 2.18 – Распределение температурного поля в момент времени $t=2000$ сек.

В дальнейшем происходит незначительное увеличение температуры.

Использование стального контактного соединения вместо латуни и бронзы является довольно распространенным явлением. Результаты моделирования в случае, когда электрический контакт осуществляется за счет передачи тока через стальную розетку и вилку в программной среде COMSOL Multiphysics, показали, что нагревание контактной группы, при протекании тока, в которой площадь контакта мала, вызывает нагрев проводника до 500 градусов через 1000 секунд (уровень установившегося значения температуры). При этом критических значений температур для изоляции проводник достигает спустя 180 секунд после начала процесса протекания тока.

Ответной частью розетки является вилка, контакты которой выполняются из стали, а гнездо розетки – из латуни. Термопарой в данном случае является сталь-латунь.



Рисунок 2.19 – Модель контактного соединения сталь-латунь в пакете AutoCAD

Проведем моделирование нагрева контактной пары путем пропускания тока. В начальный момент времени температура всего объекта и окружающей среды равна 22,4 градуса Цельсия, что соответствует нормальным условиям окружающей среды. На рис.2.20 показано распределение температуры в контактной паре в установившемся режиме. Кроме того, на рисунке видно, что контакт наблюдается не по всей поверхности контактного соединения. Максимальное значение температуры в месте контакта вилки и розетки составляет 500 градусов Цельсия.

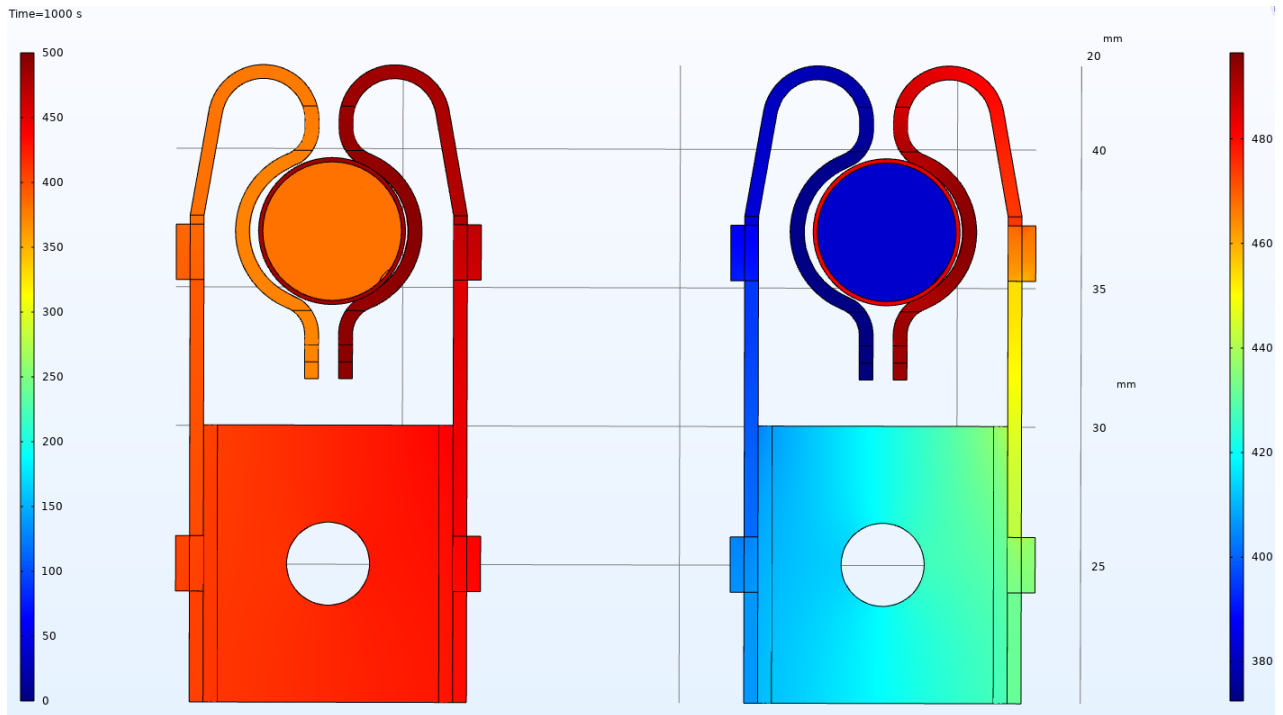


Рисунок 2.20 – Распределение температурного поля в установившемся режиме для контактной пары сталь-латунь

В процессе работы объекта исследования видно, что наиболее сильно нагреваемая часть контакта - это место соприкосновения двух материалов. Теплота за счет теплообмена распространяется во все стороны.

Спустя 180 секунд максимальная температура в контактном соединении составила 280 градусов Цельсия (рис.2.21). Эта область контактного соединения граничит с пластмассовой частью розетки и подложки, что является критическим и предельным для полипропилена.

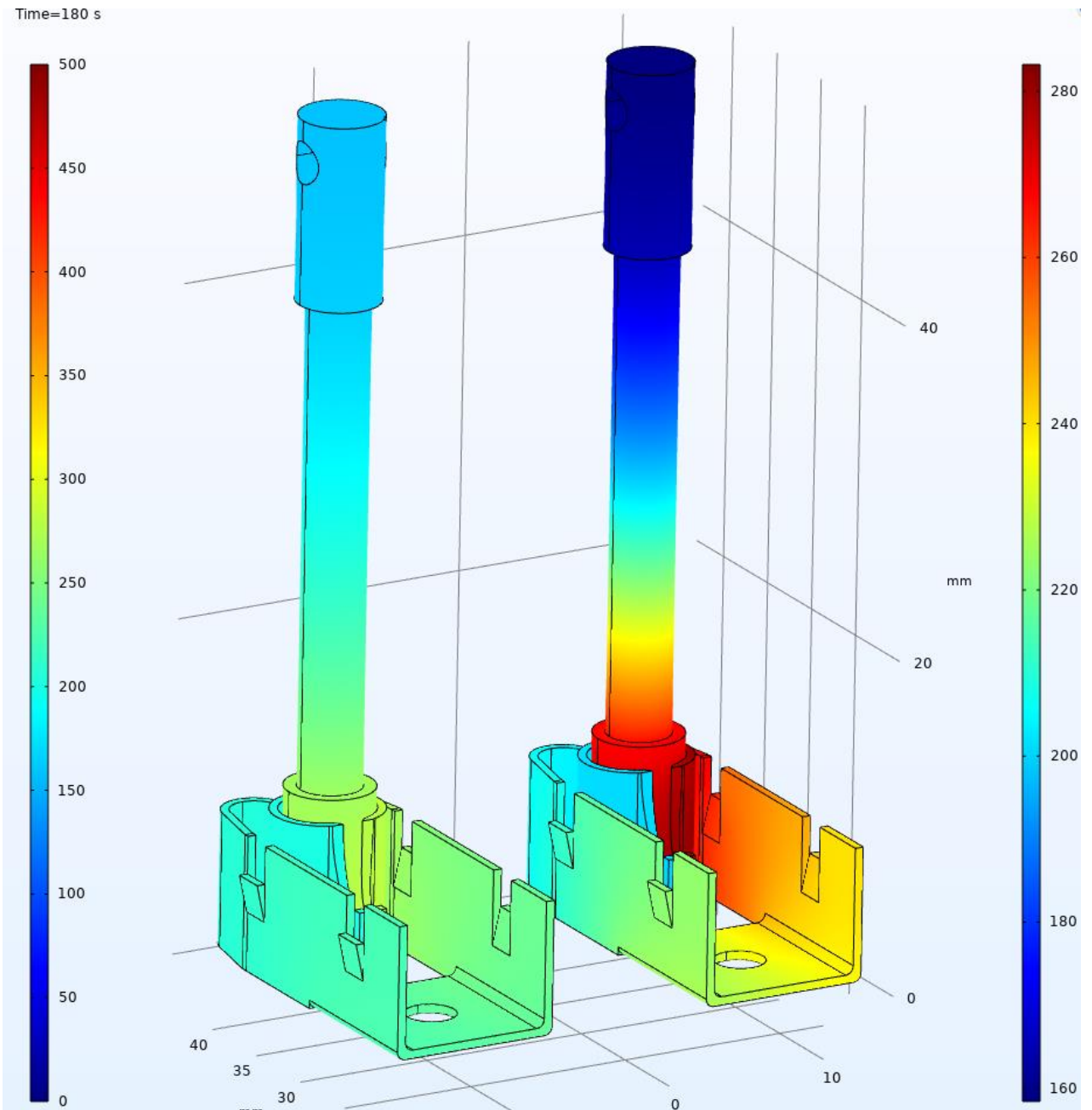


Рисунок 2.21 – Распределение температурного поля в момент времени $t=180$ сек.

Дальнейший нагрев приводит к увеличению температуры исследуемого объекта. Примерно через 500 секунд объект достигнет 90 % от максимальной температуры (рис.2.22).

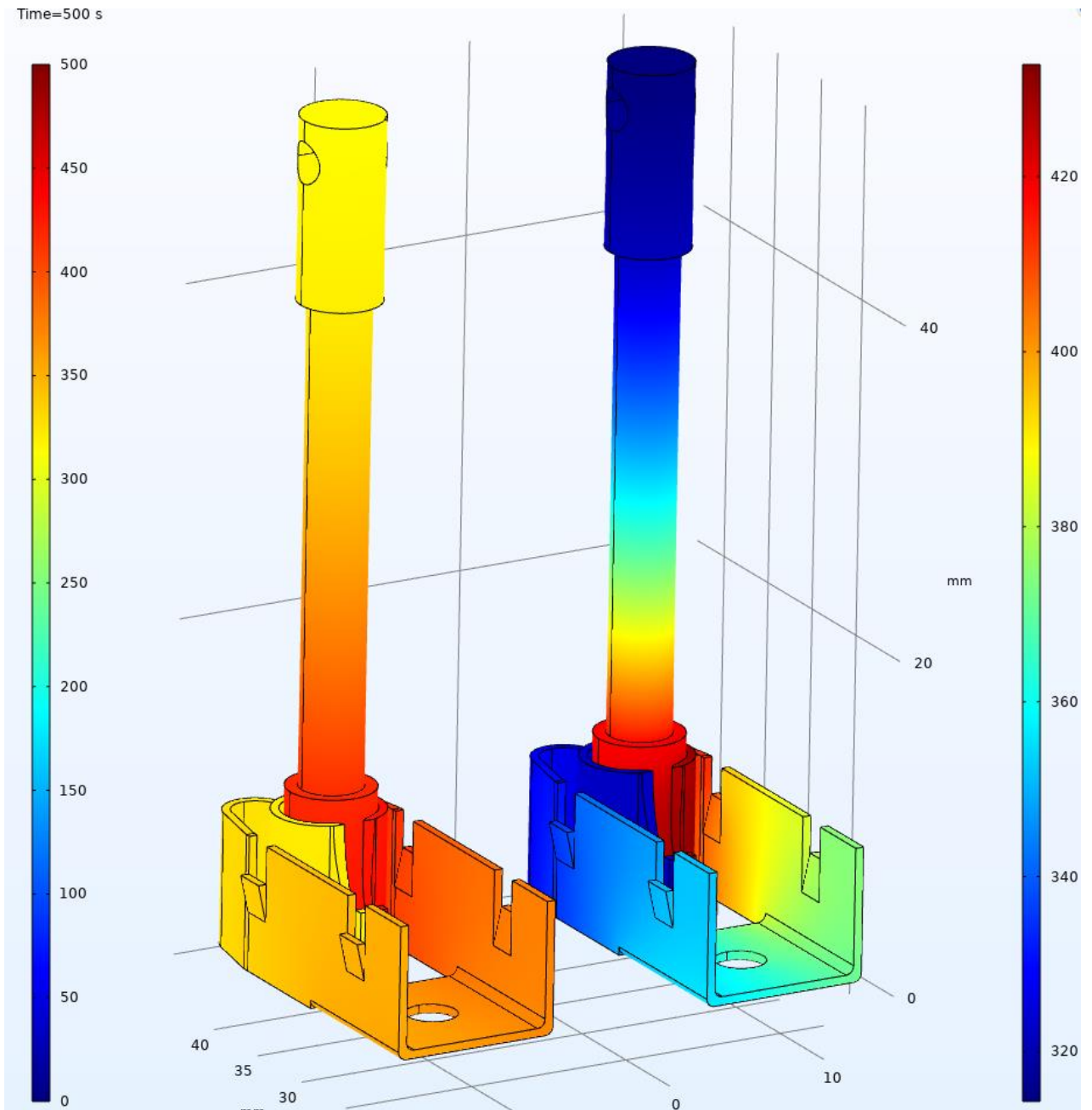


Рисунок 2.22 – Распределение температурного поля в момент времени $t=500$ сек.

В дальнейшем происходит прогрев отдаленных областей объекта исследования. Спустя 700 секунд после начала моделирования весь объект исследования нагревается до 95 % от максимальной температуры (рис.2.23). Далее наступает установившийся режим.

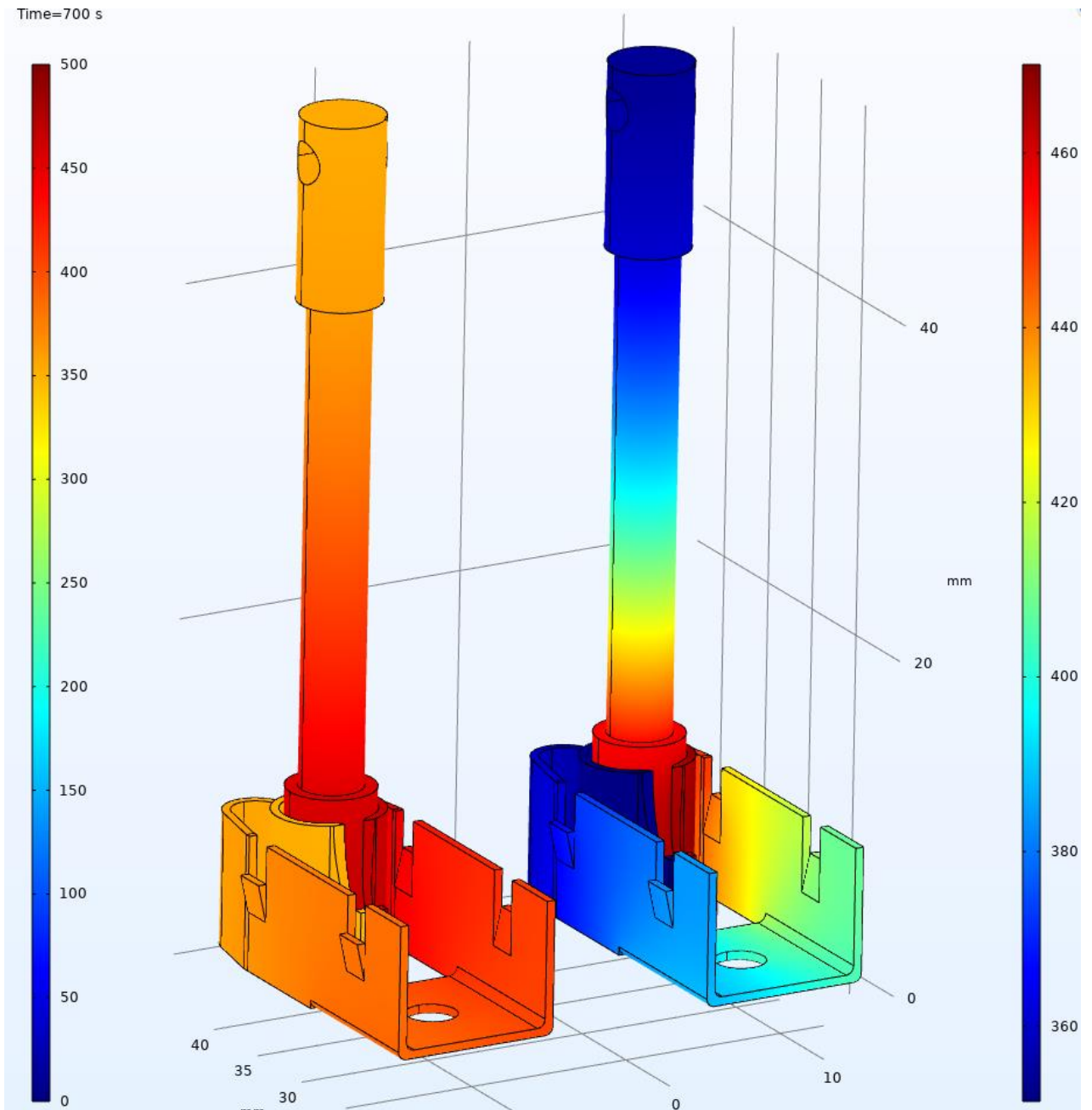


Рисунок 2.23 – Распределение температурного поля в момент времени $t=700$ сек

Результаты моделирования контактного соединения проводник-пластина-винт-розетка-вилка (рис.2.24) в программной среде COMSOL Multiphysics представлены на рис.2.25-2.30. В начальный момент времени температура контактного соединения и окружающей среды равна 22,4 градуса Цельсия, что соответствует нормальным условиям окружающей среды.

79



Рисунок 2.24 – Модель исследуемого образца

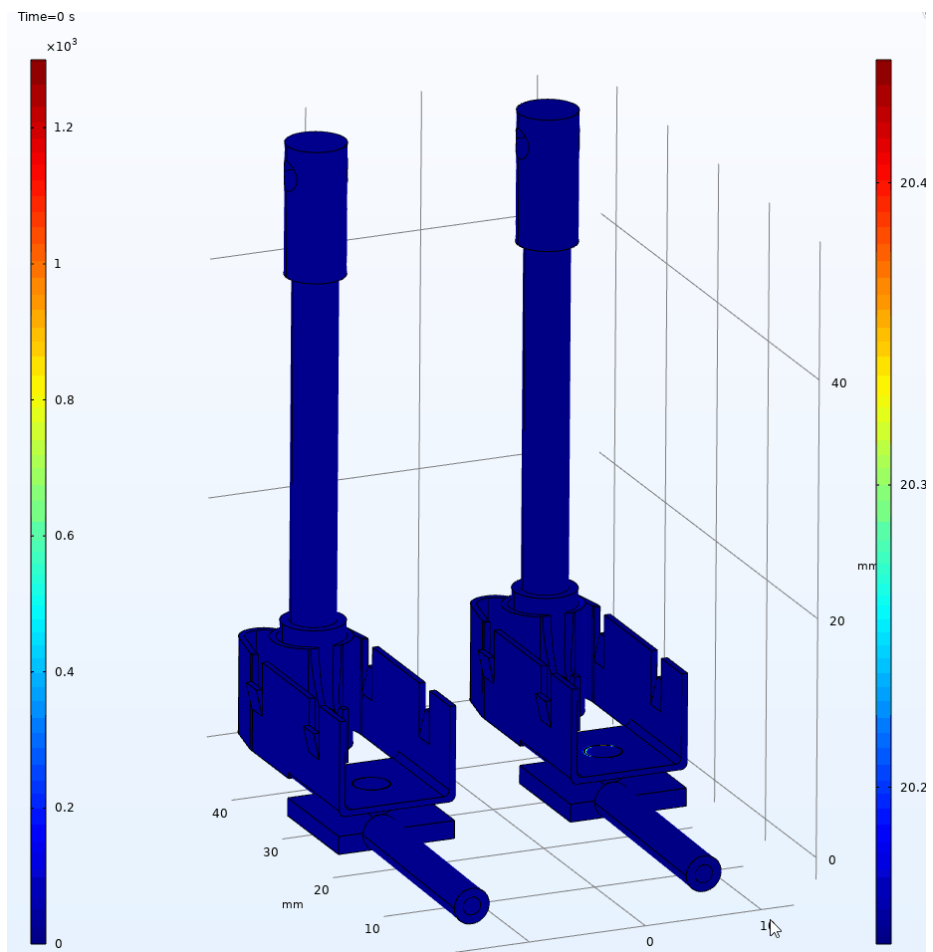


Рисунок 2.25 – Распределение температурного поля в начальный момент времени $t=0$ сек.

В первый итерационный момент равный 1с с начала моделирования наблюдается устойчивое увеличение температуры в местах плохого контакта. Такими местами в худшем варианте является место соединения вилки и розетки и место соединения проводника и розетки (рис.2.26).

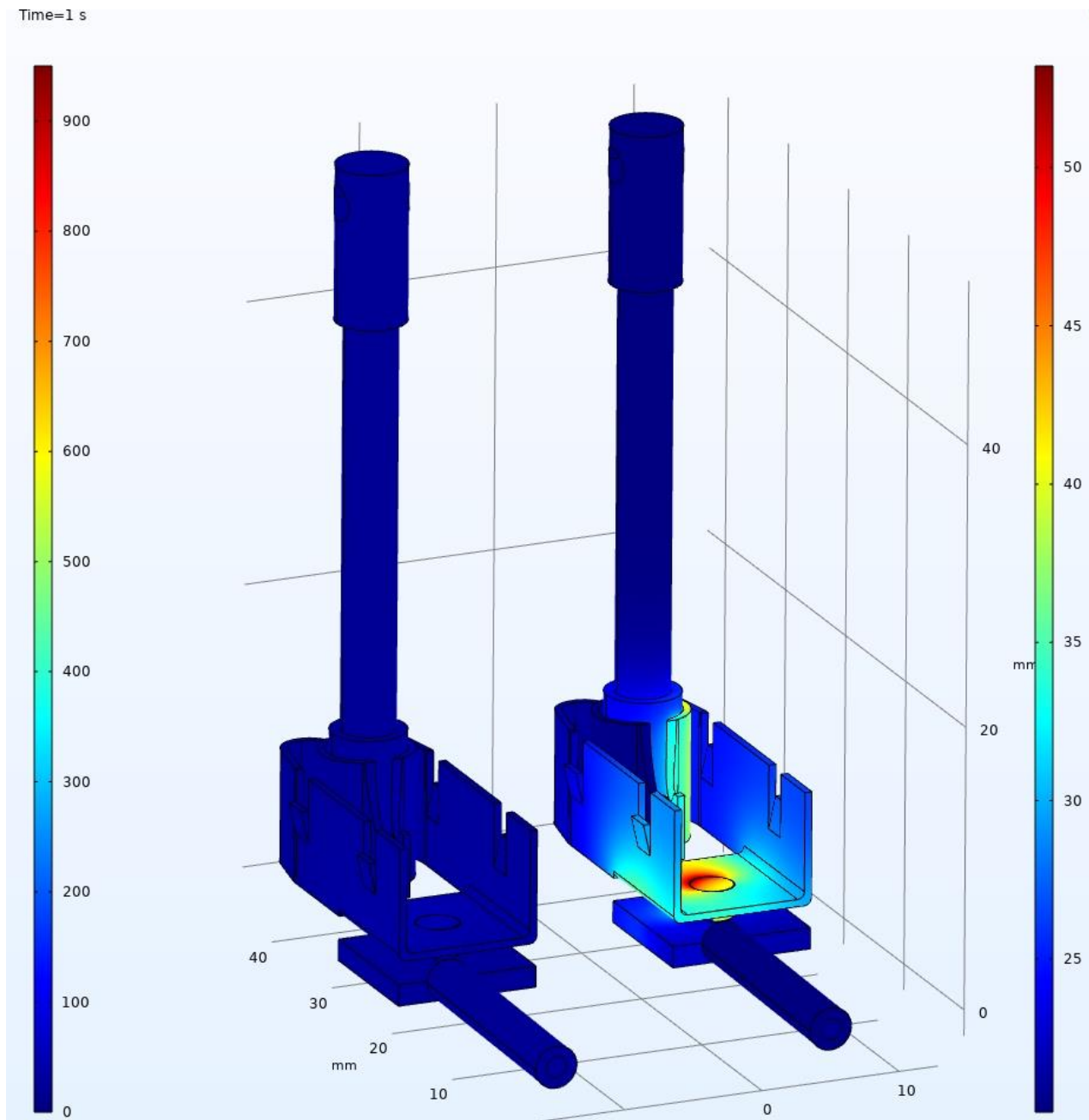


Рисунок 2.26 – Распределение температуры в контактном соединении в момент времени $t=1$ сек.

Результирующая температура в простейшем случае определяется аддитивным методом: методом сложения температуры от 2 различных источников тепла.

В момент времени равный 10 секунд с момента начала протекания тока, температура в точке соединения проводника с розеткой достигает 117 градусов Цельсия. При этом результирующая термоЭДС определяется разницей температур медь (проводник) – сталь (прижимная пластина и винт крепления) – латунь (розетка) – сталь (вилка).

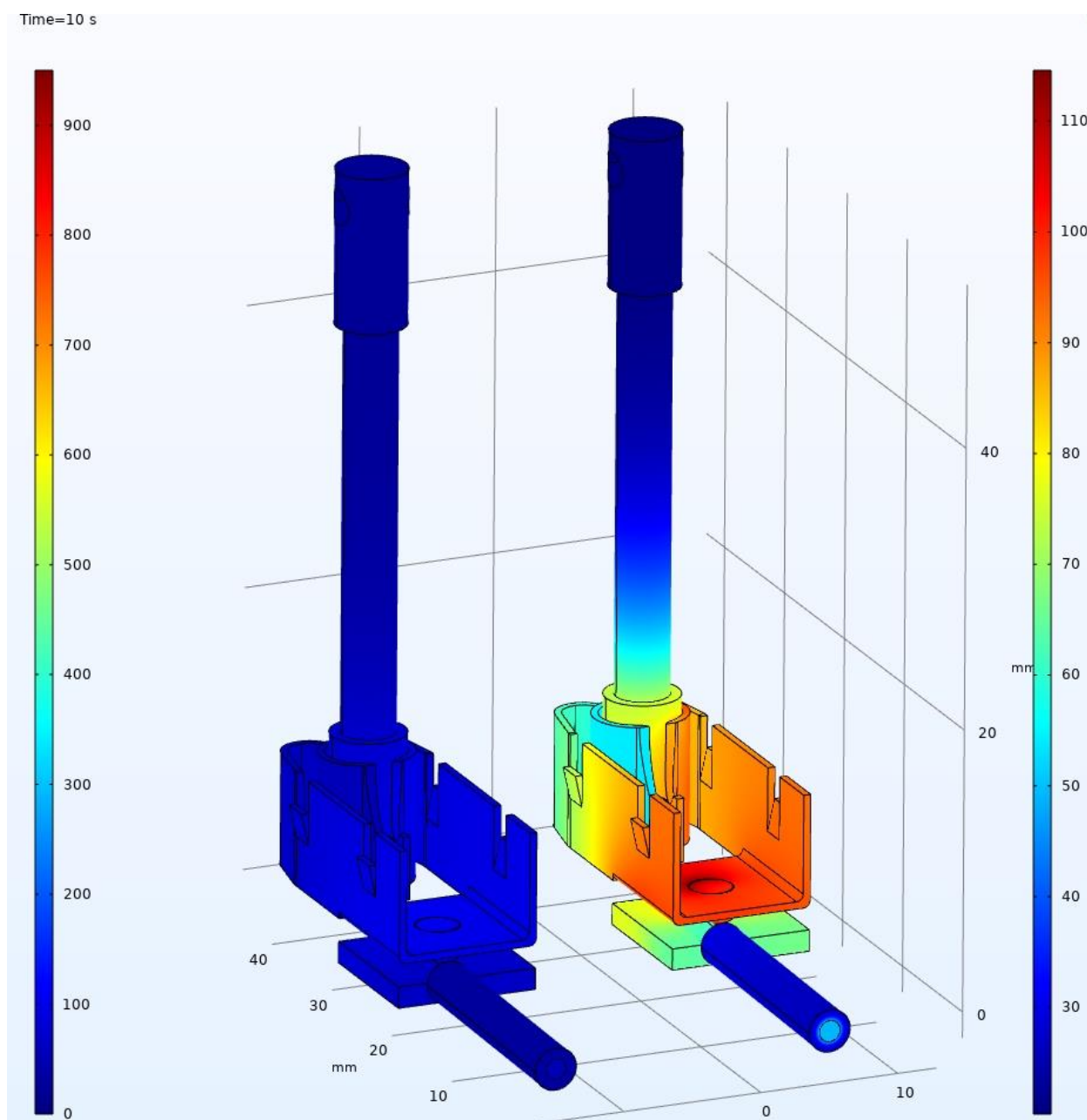


Рисунок 2.27 – Распределение температуры в контактном соединении в момент времени $t=10$ сек.

Спустя 20 секунд температура в точке соединения проводника с розеткой достигает 280 градусов Цельсия, что является критическим и предельным для изоляции. Дальнейший нагрев приводит к увеличению температуры исследуемого объекта и через 100 секунд достигает 800 градусов Цельсия (рис.2.28).

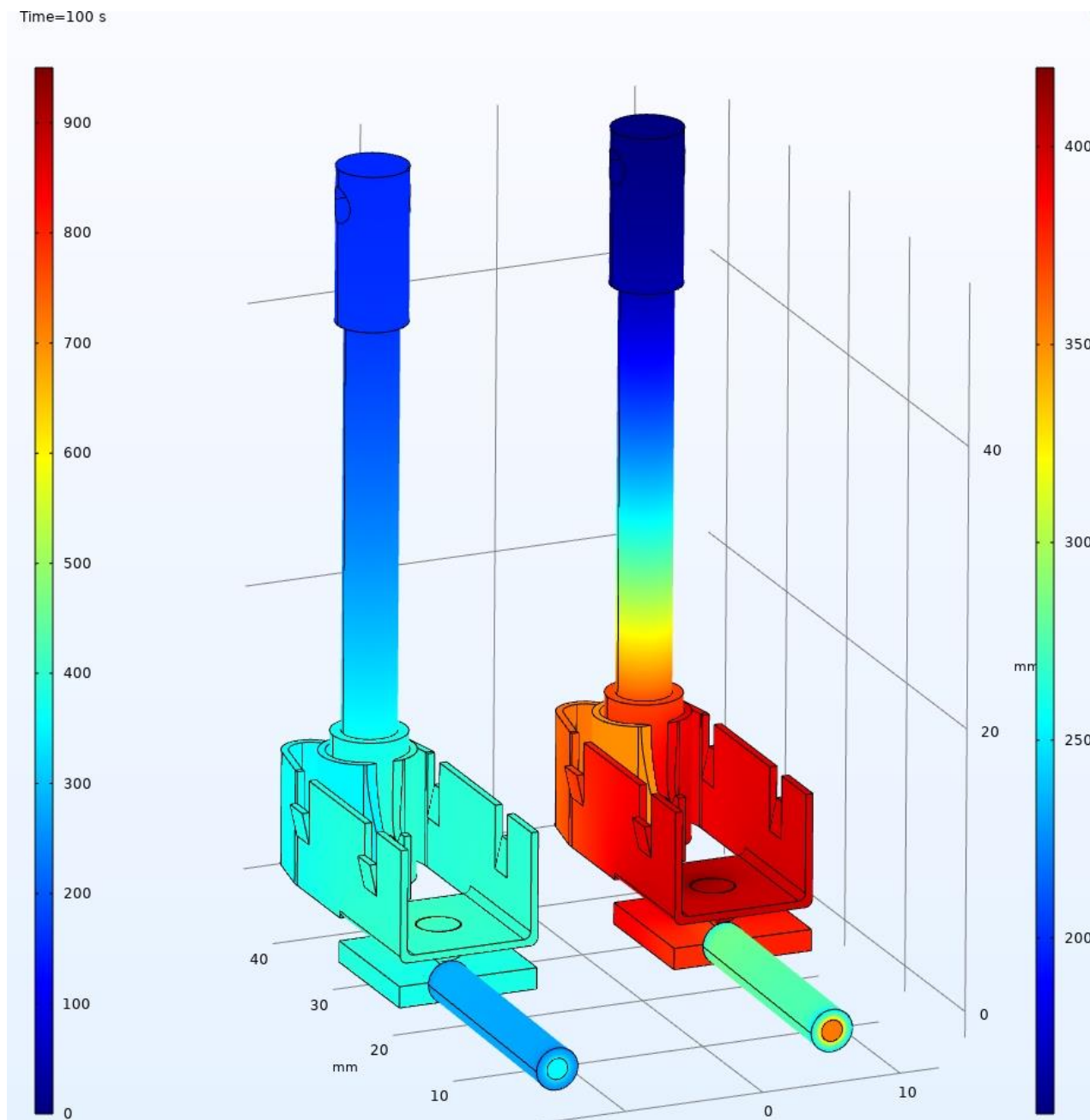


Рисунок 2.28 – Распределение температуры в контактном соединении в момент времени $t=100$ сек.

Примерно через 600 секунд объект достигнет 90 % от максимальной температуры (рис.2.29).

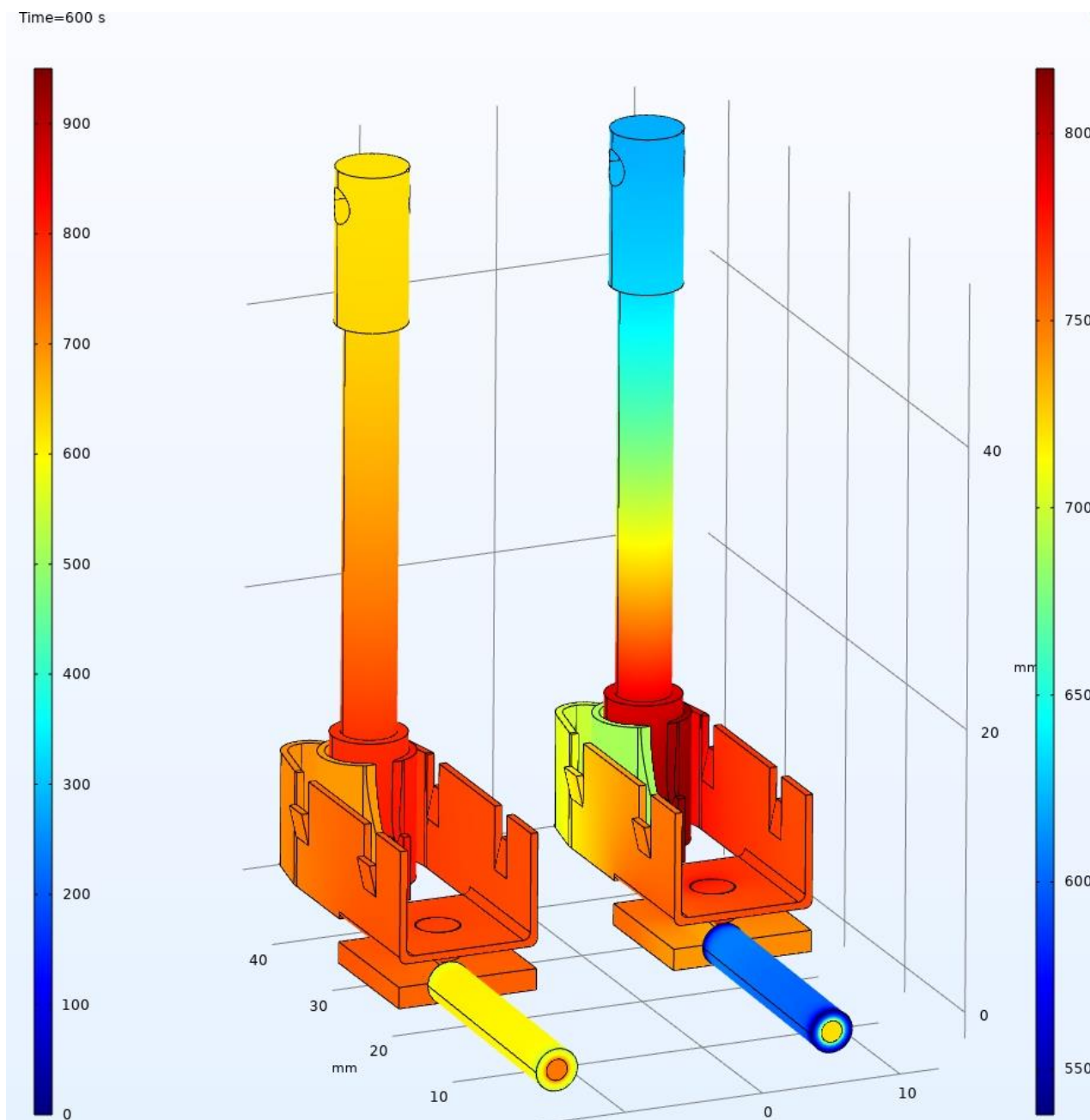


Рисунок 2.29 – Распределение температуры в контактном соединении в момент времени $t=600$ сек.

Спустя 1000 секунд после начала моделирования весь объект исследования нагревается до 90 % от максимальной температуры (рис.2.30). Дальнейший нагрев приводит к незначительным увеличениям температуры.

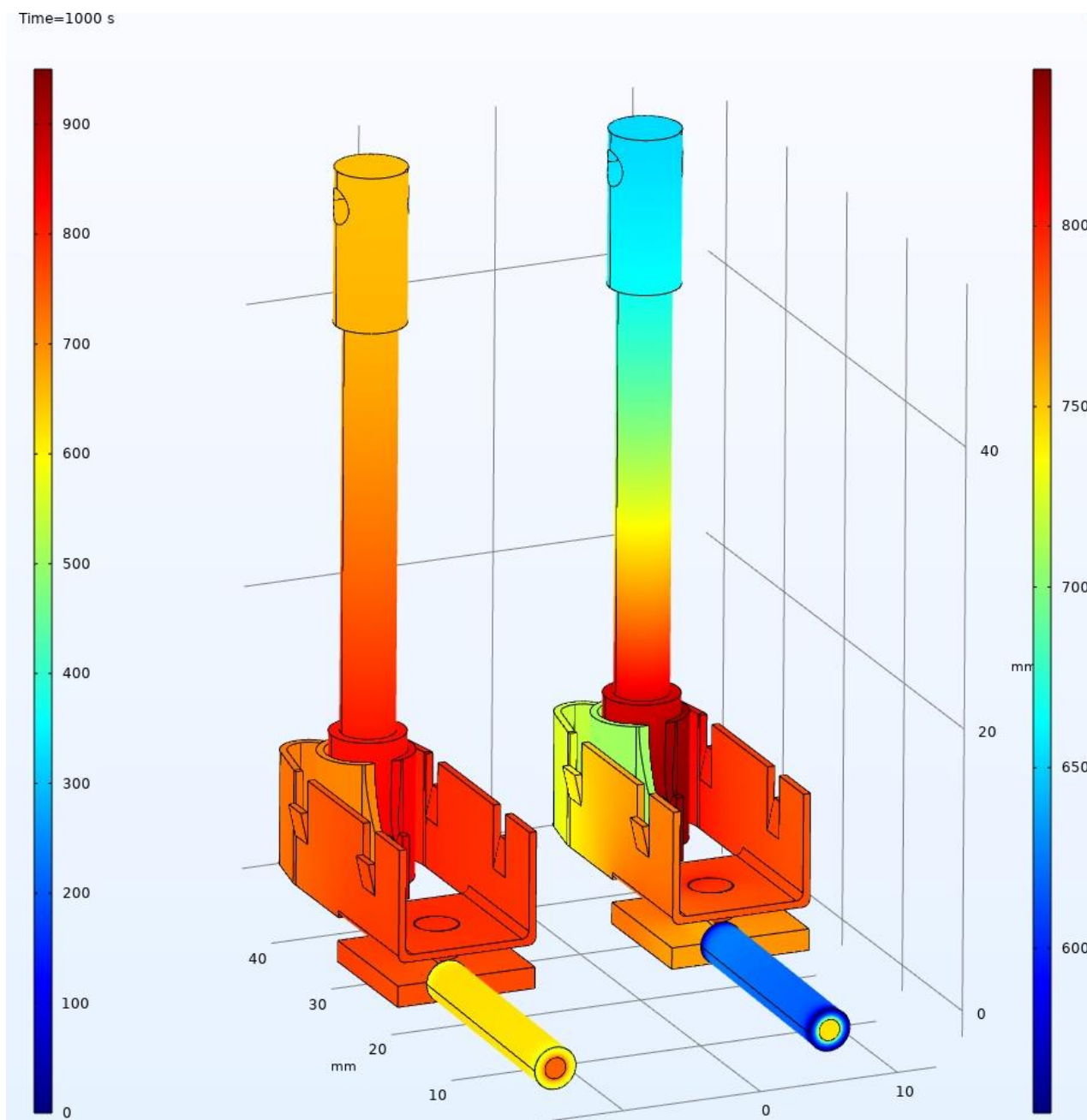


Рисунок 2.30 – Тепловая модель в COMSOL в момент времени $t=1000\text{c}$

Таким образом, проведенные исследования показали, что нагревание контактной группы при протекании тока, в которой площадь контакта мала, вызывает нагрев проводника до 900 градусов через 1000 секунд с момента начала моделирования (уровень установившегося значения температуры). При этом критических значений температур для изоляции проводник достигает спустя 20 секунд после начала процесса протекания тока.

Нагрев контактного соединения, состоящего из разнородных проводников, приводит к появлению термоЭДС в соответствии с выражением (2.1). Если контактное соединение включено в сеть электроснабжения, то термоЭДС суммируется с переменным напряжением сети питания. Для диагностики контактного соединения необходимо разделить постоянное напряжение термоЭДС и переменное напряжение сети электроснабжения.

2.4 Способы контроля термоЭДС контактного соединения в сети электроснабжения промышленной частоты

Выделение термоЭДС в гармоническом сигнале промышленной частоты 50 Гц и напряжением 220 В была разработана модель в пакете MatLAB Simulink 2020b. В качестве исходных данных используется промышленная сеть. Нагрузка подключена к сети электроснабжения через контактное соединение с переходным сопротивлением, что приводит к его нагреву.

По результатам моделирования, при плохом контакте, его температура может достигать 300 °С. Коэффициент Зеебека для спая Алюминий-Латунь равен 3,45 мкВ/К, при этом термоЭДС, рассчитанная с помощью формулы (2.1), будет около 1 мВ. Осциллограмма суммарного напряжения показана на рис.2.31.

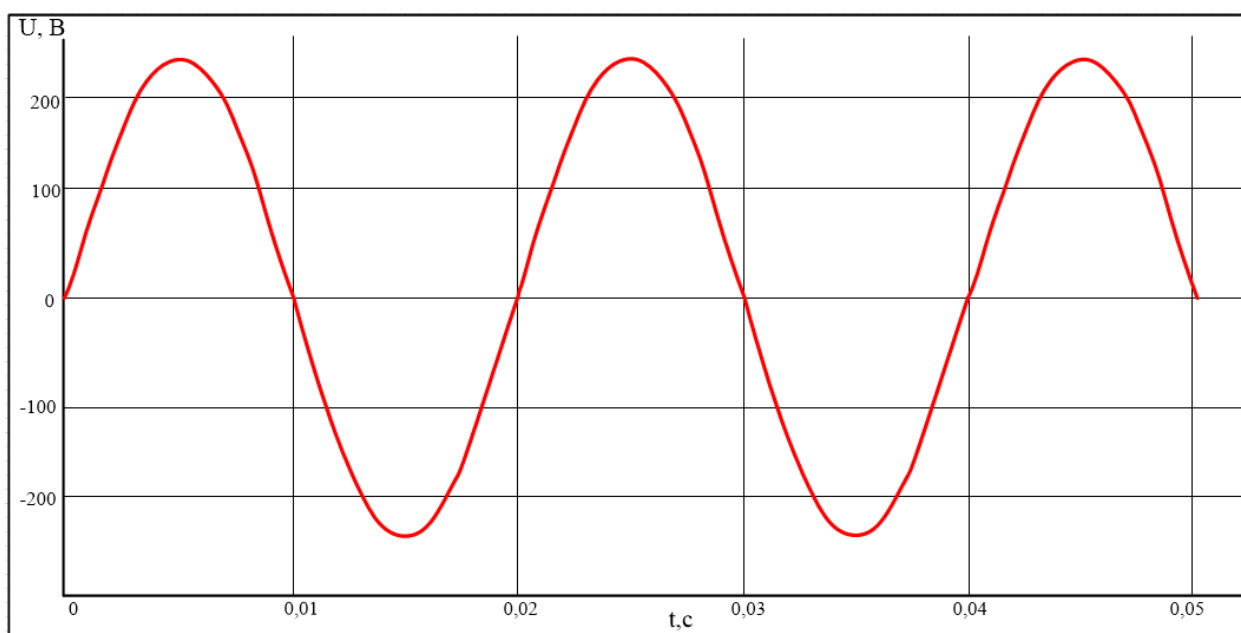


Рисунок 2.31 – Осциллограмма напряжения в сети электроснабжения промышленной частоты с уровнем постоянной составляющей 1 мВ

Для выделения постоянной составляющей из суммарного напряжения можно использовать активный фильтр низких частот второго порядка, в котором передаточная функция определена как:

$$W(p) = \frac{-1}{0,04 \cdot s^2 + 0,6 \cdot s + 1} \quad (2.23)$$

где s – оператор Лапласа.

После фильтрации сигнал будет иметь вид, приведенный на рисунке 2.32.

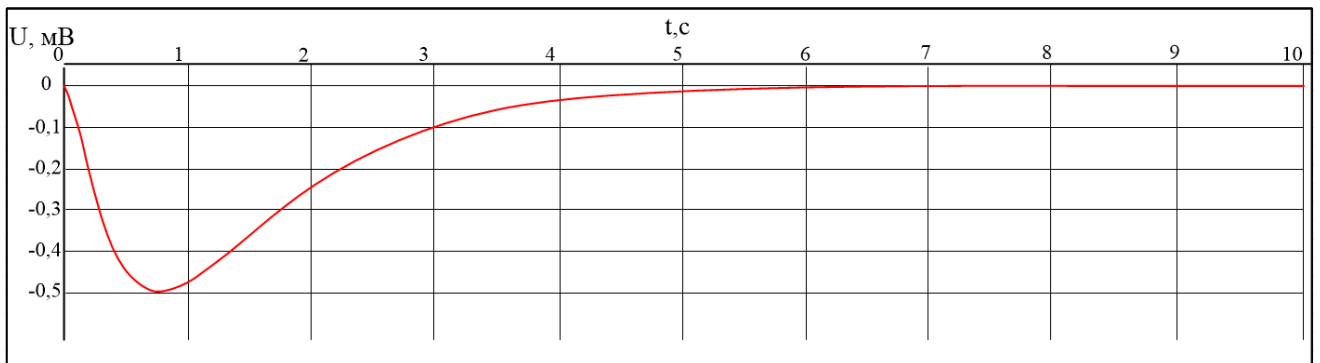


Рисунок 2.32 – Сигнал после фильтра второго порядка

Сигнал является отрицательным и неудобным для цифровой обработки. Используя схему инвертора, получим сигнал положительной полярности (рис.2.33).

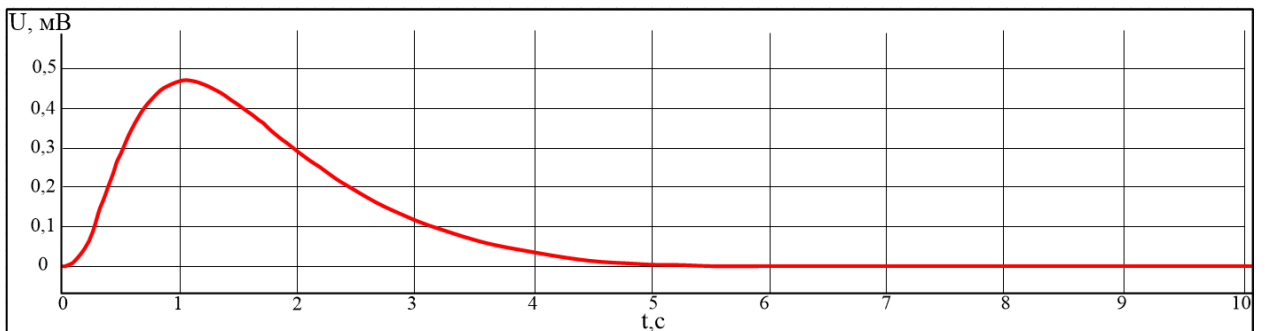


Рисунок 2.33 – Сигнал термоЭДС на выходе инвертора

При необходимости сигнал можно усилить до необходимого и удобного уровня (рис.2.34).

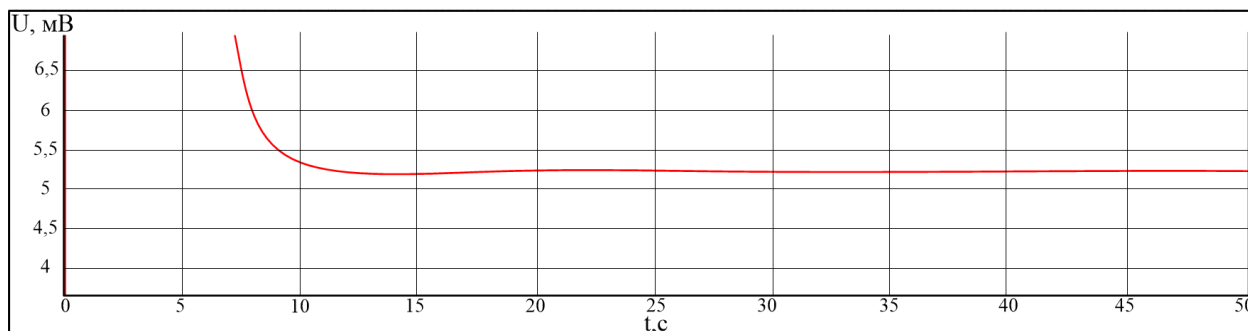


Рисунок 2.34 – Усиленный в 5000 раз сигнал термоЭДС

После усиления сигнала в 5000 раз получим величину термоЭДС 5 В при уровне входного сигнала 1 мВ. Также из графика видно, что первые 10 секунд идет переходный процесс, в котором необходимо отключать систему управления от сети, чтобы предотвратить возможный выход из строя низковольтного оборудования, а также для предотвращения ложного срабатывания системы.

Уровень постоянной составляющей в суммарном напряжении также можно определить путем его оцифровки и сравнения положительного и отрицательного экстремума. Для оценки разрешающей способности необходимо рассчитать требуемую разрядность АЦП. Амплитудное значение переменного сетевого напряжения определено как:

$$U_{amp} = U_{rms} \cdot \sqrt{2} = 220 \cdot \sqrt{2} \approx 311,127 \text{ В}$$

Максимальное входное напряжение микросхемы INA229-Q1 не должно превышать 85 В. Поэтому при контроле амплитудного значения сетевого напряжения необходимо использовать делитель напряжения с коэффициентом деления:

$$k = \frac{311,127}{85} = 3,66$$

Разрядность данной АЦП равна 20, шаг квантования при этом составит:

$$U_{кв} = \frac{U_{ref}}{2^n} = \frac{5}{2^{20}} = \frac{85}{1\,048\,576} = 81,06 \text{ мкВ}$$

Изменение напряжения в диапазоне от 0 до 81,06 мкВ не приведет к изменению выходного кода АЦП. Диапазон изменения термоЭДС в сети электроснабжения, действующее напряжение которого равно 220 В, может составлять ± 10 мВ. Пройдя через делитель напряжения, постоянная составляющая уменьшится до:

$$U = \frac{10 * 10^{-3}}{3,66} = 2,73 * 10^{-3} = 2,73 \text{ мВ}$$

Данный способ определения уровня постоянной составляющей в сети электроснабжения обладает низкой чувствительностью.

Определение уровня постоянной составляющей возможно также путем определения разности мгновенных значений напряжений в экстремумах функции входного напряжения.

Определить экстремумы функции можно путем определения производной функции в точке x_0 , которая будет являться коэффициентом наклона касательной к графику функции. Определить момент, в который производная будет равна нулю, практически невозможно, но можно определить момент, в котором производная сменит знак, это и будет являться моментом экстремума функции напряжения. Повторное изменение знака производной будет свидетельствовать об определении второго экстремума функции, для достоверности нужно определить 10 пар экстремумов, усреднить значение между максимумами функции и минимумами функции. Постоянная составляющая в этом случае будет иметь вид:

$$U_{\text{cons}} = \frac{|\overline{U_{\text{max}}}| - |\overline{U_{\text{min}}}|}{2} \quad (2.24)$$

где U_{cons} – постоянная составляющая гармонического сигнала напряжения, $\overline{U_{\text{max}}}$ - среднее значение максимума функции, $\overline{U_{\text{min}}}$ – среднее значение минимумов функции.

Ещё один способ определения постоянной составляющей гармонического сигнала посредством производной функции является определение момента, когда модуль производной является максимальным, в этот момент времени напряжение гармонического сигнала близко к нулю, и на общий сигнал оказывает влияние только постоянная составляющая.

Определение постоянной составляющей гармонического сигнала также возможно через определенный интеграл.

Представим входное напряжение графиком синуса (шумами пренебрегли), в котором в качестве постоянной составляющей выступает штрихпунктирная горизонтальная линия (рис.2.35).

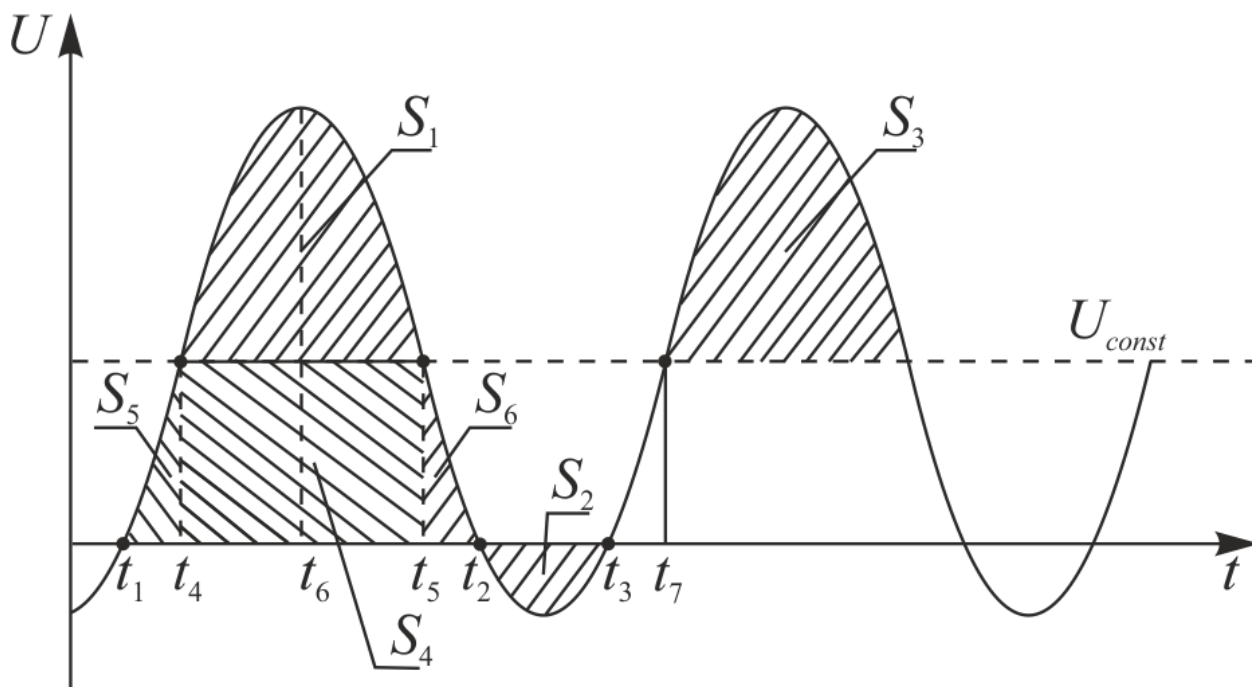


Рисунок 2.35 – Синусоидальный сигнал с постоянной составляющей

Поскольку S_5 и S_6 лежат симметрично относительно нормали к оси абсцисс, опущенной из максимума функции, площади этих фигур равны:

$$S_5 = S_6 \quad (2.25)$$

Общая площадь фигуры, заключенной под графиком синуса, равна:

$$S_{\text{общ}} = S_1 + S_5 + S_6 + S_4 \quad (2.26)$$

где S_1 – площадь фигуры выше постоянной составляющей, S_5 – площадь фигуры, ограниченная точками t_1 и t_4 , S_6 – площадь фигуры, ограниченная точками t_5 и t_2 , S_4 – площадь фигуры ниже постоянной составляющей, ограниченная точками t_1 и t_4 .

Из выражения (2.28) выразим площадь S_4 :

$$S_4 = S_{\text{общ}} - S_1 - S_5 - S_6 \quad (2.27)$$

Согласно графическому смыслу интеграла получим численное значение площадей:

$$S_1 = S_3 = \int_0^{\frac{1}{2 \cdot f}} \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt \quad (2.28)$$

где f – частота.

$$S_4 = \int_{t_4}^{t_5} U_{\text{const}} \cdot t dt \quad (2.29)$$

$$S_5 = S_6 = \int_{t_5}^{t_2} \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt \quad (2.30)$$

Подставив (2.28), (2.29) и (2.30) в уравнение (2.27), получим:

$$\begin{aligned} & \int_{t_4}^{t_5} U_{\text{const}} \cdot t dt = \\ & = \int_{t_1}^{t_2} \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt - \int_0^{\frac{1}{2 \cdot f}} \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt - 2 \cdot \int_{t_5}^{t_2} \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt \\ & U_{\text{const}} \cdot (t_5 - t_4) = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_2) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_1) + \\ & + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{1}{2 \cdot f}\right) - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0) + \\ & + 2 \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_2) - 2 \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_5) \end{aligned}$$

Преобразовав полученное уравнение, просуммировав однородные слагаемые, упростим выражение:

$$U_{const} \cdot \frac{1}{2 \cdot f} = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \left[\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_2) - \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_1) - \right. \\ \left. - \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{1}{2 \cdot f}\right) + \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0) - 2 \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_2) + \right. \\ \left. + 2 \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_5) \right]$$

Выразив из уравнения U_{const} , получим:

$$U_{const} = \frac{1}{\pi} \left[\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_1) + \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{1}{2 \cdot f}\right) - \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0) + \right. \\ \left. + \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_2) - 2 \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_5) \right] \quad (2.31)$$

При этом, t_1 и t_2 можно определять компаратором, сравнивая значения входного сигнала с нулем напряжения, а t_5 определим следующим образом:

$$t_5 = t_6 + \frac{1}{2} \cdot f \quad (2.32)$$

При этом:

$$t_6 = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{2} \quad (2.33)$$

Подставив (2.33) в (2.32), получим:

$$t_5 = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{2} + \frac{1}{2} \cdot f \quad (2.34)$$

Определение постоянной составляющей гармонического сигнала сводится к контролю мгновенных значений напряжений и времени перехода через ось абсцисс.

ВЫВОДЫ

Проведенные во второй главе исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Увеличение температуры контактного соединения происходит из-за разности в мощности нагрева и охлаждения, чем она выше, тем быстрее происходит изменения температуры.

2. Длительность переходного процесса термоЭДС зависит от теплоемкости материалов, контактного сопротивления и массы.

3. Максимальное значение возникающей термоЭДС в большей степени зависит от величины протекающего тока и практически не зависит от массы и теплоемкости.

Практической реализации проведенных теоретических исследований посвящен следующий раздел диссертации

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ТЕРМОЭДС

В третьей главе описаны результаты исследований, которые проведены автором при проектировании системы мониторинга контактного соединения в сети электроснабжения термоэлектрическим методом.

Материалы, представленные в третьей главе, нашли отражение в публикациях автора [**Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден. – Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

3.1 Экспериментальная установка для определения термоЭДС

Для определения возможности контроля переходного сопротивления контактной группы была разработана и изготовлена экспериментальная установка, включающая развязывающий трансформатор, разделяющий гальваническую связь сторонних потребителей и объект исследования. Во вторичной сети была создана электрическая цепь, имитирующая обычную сеть потребителя промышленной частоты с напряжением 220 В. В качестве объекта контроля выступала термопара никель-константан, включенная последовательно с одним из узлов потребителя. В качестве нагрузочного устройства выступал электронагреватель бытовой различной мощности, в котором присутствовала только активная нагрузка. В качестве нагревателя контактной группы использовалась лабораторная плита ПЛ-01 с функцией стабилизации температуры, позволяющая производить нагрев до 300 градусов Цельсия.

Для выделения возникающей термоЭДС использовался двухступенчатый активный фильтр на операционном усилителе, что

позволило добиться фильтрации постоянной составляющей переменного сигнала.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.1.

В ходе эксперимента включалось нагрузочное устройство (электрическая плита лабораторная ПЛ-01) и происходил нагрев термопары. С течением времени происходил рост температуры термопары и, соответственно, рост термоЭДС. Возникающая термоЭДС фильтровалась активным фильтром, усиливалась операционным усилителем, инвертировались отрицательные полуволны для удобства обработки. После этого полученный сигнал оцифровывался и передавался в персональный компьютер.

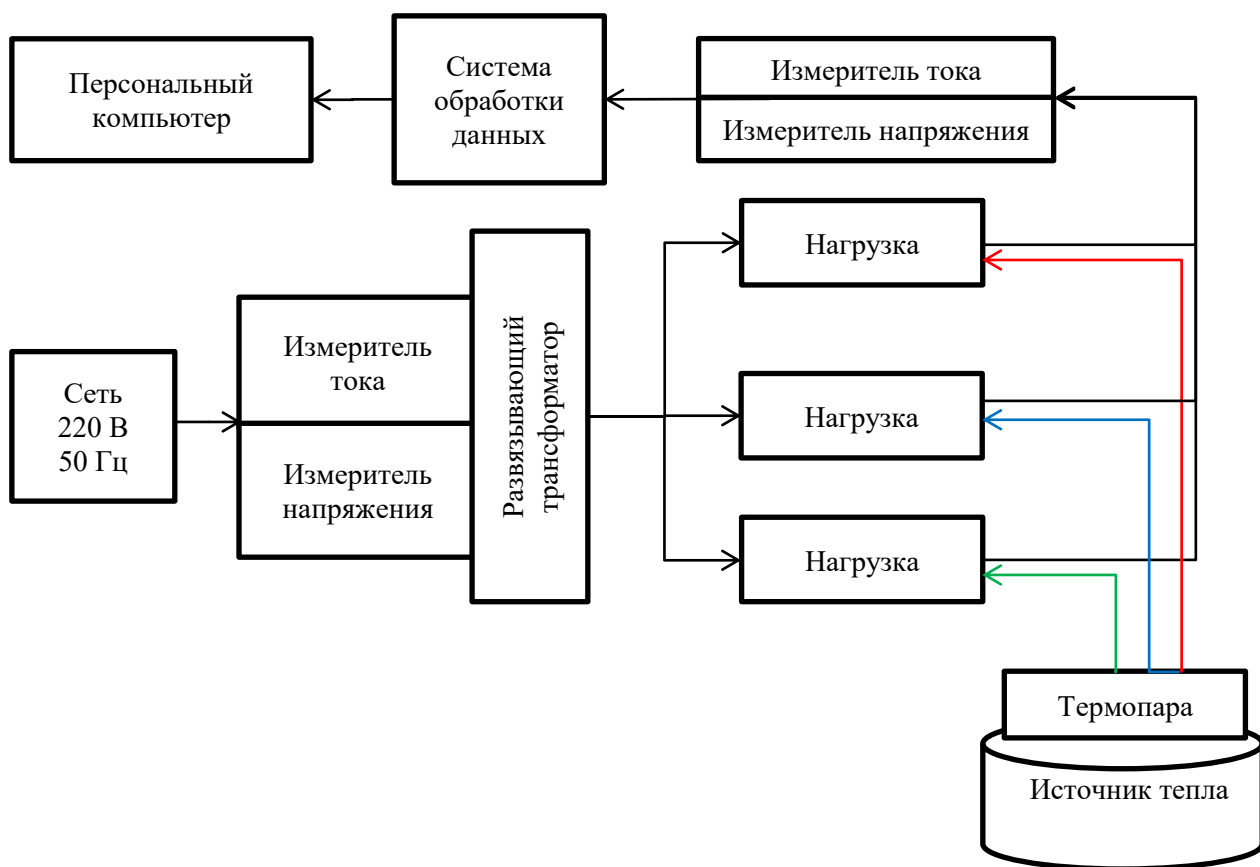


Рисунок 3.1 – Схема эксперимента

Нагрев термопары производился до температуры ~ 300 градусов Цельсия, что соответствует температуре плавления поливинилхлоридной изоляции. В данном случае сигнал имел следующий вид:

$$U(t) = 220 \sin(314 \cdot t) + U_{EMF}, \quad (3.1)$$

Используя активный фильтр, получили значения напряжения, представленные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Экспериментальные данные

Номер измерения	Номер измерения	Постоянная составляющая напряжения, мВ	Время от начала измерения, с	Номер измерения.	Номер измерения	Постоянная составляющая напряжения, мВ	Время от начала измерения, с
0	49445	0	9,889	256	49471	1,248888713	9,8942
7	49446	0,034179688	9,8892	257	49472	1,251883323	9,8944
15	49447	0,073242188	9,8894	255	49473	1,25	9,8946
34	49448	0,166015625	9,8896	254	49474	1,240234375	9,8948
49	49449	0,239257813	9,8898	251	49475	1,225585938	9,895
66	49450	0,322265625	9,89	247	49476	1,206054688	9,8952
82	49451	0,400390625	9,8902	241	49477	1,176757813	9,8954
98	49452	0,478515625	9,8904	234	49478	1,142578125	9,8956
113	49453	0,551757813	9,8906	226	49479	1,103515625	9,8958
127	49454	0,620117188	9,8908	219	49480	1,069335938	9,896
140	49455	0,68359375	9,891	209	49481	1,020507813	9,8962
154	49456	0,751953125	9,8912	199	49482	0,971679688	9,8964
167	49457	0,815429688	9,8914	187	49483	0,913085938	9,8966
178	49458	0,869140625	9,8916	175	49484	0,854492188	9,8968
189	49459	0,922851563	9,8918	163	49485	0,795898438	9,897
200	49460	0,9765625	9,892	150	49486	0,732421875	9,8972
209	49461	1,020507813	9,8922	135	49487	0,659179688	9,8974
219	49462	1,069335938	9,8924	122	49488	0,595703125	9,8976
226	49463	1,103515625	9,8926	108	49489	0,52734375	9,8978
233	49464	1,137695313	9,8928	92	49490	0,44921875	9,898
239	49465	1,166992188	9,893	75	49491	0,366210938	9,8982
244	49466	1,19140625	9,8932	60	49492	0,29296875	9,8984
247	49467	1,206054688	9,8934	44	49493	0,21484375	9,8986
252	49468	1,23046875	9,8936	27	49494	0,131835938	9,8988
255	49469	1,245117188	9,8938	10	49495	0,048828125	9,899
257	49470	1,254882813	9,894	3	49496	0,014648438	9,8992

По полученным данным с измерителя построим график для большей наглядности (рис.3.2).

Сигнал после активного фильтра

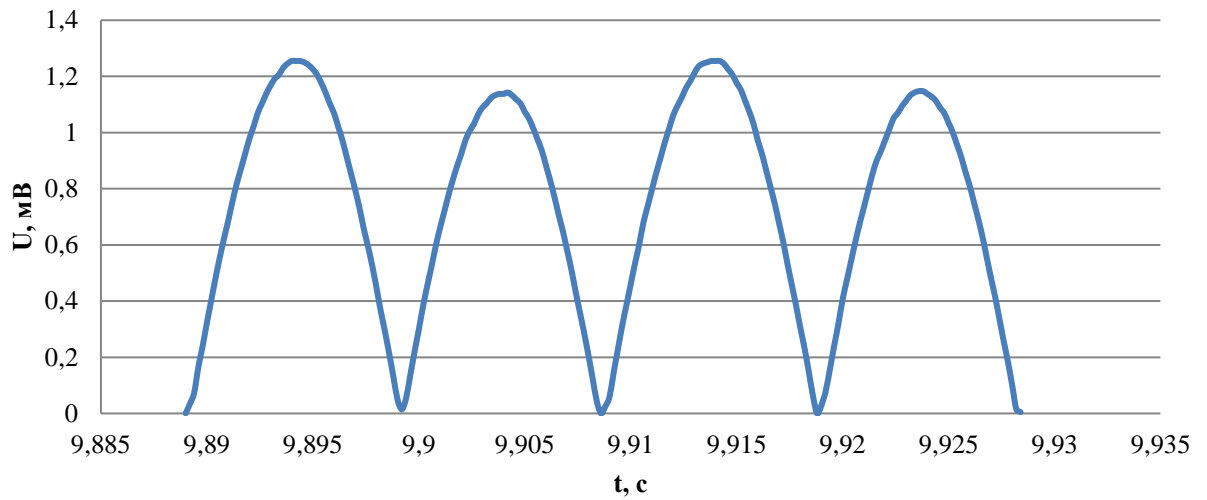


Рисунок 3.2 – Экспериментальные данные, полученные после фильтрации

Определив все экстремумы на измерительном промежутке времени, получим следующий график, приведенный на рисунке 3.3.

Экстремумы на протяжении нагрева

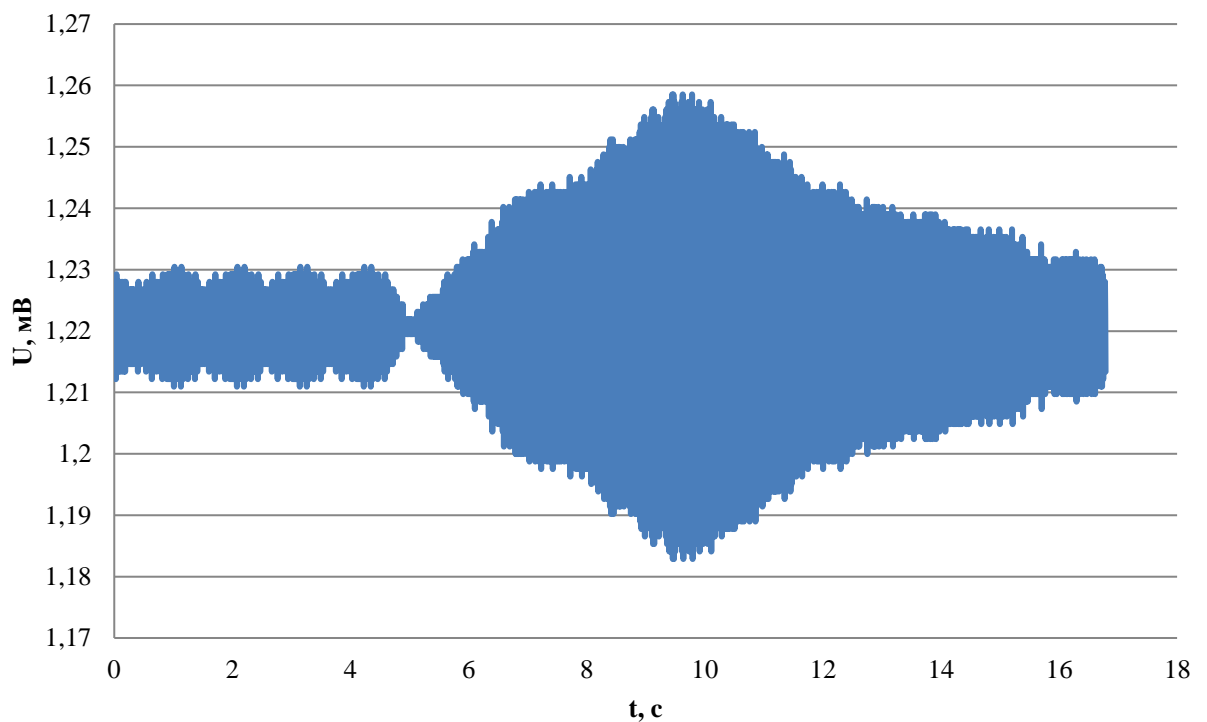


Рисунок 3.3 – Экстремумы функции, на промежутке времени от 0 до

Полученные данные подвергли обработке, при этом из максимального экстремума вычитался соседний минимальный экстремум. Полученный результат представлен на рис.3.4.



Рисунок 3.4 – Сигнал термоЭДС после обработки

На приведенном графике виден естественный фон постоянной составляющей гармонического сигнала, равный примерно 2,5 мВ. В момент времени ~ 5 секунд начинаем нагревать термопару, при этом начинается рост термоЭДС, в момент времени 10 секунд нагрев остановили, и происходит процесс естественного охлаждения. Напряжение $\sim -17,5$ мВ соответствует температуре 400 °С. Как видно из полученного графика, предложенный метод позволяет с высокой достоверностью определять изменения в термодинамических показателях системы посредством контроля термоЭДС контактных соединений.

При отсутствии нагрева разница между максимальным экстремумом и минимальным близка к нулю. На рис.3.5 показано выходное напряжение

активного фильтра при отсутствии нагрева термопары.



Рисунок 3.5 – Диаграмма напряжений на выходе активного фильтра при отсутствии нагрева термопары

Экстремумы на протяжении нагрева

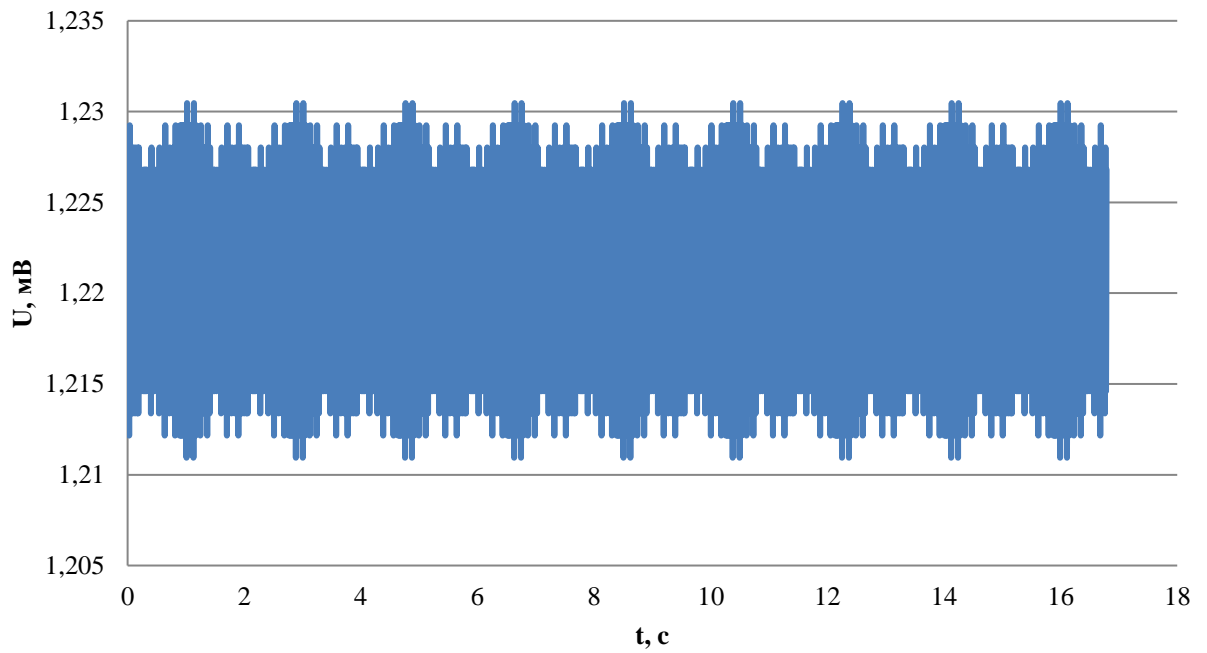


Рисунок 3.6 – экстремумы напряжений при отсутствии нагрева

Разница между макс и мин

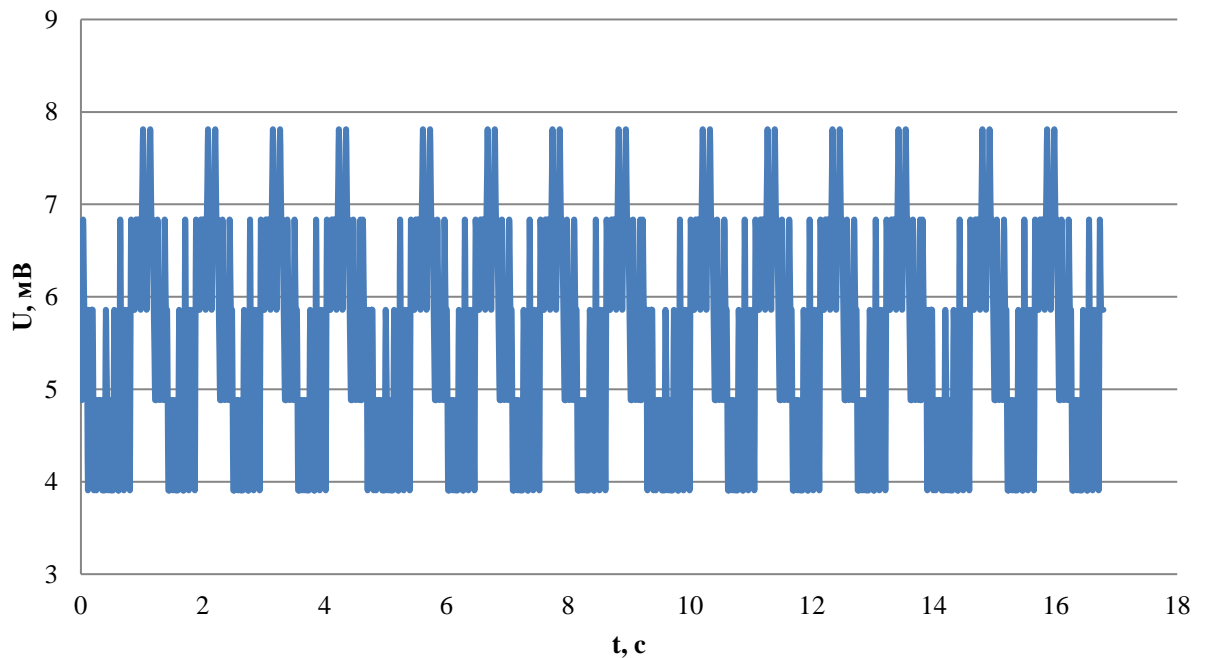


Рис. 3.7 – Сигнал термоЭДС после обработки при отсутствии нагрева термопары

Из вышеприведенных графиков видно наличие постоянной составляющей гармонического сигнала, которое находится в фоновом значении сети. Изменение постоянной составляющей с течением времени происходит в пределах гармонических колебаний и не ведет к изменению характера колебаний. Из чего следует, что контакты на данном участке сети находятся в надлежащем качестве.

3.2 Экспериментальные исследования зависимости термоЭДС от контактного сопротивления

Для исследования зависимости термоЭДС от контактного сопротивления экспериментальная установка была модернизирована. Вместо термопары использовали контактное соединение в виде розетки и вилки. Розетка стандартная, трехконтактная, с медными контактами и стальным винтом и пластиной, зажимающей питающий медный проводник. Схема модернизированной установки приведена на рисунке 3.7.

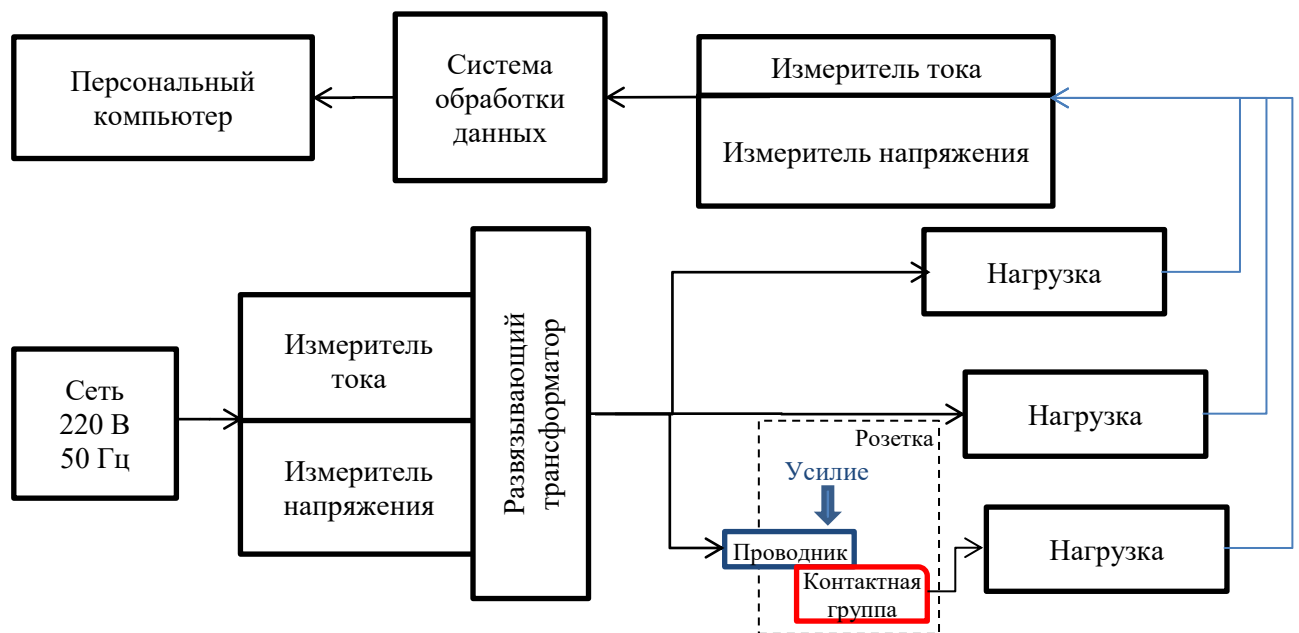


Рисунок 3.8 – Схема экспериментальной установки

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Пользователь подает на персональный компьютер команду начать записывать данные измерений напряжений и токов в специальный буфер. Персональный компьютер начинает процесс обмена данными между измерителем и буфером для сохранения полученных результатов. Обмен происходит до тех пор, пока либо не заполнится буфер, либо не будет подана команда на остановку приема данных от измерителя.

Субъект контроля начинает изменять усилие прижатия проводника к контактной группе до тех пор, пока не появится слабый контакт, но не будет

продавлена оксидная пленка. В данном случае для создания оксидной пленки медный проводник нагревался до температуры 500 °С в течение недели до образования характерной окисной пленки. При этом контактное сопротивление варьировалось от 1 до 20 Ом, в зависимости от расстояния между контактами измерителя.

Для разных значений контактного сопротивления было проведено измерение и определение постоянной составляющей гармонического сигнала.

На графике приведены результаты нескольких экспериментов. В качестве базисных условий взята контактная пара медь-алюминий. Медный образец нагревался лабораторной плитой ПЛ-01 до температуры 500 °С для появления окисной пленки с высоким сопротивлением. Проведя серию экспериментов с одинаковыми начальными условиями, можно сделать вывод о повторяемости результатов эксперимента, а именно изменение термоЭДС от температуры в переменном сигнале промышленной частоты, в контактной паре медь-алюминий сохраняется во всех экспериментах.

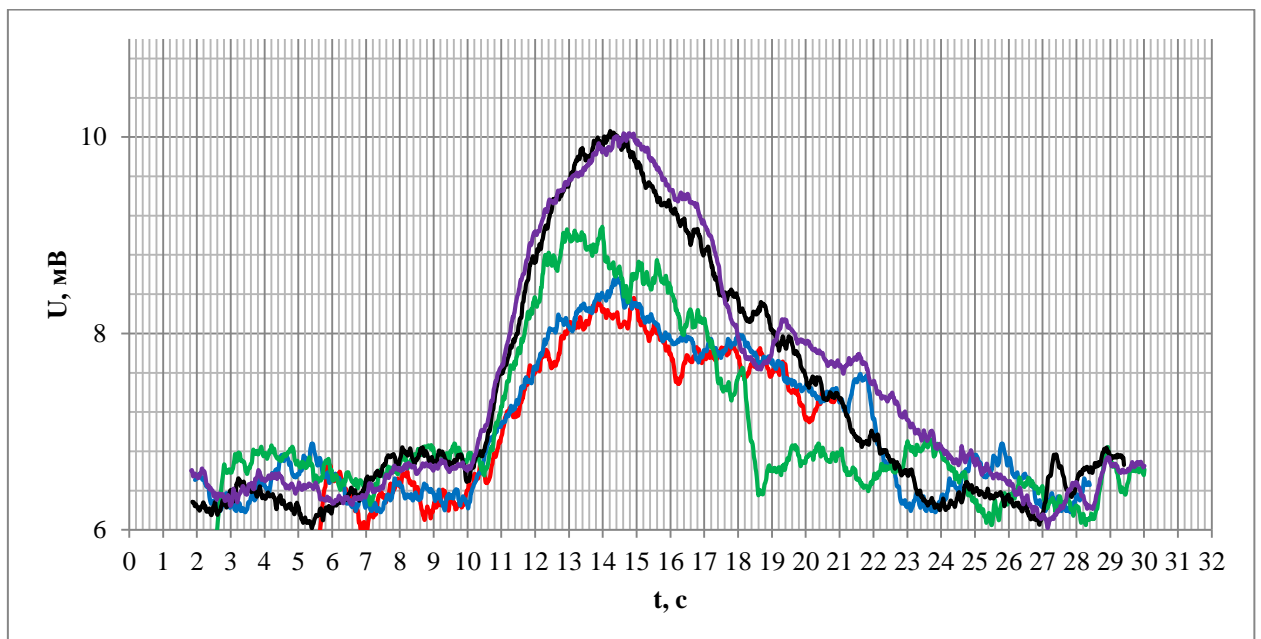


Рисунок 3.9 – Диаграмма напряжений по результатам серии экспериментов

3.3 Система мониторинга контактного соединения

Для мониторинга контактного соединения в сети электропитания без отключения нагрузки была разработана система мониторинга контактного соединения «СМКС-1». Структурная схема разработанной системы мониторинга контактного соединения представлена на рис.3.10.

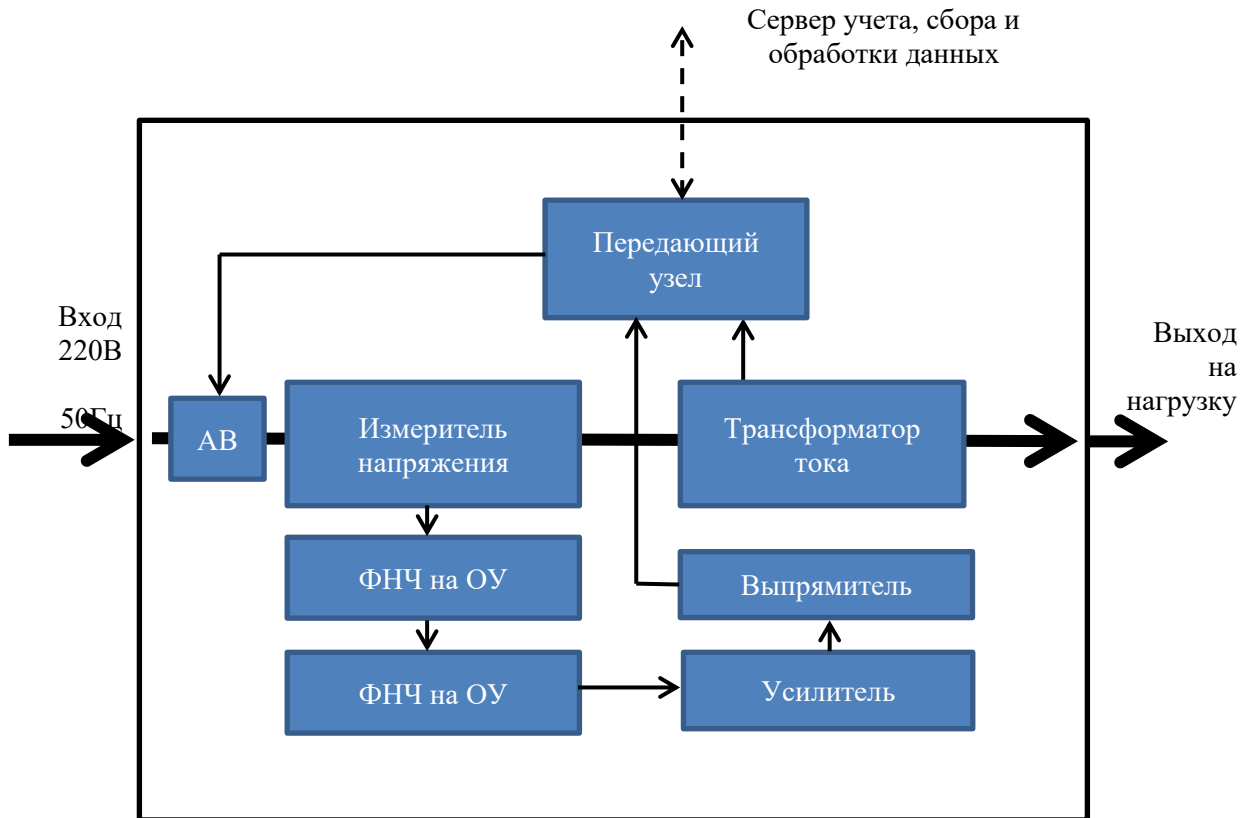


Рисунок 3.10 – Структурная схема системы мониторинга контактного соединения «СМКС-1»

Система мониторинга контактного соединения «СМКС-1» работает следующим образом: напряжение сети проходит через автоматический выключатель (АВ), измеритель напряжения и трансформатор тока, не изменяясь, попадает на нагрузку. Сигнал о характере напряжения с измерителя поступает на резистивно-емкостной делитель напряжения, далее на активный фильтр низких частот и затем на усилитель, в котором усиливаются в 1000 раз. С усилителя сигнал поступает в выпрямитель для получения положительного значения. Полученные данные посредством передающего узла передаются на сервер учета, сбора и обработки

информации. Вместе с сигналом напряжения на сервер учета, сбора и обработки информации поступает сигнал с трансформатора тока о величине тока.

На сервере учета, сбора и обработки информации алгоритм программы контролирует момент включения нагрузки, анализирует величину тока и скорость изменения постоянной составляющей гармонического сигнала напряжения. Если эти значения находятся выше границы допустимых значений (определенных на текущий момент экспериментальным путем), то контролирующий орган сервера дает управляющий сигнал исполнительному органу АВ отключить нагрузку от сети и посылает информационное сообщение на оперативный пункт о высокой вероятности неправильной работы контактного соединения в электросети потребителя.

До тех пор, пока оперативный персонал или ответственное лицо не проверят наличие вероятного места возникновения большого переходного сопротивления контактов в соединителе и не подтвердят правильность работы электросети потребителя, автоматический выключатель не может быть включен.

Предлагаемая система предупреждения возникновения возгорания предлагается осуществлять следующим образом (рис. 3.11):

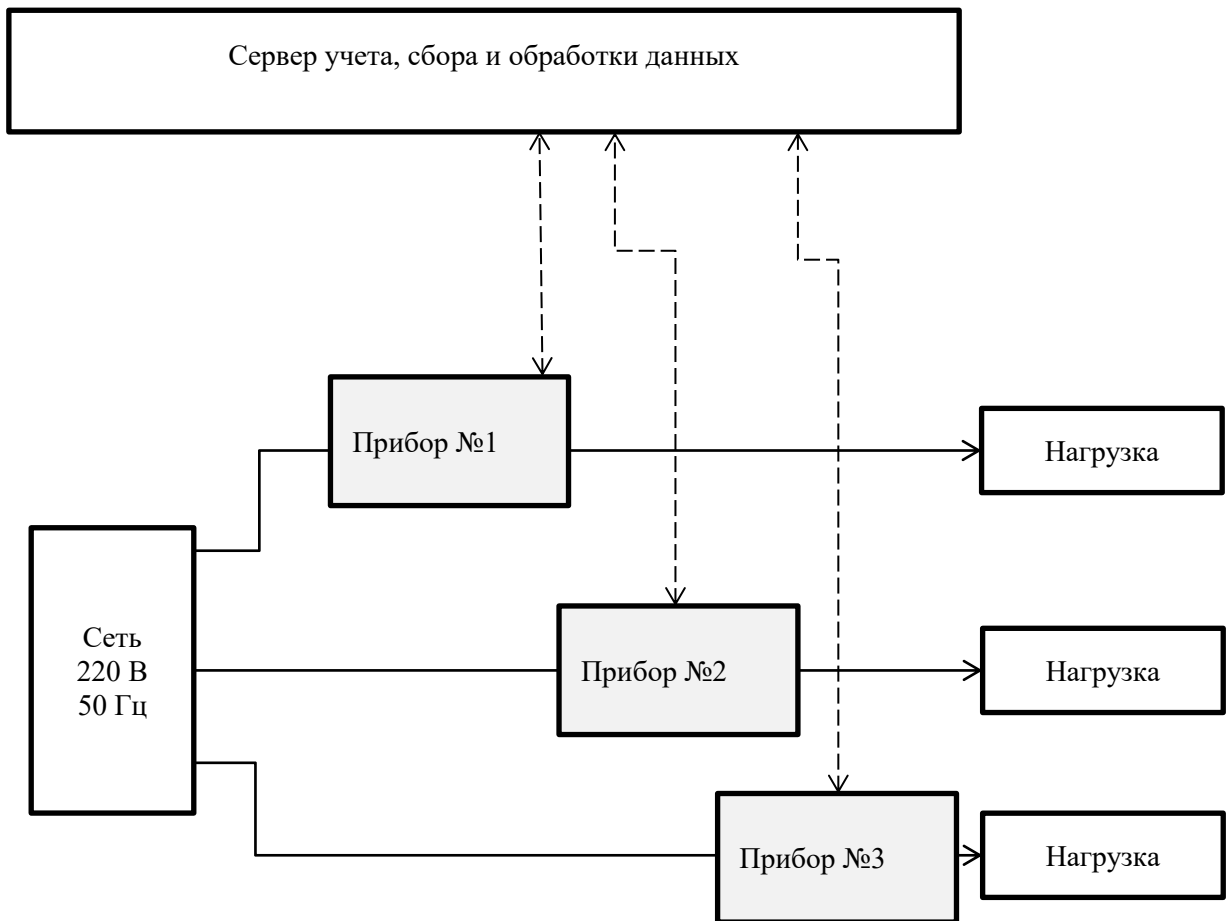


Рисунок 3.11 – работа системы предупреждения аварийных ситуаций, связанных с плохим контактным соединением

Установка прибора на каждую розетку или лампочку нецелесообразно как с экономической точки зрения, так и с практической, поскольку необходимо обеспечить высокую скорость передачи данных от передающего узла прибора на сервер учета, сбора и обработки данных, и чем больше приборов, тем выше производительность нужно иметь у сервера. Поэтому было предложено контролировать вводные кабели отдельных групп потребителей, ограниченных одной территорией. В результате чего, в случае отключения потребителей, которыми могут быть как объекты социального значения, так и промышленно-производственные помещения, снижение производительности отдельных предприятий будет незначительной.

При этом система обеспечит надежную защиту от возгораний при нагреве проводника из-за неправильно работающей электрической сети.

ВЫВОДЫ

В результате выполненной работы:

1. Предложен и исследован термоэлектрический метод для диагностики контактного сопротивления, основанный на изменении термоЭДС контактной пары при ее нагреве за счет тока нагрузки потребителя. Показано, что при нагреве контактного соединения за счет протекания тока потребителя и использовании в контактном соединении разных материалов в соответствии с эффектом Зеебека появляется термоЭДС.

2. Предложен способ выделения напряжения термоЭДС из суммарного напряжения сети электроснабжения, основанный на разделении переменной и постоянной составляющей в сети электроснабжения.

2. Разработана модель для исследования термоЭДС контактных пар, позволяющая изменять параметры контактных пар в широком диапазоне величин.

3. Разработана экспериментальная установка для детектирования большого переходного сопротивления контактов на основе мониторинга термоЭДС.

4. Разработан способ локализации мест большого переходного сопротивления контактов, основанный на анализе скорости изменения термоЭДС при включении и отключении нагрузки.

5. Проведены теоретические и экспериментальные исследования зависимости термоЭДС от качества контактного соединения.

6. Разработан макетный образец устройства, внедренный в АО «НПЦ «Полус» и проведены его испытания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы:

1. Предложен и исследован термоэлектрический метод для диагностики контактного сопротивления, основанный на изменении термоЭДС контактной пары при ее нагреве за счет тока нагрузки потребителя. Показано, что при нагреве контактного соединения за счет протекания тока потребителя и использовании в контактном соединении разных материалов в соответствии с эффектом Зеебека появляется термоЭДС.

2. Предложен способ выделения напряжения термоЭДС из суммарного напряжения сети электроснабжения, основанный на разделении переменной и постоянной составляющей в сети электроснабжения.

3. Разработана модель для исследования термоЭДС контактных пар, позволяющая изменять параметры контактных пар в широком диапазоне величин.

4. Разработана экспериментальная установка для детектирования большого переходного сопротивления контактов на основе мониторинга термоЭДС.

5. Разработан способ локализации мест большого переходного сопротивления контактов, основанный на анализе скорости изменения термоЭДС при включении и отключении нагрузки.

6. Проведены теоретические и экспериментальные исследования зависимости термоЭДС от качества контактного соединения.

7. Разработан макетный образец устройства, внедренный на ОАО «НПЦ «ПОЛЮС», и проведены его испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасов В. И. Методы неразрушающего контроля: учебное пособие. Ч. 1. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий / В. И. Афанасов, Н. И. Кашубский, А. А. Кузнецов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. –с. 104.
2. Бацула А. П. Конструирование радиоэлектронных устройств: учебное пособие / А. П. Бацула. –Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. –с. 53–64.
3. Блатт Ф. Дж. Термоэлектродвижущая сила металлов : пер. с англ. / Ф. Дж. Блатт [и др.] – М. : Metallurgia, 1980. –с. 248.
4. Брюханов О. Н. Тепломассообмен: учебное пособие / О. Н. Брюханов, С. Н. Шевченко. – М.: АСВ, 2005. –с. 460.
5. Бухмиров В. В. Расчет теплопередачи через непроницаемые стенки / В. В. Бухмиров, Т. Е. Созинова, Ю. С. Солнышкова. – Иваново: Ивановский гос. энергетический ун–т им. В. И. Ленина, 2015. –с. 7–8.
6. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справочник / В. П. Вавилов. –М. : Машиностроение, 1991. –с. 245.
7. Гаркушин И. К. Словарь-справочник по физико-химическому анализу / И. К. Гаркушин, М. А. Истомова. – Самара: СГТУ, 2012. –с. 184.
8. Годунов С. К. Разностные схемы (введение в теорию): учебное пособие /С. К. Годунов, В. С. Рябенкий. – М. : Наука, 1977. –с. 210–212.
9. Гордов А. Н. Основы температурных измерений / А. Н. Гордов, О. М. Жагулло, А. Г. Иванова. – М. : Энергоатомиздат, 1992. –с. 302.
10. ГОСТ 6402-70. Шайбы пружинные. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2006. – 6 с.
11. Гулд Х. Компьютерное моделирование в физике / Х. Гулд, Я. Тобочник. –М. : Мир, 2001. –752 с.
12. Задорожный Н. А. Распределение Ферми – Дирака. Явление Зеебека / Н. А. Задорожный [и др.]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. –с. 86.

13. Звездина Н. А. Молекулярная физика. Термодинамика / Н. А. Звездина [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Уральского Федерального ун-та. – 2015. – с. 4–6.
14. Зигель Р. Теплообмен излучением: Пер. с англ / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М. : Изд-во «Мир», 1975. –124 с.
15. Ковеня В. М. Методы конечных разностей и конечных объемов для решения задач математической физики: учебное пособие / В. М. Ковеня, Д. В. Чирков. – Новосибирск: НГУ, 2013. –С. 24–26.
16. Коротких А. Г. Теплопроводность материалов /А. Г. Коротких. – Томск: Изд-во Том. Политехн. ун-та, 2011. –23–25 с.
17. Крайнов А. Ю. Численные методы в задачах теплопереноса / А. Ю. Крайнов, Ю. Н. Рыжих, А. М. Тимохин. –Томск: ТГУ, 2009. –58 с.
18. Краус А. Д. Охлаждение электронного оборудования / А. Д Краус. – Л. : Энергия, 1979. –70 с.
19. Кузнецов И. А. Термоэлектрические датчики для контроля качества материалов и изделий без разрушения / И. А. Кузнецов // Дефектоскопия. – 1973. –№1. –С. 5–12.
20. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М. : Атомиздат, 1979. –120-123 с.
21. Лившиц Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапоткин, Я. Л. Линецкий. – М. : Metallurgiya, 1980. –229–235 с.
22. Лухвич А. А. Структурная зависимость термоэлектрических свойств и неразрушающий контроль / А. А. Лухвич, В. И. Шарандо, А. С. Каролик. – Мн. : Наука и техника, 1990. –192 с.\
23. Мартинсон Л. К. Квантовая физика / Л. К. Мартинсон, Е. В. Смирнов. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. –352–354 с.
24. Порохов А. М. Физическая энциклопедия / А. М. Порохов. – М. : Большая Российская энциклопедия, 1998. –98–99 с.

25. Прохоров А. М. Физическая энциклопедия. / Прохоров А. М. – М. : Советская энциклопедия, 1998. –97–98 с.
26. Путилов К. А. Курс физики: учеб. пособие. Т. II. Учение об электричестве / К. А. Путилов. – М. : Гостехтеориздат, 1954. –156 с.
27. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : Либрококом, 2009. –13–14 с.
28. Светозаров В. В. Основы статической обработки результатов измерений: учебное пособие / В. В. Светозаров. – М. : Изд-во МИФИ, 1983. – 40 с.
29. Сивухин С. Д. Общий курс физики / С. Д. Сивухин. – М. : Наука, 1977. -Т. 3. Электричество. –481–487 с.
30. Технические характеристики листовых материалов номакон : технические словия / «Номакон» ТУ РБ 100009933.004;
31. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1972. –552-555 с.
32. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ / Х. Уонг. – М. : Атомиздат, 1979. –22с.
33. Флоренцев С.Н. Тенденции развития силовой электроники начала тысячелетия / С. Н. Флоренцев // Электроника. –2003. –№ 6. –С. 3–9.
34. Шевченко О. Ю. Основы физики твердого тела: учебное пособие / О. Ю Шевченко. –СПб. : Изд-во СПбГУ ИТМО, 2010. –31–35 с.
35. Anatyshuk L. I. On the discovery of thermoelectricity by volta. Journal of thermoelectricity. Черновцы: Институт термоэлектричества Национальной академии наук и Мин. Обр. и науки Украины, 2004. №2. С. 5–10.
36. Carreon H. Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing // J. Appl. Phys. 2000. Vol.88, Issue 11. P. 6495.
37. Carreon H. Thermoelectric nondestructive evaluation of residual stress in shot-peened metals / H. Carreon, P.B. Nagy, V.P. Blodgett. – Res. Nondestr. Eval. 14, 2002. – p 59-80.

38. Control system for device «thermotest» / A. A. Soldatov [et al.] // XII International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2016. P. 1–5.
39. Nagy P. B. Thermoelectric NDE for thermal aging of cast stainless steel reactor components / Peter B. Nagy, Santosh Raja. –24 p.
40. Surface inspection problems in thermoelectric testing / A. A. Abouellail [et al] // MATEC Web Conf. 2017. Vol. 102.
41. United States Patent. US 7,445,727 B2. Nov. 4. 2008.
42. Engelhardt, R. & Hewgley, W.. (1973). Thermal and infrared testing.
43. Mix, Paul. (2005). Thermal/Infrared Testing Method. 10.1002/0471719145.ch10.
44. Mathew, Teena & Manickavasagan, Annamalai. (2014). Thermal Infrared Imaging. Imaging with Electromagnetic Spectrum: Applications in Food and Agriculture. 147-173. 10.1007/978-3-642-54888-8_8.
45. Vavilov, Vladimir. (2009). Thermal/infrared nondestructive testing, NDT handbook series. Spektrum. 5. 1-467.
46. Carreon H. Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing.—Journal of Applied Physics. 2000, Vol.88, Issue 11, pp. 6495. doi: 10.1063/1.1322591.
47. Carreon H. Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals —Research in Nondestructive Evaluation 2002. Vol.14, Issue 2. pp. 59. doi: 10.1080/09349840209409705.
48. Nagy P.B. Non-destructive methods for materials' state awareness monitoring —Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2010. Vol.52, Issue 2. pp. 61. doi: 10.1784/insi.2010.52.2.61.
49. Li J.F., Liu W.S., Zhao L.D., Zhou M. // Npg Asia Mater. 2010. Vol.2, Issue 4, pp. 152. doi: 10.1038/asiamat.2010.138.
50. M. Kikuchi, “Dental alloy sorting by the thermoelectric method,” European Journal of Dentistry, Vol.4, no.1, pp.66-70, 2010.

51. Sorting mixed metals by the thermoelectric effect 1976 *Physics Education* Vol.11, Issue 4, pp.290-292, <https://doi.org/10.1088/0031-9120/11/4/004>.

52. Stuart, C.M., the Seebeck effect as used for the nondestructive evaluation of metals, *Journal Name: Int. Adv. Nondestr. Test.; (United States); Journal Volume: 9, (1983)*.

53. Stuart, C., "Thermoelectric Differences Used for Metal Sorting," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 15, No. 4, 1987, pp. 224-230, <https://doi.org/10.1520/JTE11013J>. ISSN 0090-3973.

54. Hu J., Nagy P.B. (1999) On the Thermoelectric Effect of Interface Imperfections. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 18B, pp. 1487-1494, Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4791-4_191.

55. A. A. Lukhovich, V. I. Sharando, A. Karasik, "Structural dependence of thermoelectric properties and nondestructive testing," *Mn.: Science and Technology*, pp. 192, 1990.

56. I. A. Kuznetsov, "Thermoelectric sensors for quality control of materials and products without destroying" *Defectoscopy*, Vol.1, pp. 5-12, 1973.

57. J.F. Li, W.S. Liu, L.D. Zhao, M. Zhou High-performance nanostructured thermoelectric materials *Npg Asia Materials*, Vol.2 (2010), pp. 152–158.

58. T. M. Ritzer, P. G. Lau and A. D. Bogard, "A critical evaluation of today's thermoelectric modules," *Thermoelectrics*, 1997. *Proceedings ICT '97. XVI International Conference on, Dresden, 1997*, pp. 619-623. doi: 10.1109/ICT.1997.667606.

59. Buist, Richard J. "A new method for testing thermoelectric materials and devices." *11th International Conference on Thermoelectrics*. 1992.

60. Bünyamin Ciylan, Sezayi Yılmaz, Design of a thermoelectric module test system using a novel test method, *In International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, Issue 7, 2007, Pages 717-725, ISSN 1290-0729, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.10.008>.

61. K. Uchida, et. Al., Thermal spin pumping and magnon-phonon-mediated spin-Seebeck effect, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 111, 103903 (2012)
62. K. Uchida, et. Al., Observation of the spin Seebeck effect, *Nature*, Vol 455| 9 October 2008| doi:10.1038/nature07321
63. N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Solid State Physics* (Saunders College, Philadelphia, 1976)
64. A.Y. FARAJI and A. AKBARZADEH Design of a Compact, Portable Test System for Thermoelectric Power Generator Modules *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 42, No. 7, 2013. DOI: 10.1007/s11664-012-2314-0
65. Gooch, Jan. (2011). Seebeck Effect. 10.1007/978-1-4419-6247-8_10421.
66. D.M. Rowe, *Handbook of Thermoelectrics: Macro to Nano*, CRC Press Dec 09, 2005.
67. Segall, A. E. "Solutions for the correction of temperature measurements based on beaded thermocouples." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44, no. 15 (2001): 2801-2808.
68. Yang Zhou, Donghua Yang, Liangliang Li, Fu Li, and Jing-Feng Li, Fast Seebeck coefficient measurement based on dynamic method. *Review of Scientific Instruments* 85, 054904 (2014); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4876595>
69. Semiconductor devices – Semiconductor devices for energy harvesting and generation – Part 2: Thermo power based thermoelectric energy harvesting
70. J.P. Carmo, Joaquim Antunes, M.F. Silva, J.F. Ribeiro, L.M. Goncalves, J.H. Correia, Characterization of thermoelectric generators by measuring the load-dependence behavior, In *Measurement*, Volume 44, Issue 10, 2011, Pages 2194-2199, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.015>.
71. Zu-Guo Shen, Shuang-Ying Wu, Lan Xiao, Gang Yin, Theoretical modeling of thermoelectric generator with particular emphasis on the effect of side surface heat transfer, In *Energy*, Volume 95, 2016, Pages 367-379, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.005>.

72. J.P. Carmo, J.F. Ribeiro, M.F. Silva, L.M. Goncalves, J.H. Correia, Thermoelectric generator and solid-state battery for stand-alone microsystems, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20 (8) (2010), pp. 1-8.

73. J. Jiang, L. Chen, S. Bai, Q. Yao, Q. Wang, Thermo-electric properties of p-type crystals prepared via zone melting, *Journal of Crystal Growth*, 277 (2005), pp. 258-263

74. L.W. da Silva, K. Massoud, Citrad Uher, Thermo-electric performance of films in the Antimony-tellurium and antimony-tellurium systems, *Journal of Applied Physics*, 97 (2005)

75. M.Y. Kim, T.S. Oh, Thermoelectric characteristics of the thermopile sensors with variations of the width and the thickness of the electrodeposited bismuth-telluride and antimony-telluride thin films, *Materials Transactions*, 51 (2010), pp. 1909-1913.

76. J.P. Carmo, L.M. Goncalves, J.H. Correia, Improved p-Improved p- and n-type thin-film microstructures for thermoelectricity, *Electronic Letters*, 45 (July) (2009), pp. 803-805

77. Tritt, T. M., Kanatzidis, M. G., Lyon, H. B.Jr & Mahan, G. D. Thermoelectric materials—New directions and approaches. *Mater. Res. Soc. Proc.* 478, 73–84 (1997).

78. Goldsmid, Hiroshi. (2017). The Seebeck and Peltier effects. 10.1088/978-1-6817-4641-8ch1.

79. A T Burkov, A Heinrich, P P Konstantinov, T Nakama, K Yagasaki, Experimental set-up for thermopower and resistivity measurements at 100-1300 K, *Measurement Science and Technology*, Volume 12, pp 264, 2001

80. P. H. Michael Böttger, E. Flage-Larsen, O. B. Karlsen, Terje G. Finstad, High temperature Seebeck coefficient and resistance measurement system for thermoelectric materials in the thin disk geometry, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 83, 025101 (2012)

81. Shiho Iwanaga, Eric S. Toberer, Aaron LaLonde, G. Jeffrey Snyder, A high temperature apparatus for measurement of the Seebeck coefficient, *Review of Scientific Instruments* 82, 063905 (2011); doi: 10.1063/1.3601358.

82. J.G. Gasser, Understanding the resistivity and absolute thermoelectrical power of disordered metals and alloys, *J.Phys. Condens. Matter* 20 (2008) 114103.

83. Polvani DA, Meng JF, Hasegawa M, Badding JV. Measurement of the thermoelectric power of very small samples at ambient and high pressures. *Rev Sci Instrum* 1999; 70(9):3586.

84. Boffoue O, Jacquot A, Dauscher A, Lenoir B. Experimental setup for the measurement of the electrical resistivity and thermopower of thin films and bulk materials. *Rev Sci Instrum* 2005;76.

85. Iwanaga S, Toberer ES, Lalonde A, Snyder GJ. A high temperature apparatus for measurement of the Seebeck coefficient A high temperature apparatus for measurement of the Seebeck coefficient. *Rev Sci Instrum* 2011;82.

86. Burkov AT, Heinrich A, Konstantinov PP, Nakama T, Yagasaki K. Experimental set- up for thermopower and resistivity measurements at 100 – 1300 K. *Meas Sci Technol* 2001;12.

87. de Boor J, Müller E. Data analysis for Seebeck coefficient measurements. *Rev Sci Instrum* 2013;84.

88. Powell RL, Hall WJ, Hyink CH, Sparks LL, Burns GW, et al. Thermocouple reference tables based on the IPTS-68, NBS monograph 125. National Bureau of Standards; 1974.

89. NIST. ITS-90 thermocouple database, web version 2.0. Retrieved June 30, 2017, from, https://srdata.nist.gov/its90/main/its90_main_page.html; 2017.

90. Pollock DD. Physical properties of materials for engineers. CRC Press; 1993.

91. J. de Boor and E. Muller, Data analysis for Seebeck coefficient measurements, *Review of Scientific Instruments* 84, 065102 (2013)

92. Nowicki, Michał & Lewandowska, Beata. (2019). Relative Seebeck coefficient differences used for metal sorting. AIP Conference Proceedings. 2131. 020033. 10.1063/1.5119486.

93. X.C Xuan, K.C Ng, C Yap, H.T Chua, A general model for studying effects of interface layers on thermoelectric devices performance, In International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, Issue 26, 2002, pp. 5159-5170, ISSN 0017-9310, [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00217-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00217-X).

94. Abouellail A. A., Obach I.I., Soldatov A.A., Soldatov A.I. Surface inspection problems in thermoelectric testing, MATEC Web of Conferences. 2017, Vol. 102, pp. 01001. doi: 10.1051/matecconf/201710201001.

95. Paul E. M. Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide, Second Edition. John Wiley & Sons, 2005.

96. C. Boor, "Polynomial interpolation" in A Practical Guide to Splines, 1st ed., vol.27, Springer-Verlag New York, USA, 1978, pp. 3-11.

97. Егоров Ю.П., Солдатов А.И., Цехановский С.А., Контроль металлов и сплавов методом дифференциальной термоэлектродвижущей силы // Механика и машиностроение (сб. трудов). Томск,- ТПУ,- 2000. С., стр. 145-149.

98. Kikuchi M., Dental Alloy Sorting By the Thermoelectric Method // European Journal of Dentistry. 2010;4(1):66-70.

99. Xiao Zhang, Li-Dong Zhao, Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity // Journal of Materiomics, Volume 1, Issue 2, June 2015, Pages 92-105, ISSN 2352-8478.

100. Rigol User's guide for Model DM3068 Digital Multimeter, DMM Series // Beijing, China: Rigol Technologies Inc. Oct. 2012. http://www.batronix.com/pdf/Rigol/UserGuide/DM3068_UserGuide_EN.pdf

101. Абрикосов А.А. Основы теории металлов: Учеб. руководство. –М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1987. – 520с.

102. Афанасов В.И. Методы неразрушающего контроля. Ч.1. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий: учеб.пособие/ В.И.

Афанасов, Н.И. Кашубский, А.А. Кузнецов – Красноярск: ИПК СФУ, 2009.– 104с.

103. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник.– М.: Машиностроение, 1991.– 245с.

104. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1979–07–01. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. – 21с.

105. Гулд Х. Компьютерное моделирование в физике / Х.Гулд, Я. Тобочник. – М.: Мир, 2001. – 752 с.

106. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель. АН СССР. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Л. : Наука, Лен. отд-ние, 1967. – 88 с.

107. Инженерный анализ в Ansys WorkBench: Учебн. Пособ. /В.А. Бруйка [и др.]. / Самарский гос. техн. универ. 2010.- Ч.1.- 271с.

108. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б.Каплун, Е.М.Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

109. Кокорева И. Рентгеновские методы неразрушающего контроля / И. Кокорева, Г. Щелкунов // Электроника: Наука Технология Бизнес. –Выпуск №5. –2007. – с. 84-93.

110. Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов/Б.Г. Лившиц, В.С. Крапошин, Я.Л. Линецкий, ред. Б.Г. Лившиц. –2е издат. – М.: Металлургия, 1980. – 320с.

111. Лухвич А.А., Шарандо В.И. // Дефектоскопия, 1985, № 10, с. 60–63.

112. Основы температурных измерений./ А.Н. Гордов, О.М. агулло, А.Г. Иванова.– М.: Энергоатомиздат, 1992. – 302с.

113. Светозаров В.В. Основы статической обработки результатов измерений: Учебное пособие. – М.: Изд. МИФИ,1983.– 40с.

114. Сивухин С.Д. Общий курс физики.– М.: Наука, 1977.– Т.3. Электричество.– с.481-487.

115. Физическая энциклопедия.— М.: Большая Российская энциклопедия, 1998.— Т.2.— С.76–77.— Т.5.— с.98-99.

116. Электроника. Энциклопедический словарь.— М.: Советская энциклопедия, 1991.— с.530-541, 544-545.

TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



СВЕРЖДАЮ

Директор ИИМКБ НИТПУ,

П.Ф. Баранов

» _____ 2023 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Солдатов Дмитрия Алексеевича

Комиссия в составе:

председатель: руководитель отделения электронной инженерии, к.т.н., Баранов П.Ф., члены комиссии: доцент отделения электронной инженерии, Костина М.А., доцент отделения электронной инженерии, к.т.н. Огородников Д.Н. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Солдатов Д.А. «Диагностика переходного сопротивления контактов в сети промышленной частоты термоэлектрическим методом», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, используются в учебном процессе отделения электронной инженерии инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности национального исследовательского Томского политехнического университета в методических материалах дисциплины: «Электронные промышленные устройства», а также при подготовке магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами ТПУ.

Председатель комиссии

П.Ф. Баранов

Члены комиссии

М.А. Костина

Д.Н. Огородников