

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

СОЛДАТОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Суржиков Анатолий Петрович**,

Официальные оппоненты: **Зуев Лев Борисович**  
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией физики прочности.

**Клопотов Анатолий Анатольевич**  
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры прикладной механики и материаловедения. (г. Томск).

Защита диссертации состоится «12» декабря 2023 года в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » ноября 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Шевелева Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность диссертационных исследования

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 и, следовательно, 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 поставленных целей 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.

**Объектом исследования** является большое переходное сопротивление контактов в сети промышленной частоты.

**Предметом исследования** является термоЭДС, возникающая при нагреве контактного соединения за счет протекания тока по объекту контроля.

### **Научная новизна 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, 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

### **Практическая значимость работы:**

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.

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

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

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.

### **Внедрение результатов работы**

Разработанный прибор внедрен в технологический процесс системообразующего предприятия г. Томска «АО «НПЦ «Полюс».

Полученные в работе результаты позволили полностью исключить простои, связанные с остановкой технологического цикла для ревизии контактных соединений на одной из производственных линий.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в отделении «Электронная инженерия» инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета в учебной дисциплине «Электронные промышленные устройства», а также в учебных исследовательских и научных исследовательских работах студентов.

**Достоверность полученных теоретических и экспериментальных исследований** обеспечивается корректным применением современных численных методов, многочисленными экспериментальными исследованиями, устойчивой воспроизводимостью результатов и сопоставлением результатов, полученных разными методами и другими авторами. Достоверность полученных результатов подтверждается практической разработкой прибора для определения постоянной составляющей гармонического сигнала термоэлектрическим методом.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы представлены на конференциях российского и международного уровня:

- XXII Международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения», 12–16 ноября 2018, г. Красноярск.
- IV Национальная научно-практическая конференция «приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», 6 – 7 декабря 2018 г., г. Казань.
- XIX Научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства», 16 – 17 апреля 2020г., г. Томск.
- Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020», 25 – 27 мая 2020 г., г. Томск.
- XVII международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ИННОВАТИКА-2021», 22 – 23 апреля 2021г., г. Томск.
- XX Научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства», 6 – 7 апреля 2022г., г. Томск.

### **Личный вклад автора:**

Участие в постановке задач, разработке модели для исследования термоЭДС различных контактных пар. В разработке и изготовлении экспериментальной установки, которая позволяет проводить исследования термоЭДС различных контактных пар, а также 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.

### **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 и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 122 страницы, 66 рисунков и 4 таблицы. Список использованных источников содержит 116 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В введении** обосновывается актуальность темы исследования, научная и техническая новизна, кратко излагаются содержание работы и основные защищаемые положения. Также приводится обоснование выбора объекта исследования.

**В первой главе** проведен аналитический обзор существующих видов соединения электрических контактов и видов изоляций.

Контактные соединения обеспечиваются различными методами, такими как:

- Скрутка;
- Болтовое соединение;
- Соединение клипсами (в том числе Wago);
- Наконечниками;
- Муфтами.

Изоляционные материалы делятся по типу покрытия на:

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

Также был проведен анализ 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.

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 объект контроль делится на:

- Оптический;
- Рентгеновский;
- Тепловой;
- Фотоакустический;
- Электрический;

Самым простым способом контроля контактных соединений является визуальный осмотр. Он позволяет выявить открытые дефекты в контактах, в основном вызванные нарушением технологии монтажа. Однако, при изготовлении контактного соединения возможно возникновение дефектов, которые невозможно определить при визуальном осмотре. По этой причине такие же подходы используются при получении изображения контактного соединения рентгеновским методом, ИК излучением и т.д. Анализируя полученные данные, выявляют структуру дефекта.

Существуют средства неразрушающего контроля контактов, принцип работы которых основан на оценке разных характеристик оптического излучения. К такому излучению относятся: видимое излучение (свет), инфракрасное излучение, ультрафиолетовое излучение. К достоинствам можно отнести использование недорогого оборудования, обеспечение безопасности персонала и простоту применяемого устройства. Недостаток этого метода - очень малый процент выявления дефектов. Низкая освещенность и запыленность помещения снижают точность метода.

Для рентгенографии используются устройства с одним, двумя, тремя или четырьмя источниками рентгеновского излучения. Принцип рентгеноскопии основан на свойстве рентгеновских лучей ослабевать в разной степени в зависимости от плотности исследуемого материала. Поскольку плотность дефектов выше или ниже плотности основных проводников, они проявляются на изображениях, полученных в ходе сканирования, в виде более темных или светлых по тону проекций на соответствующую плоскость, регистрирующую это излучение. Метод контроля качества контактных соединений с помощью рентгеновского излучения дает точную информацию о расположении того или иного дефекта в материале. Недостатками этого метода является:

- высокая стоимость оборудования;
- низкая скорость контроля;
- низкая мобильность контрольного оборудования;
- при применении соответствующих приборов необходимо обеспечение радиационной безопасности персонала;

Ещё одним из неразрушающих методов контроля качества контактного соединения является тепловой метод. Последний осуществляется термоиндикаторами или тепловизионной аппаратурой. Постфакторный анализ обеспечивает определение дефектов термоиндикаторами и не позволяет определить причину дефекта и время его возникновения, что может пагубно сказаться на электрооборудовании. Также применение термоиндикаторов недопустимо на токоведущих частях оборудования, что искажает данные и не позволяет объективно оценить качество контактного соединения.

Тепловизионная аппаратура позволяет проводить оперативный мониторинг качества контактного соединения, что благоприятно сказывается на электрооборудовании. При этом данный метод контроля требует дорогостоящего оборудования и специально обученного персонала. Применение данного метода позволяет обезопасить персонал и исключить необходимость прямого



взаимодействия с электрооборудованием. При этом контроль контактного соединения возможно проводить только под нагрузкой либо в момент сразу после снятия нагрузки.

Оптоакустический метод контроля основан на контроле теплофизических свойств объекта при воздействии на него интенсивным, сфокусированным, модулированным электромагнитным излучением, в частности лазером. Измерение оптоакустических сигналов в контактах - процедура сложная, поскольку требует уникального оборудования, способного с заданной чувствительностью и разрешением определить различные теплофизические свойства объекта. Данный метод эффективно используется при контроле печатных сборок с высокой плотностью монтажа.

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 на концах этого проводника появится термоЭДС в виде постоянного напряжения, величина которого прямо пропорциональна разности температур контактов проводника:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} [S_1(T) - S_2(T)] dT \quad (1)$$

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.

Анализ методов контроля электрических параметров контактных соединений показал, что наиболее перспективным из них является термоэлектрический метод, в то время как остальные обладают существенным недостатком: не позволяют проводить непрерывный мониторинг, в том числе под нагрузкой.

**Во второй главе** проведен математический расчёт тепловых процессов нагрева контактного соединения, в котором учтены физические процессы, протекающие в нагреваемом за счет тока в контактном соединении и охлаждаемом за счет теплопроводности, излучения и конвекции. Был проведен анализ влияния на возникающую термоЭДС в контактных переходных сопротивлениях различных параметров, таких как: масса, типы контактных материалов, условия окружающей среды, время, и, естественно, само контактное сопротивление.

При протекании тока через переходное сопротивление контакта на нем выделится мощность:

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

Из закона Джоуля — Ленца можно вычислить выделяемое тепло:

$$dQ = P \cdot dt = I^2 \cdot R \cdot dt \quad (3)$$

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 теплопотери за счет конвекции и излучения. Тепло, нагревающее контактное сопротивление, можно найти из выражения:

$$dQ_1 = m \cdot c \cdot \Theta \quad (4)$$

где  $m$  – масса контакта;  $c$  – удельная теплоемкость материала контакта;  $\Theta$  – превышение температуры контакта над температурой окружающей среды (перегрев):

$$\Theta = T - T_0 \quad (5)$$

где  $T$  и  $T_0$  – температуры контакта и окружающей среды соответственно.

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

$$dQ_2 = K \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt = K \cdot S \cdot \Theta \cdot dt \quad (6)$$

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

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 \quad (7)$$

Учитывая (2), (3) и (4), уравнение теплового баланса примет вид:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot \Theta + K \cdot S \cdot \Theta \cdot dt \quad (8)$$

где  $m$  – масса,  $c$  – удельная теплоемкость.

После преобразования получаем:

$$\frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} = \frac{d\Theta}{dt} + \frac{K \cdot S}{m \cdot c} \cdot \Theta \quad (9)$$

Если изменение температуры проводника происходит в небольшом диапазоне, то можно считать, что  $R$ ,  $c$ ,  $K$  будут константами. Решение дифференциального уравнения (9) примет вид:

$$\Theta = A \cdot e^{-\frac{K \cdot S}{m \cdot c} \cdot t} + \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \quad (10)$$

где  $A$  – постоянная, определяемая начальными условиями.

Начальным условием является равенство температур контакта и окружающей среды в начальный момент времени ( $t = 0$ ). Отсюда можно найти постоянную  $A$ :

$$A = -\frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \quad (11)$$

С учетом (10) выражение (9) примет вид:

$$\Theta = T - T_0 = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \cdot (1 - e^{-\frac{K \cdot S}{m \cdot c} \cdot t}) \quad (12)$$

Выражение (12) описывает зависимость температуры проводника от времени. Установившееся значение температуры наступает при  $t = \infty$ . Исходя из этого, уравнение (12) примет вид:

$$\Theta_{t=\infty} = T_{t=\infty} - T_0 = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S} \quad (13)$$

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

Умножив левую и правую части уравнения (13) на  $(K \cdot S)$ , получим:

$$I^2 \cdot R = K \cdot S \cdot (T_{t=\infty} - T_0) \quad (14)$$

Анализ уравнения (13) 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 (12), после этого получаем:

$$\Theta = T - T_0 = \Theta_{t=\infty} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (15)$$

Переменная  $\tau$  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 (15), можно сделать вывод, что установившееся значение перегрева наступит через очень длительное время. Однако для практических применений это время выбирают равным  $3\tau$ . Это время соответствует температуре перегрева порядка 90% от максимального значения  $\Theta_{t=\infty}$ .

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

$$\tau = \frac{m \cdot c}{K \cdot S - \theta}, \text{ сек} \quad (16)$$

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

$$I^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c \cdot d\theta. \quad (17)$$

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

$$\theta = \frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} \cdot t \quad (18)$$

Если в уравнении (18) вместо  $t$  использовать постоянную времени нагрева  $\tau$ , то температура проводника при отсутствии теплоотдачи будет:

$$\theta_{t=T} = \frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} \cdot \tau = \frac{I^2 \cdot R}{m \cdot c} \cdot \frac{m \cdot c}{K \cdot S} = \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot S}. \quad (19)$$

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

$$m \cdot c \cdot d\theta + K \cdot S \cdot \theta \cdot dt = 0 \quad (20)$$

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

$$\theta = \theta_{t=\infty} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (21)$$

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

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  $\alpha = 385 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ . Результаты моделирования показаны на рис.1-3.

#### *Изменение массы.*

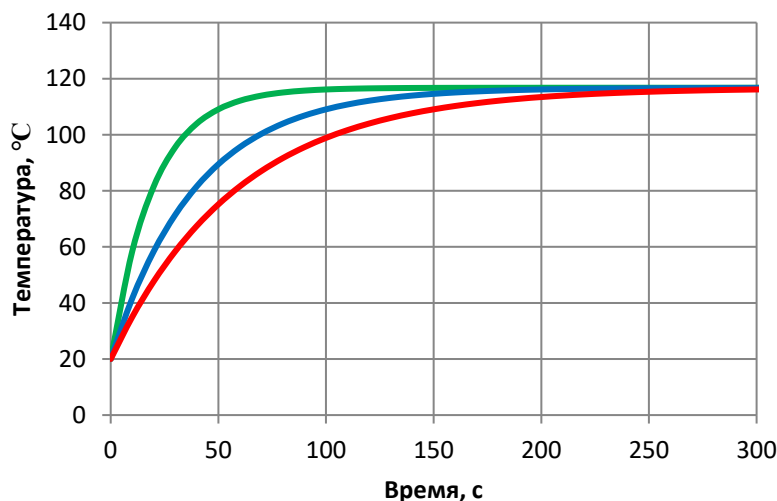


Рисунок 1 – зависимость температуры контактной пары от изменений массы при сопротивлении равном 0,1 Ом:

- 1 гр.,
- 2 гр.,
- 3 гр.

Из рис.1 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. Чем меньше суммарная масса контактного соединения, тем быстрее происходит процесс нагревания. Установившийся тепловой режим наступает через 100, 150 и 200 сек. для разных масс контактного соединения.

#### *Изменение сопротивления*

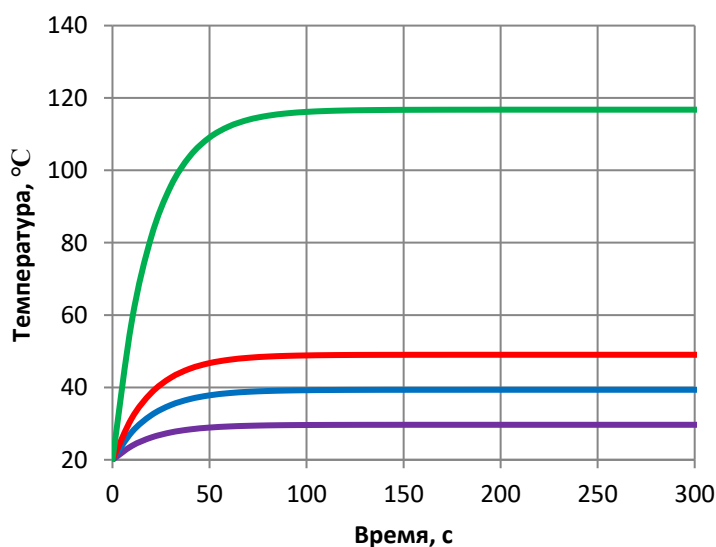


Рисунок 2 – зависимость температуры контактной пары от изменения сопротивления, при массе равной 1 гр:

- 10 мОм,
- 20 мОм,
- 30 мОм,
- 100 мОм

Как видно из рис.2, 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.

#### *Изменение материалов*

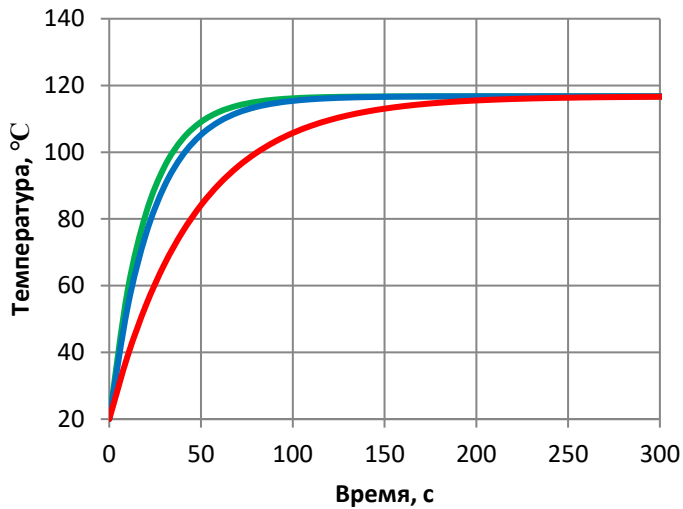
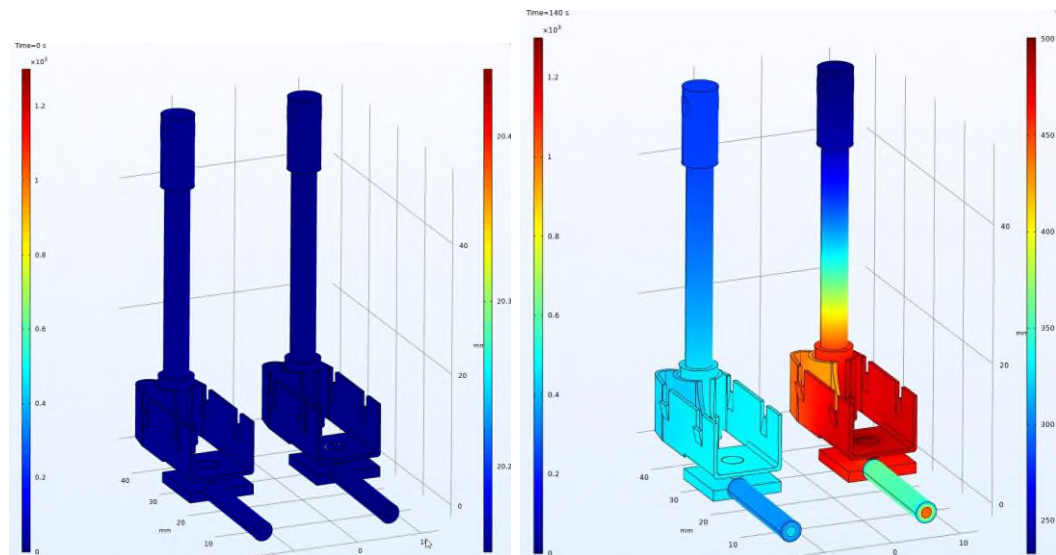


Рисунок 3 – зависимость температуры контактной пары от типа материала:  
 — медь,  
 — сталь,  
 — алюминий.

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.

Для расчета переходных процессов в контактном соединении была разработана геометрическая модель в среде AutoCAD 2019 (Russia) и конвертирована в COMSOL Multiphysics, в котором было проведено моделирование тепловых процессов. Были определены граничные условия, при которых возникают возгорания изоляции электрических проводников и время, за которое происходит нагрев. Модель учитывает все возможные физические процессы, протекающие в контактном соединении, при пропускании через него тока. Моделирование в программной среде COMSOL Multiphysics показало, что при протекании тока в 10А контактное соединение нагреется до 900 градусов Цельсия через 1000 секунд, при этом воспламеняющаяся часть (изоляция проводника) нагревается до 350 градусов Цельсия за 140 секунд (рис. 4.б). Этой температуры достаточно для воспламенения распространенных видов изоляции ПВХ, ВВГ, ВВГ и т.п..



а

б

Рисунок 4 – распределение температурного поля, а - в начальный момент времени  $t=0$  сек., б – через 140 сек.

Для определения критического значения температуры в контактном соединении необходимо определить возникающую в нем термоЭДС, вызванную нагревом. Для этого была отфильтрована переменная составляющая гармонического сигнала, затем сигнал был усилен (рисунок 5) и подан на вход 20 разрядного АЦП, позволяющего контролировать сигнал амплитудой до 81 мкВ.

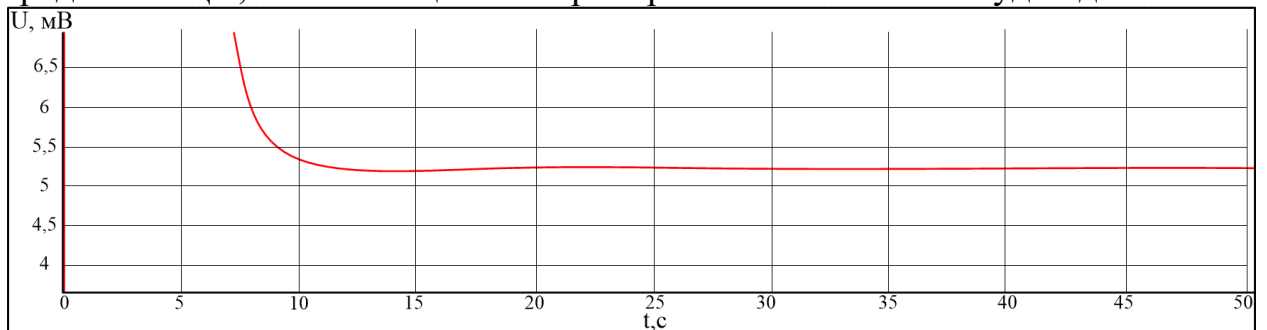


Рисунок 5 – отфильтрованный и усиленный сигнал

Информация с выхода АЦП записывается на сервер учета данных и обрабатывается. Анализ сигнала позволяет оценить скорость изменения постоянной составляющей и рассчитать температуру, возникающую в контактном соединении.

**В третьей главе** описана экспериментальная установка и представлены результаты экспериментов. Система мониторинга контактного соединения «СМКС-1» содержит персональный компьютер, автоматический выключатель и устройство контроля, состоящего из измерителя напряжения, двухкаскадного фильтра низкий частот, усилителя, выпрямителя и трансформатора тока (рисунок б). Система мониторинга 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.

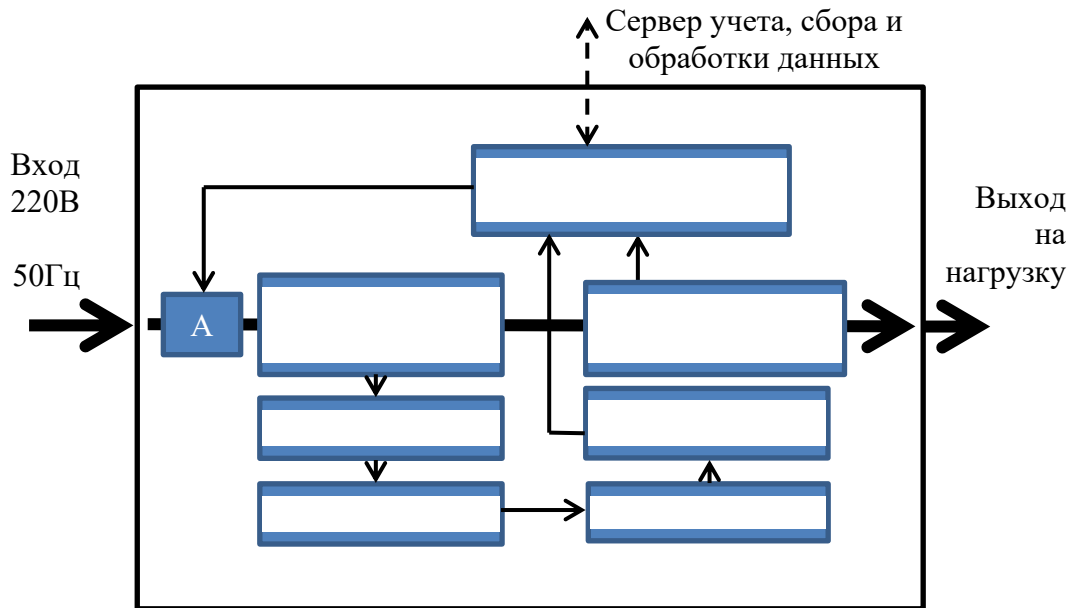


Рисунок 6 – Структурная схема системы мониторинга контактного соединения «СМКС-1»

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. Характерный вид сигнала после выпрямителя показан на рис.7.

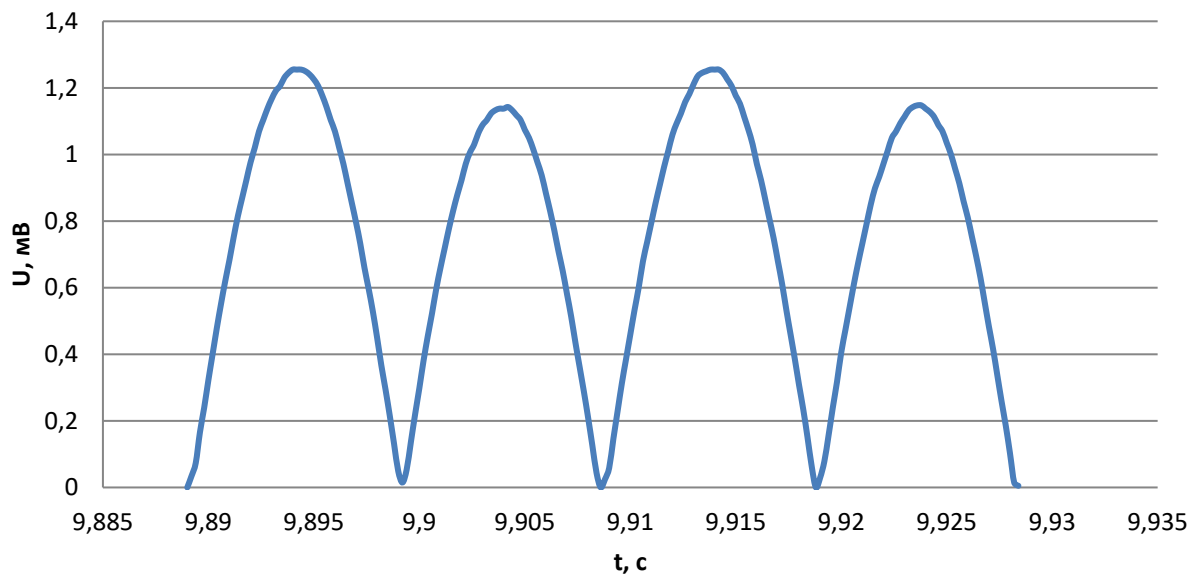


Рисунок 7 – Сигнал с выхода выпрямителя

На основании полученных данных алгоритм обработки определяет экстремумы функции и рассчитывает разность значений экстремумов в соседних периодах. Полученный результат после усиления показан на рис.8

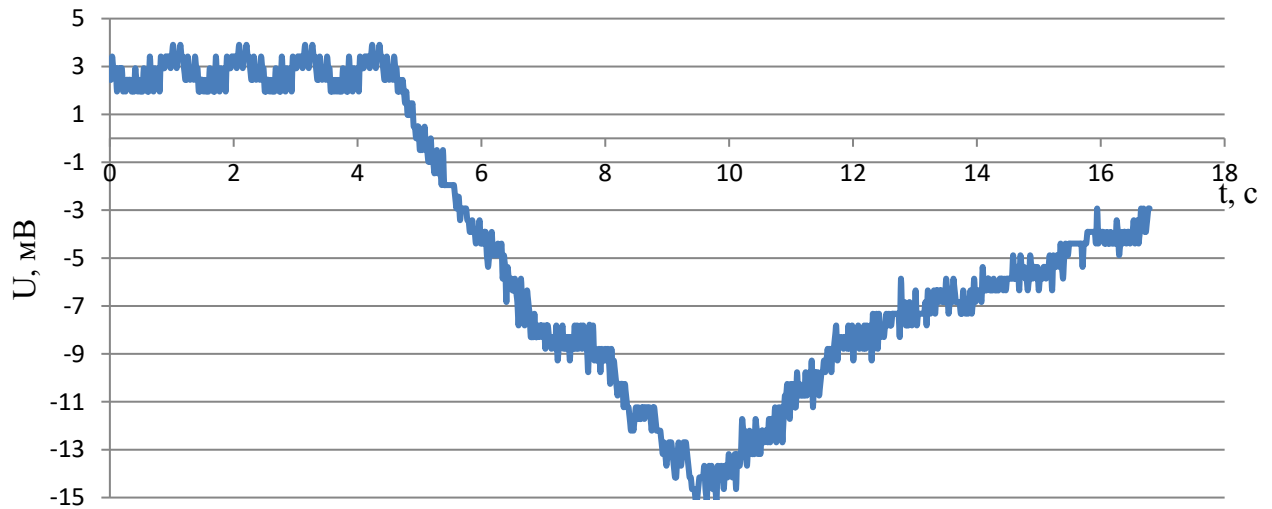


Рисунок 8 – значение постоянной составляющей в гармоническом сигнале

На приведенном графике виден естественный фон постоянной составляющей гармонического сигнала, равный примерно 2,5 мВ. В момент времени ~5с начинается нагрев контактного соединения, при этом начинается изменение термоЭДС, в момент времени 10с нагрузку отключили и нагрев прекратился. После этого происходит процесс естественного охлаждения. Напряжение ~-15 мВ соответствует температуре 400 °С. Как видно из полученных графиков, предложенный метод позволяет с высокой достоверностью определять изменения в термодинамических системах посредством контроля термоЭДС контактных соединений.

Для локализации мест с большим переходным сопротивлением контактов была предложена схема, приведенная на рис.9. Работа устройства основана на анализе величины протекающего тока и изменении термоЭДС в момент включения и отключения электрооборудования, расчета температуры и величины контактного сопротивления в соответствии с формулой (13). Схема защищена патентом РФ.



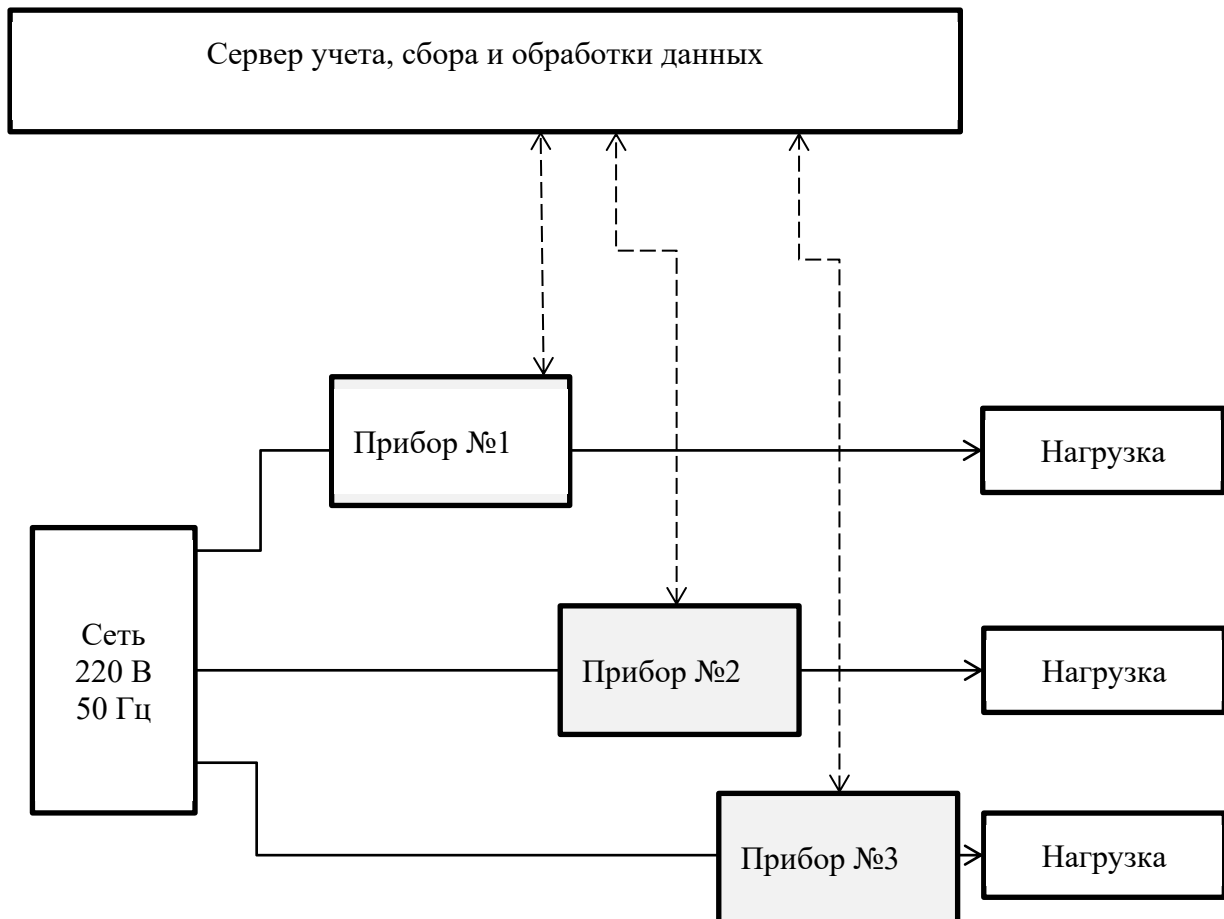


Рисунок 9 – Система локализации мест с большим переходным сопротивлением контактов.

**В заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

В приложении приведены результаты внедрения проведенных исследований.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 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 контактом 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 величины переходного сопротивления контактного соединения.
6. Разработан макетный образец устройства, внедренный на ОАО «НПЦ «ПОЛЮС», и проведены его испытания.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ, Scopus и Web of science*

1. **Soldatov D.**, Vasiliev I., Soldatov A., Abouellail A., Kostina M., Soldatov A., Bortalevich S., Thermoelectric Quality Control of the Application of Heat-Conducting Compound// Studies in Systems, Decision and Control// Том 351, Страницы 59 – 68//2021.

2. **D.A. Soldatov**, A. A. Abouellail, A.A. Soldatov, S.I.Bortalevich. Influence of Destabilizing Factors on Results of Thermoelectric Testing / Russian Journal of Nondestructive Testing, 2022, 58(7), страницы 607–616

3. **D.A. Soldatov**, A. A. Abouellail, A.A. Soldatov, M.A. Kostina. Laboratory Substantiation of Thermoelectric Method for Monitoring Contact Resistance \ Russian Journal of Nondestructive Testing, 2022, 58(12), страницы 1153–1161

*Прочие публикации*

4. **Солдатов Д.А.**, Солдатов А.И., Сорокин П.В. Исследование переходного процесса при экспресс-контроле металлов и сплавов методом термо-ЭДС \ Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-конференции, Томск: ТПУ, 2013

5. **Солдатов Д. А.**, Солдатова Е. С., Костина М. А., Шульгин Е. М. Диагностика электрических контактных соединений // Материалы XXII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (12–16 ноября 2018, г. Красноярск) стр. 348

6. **Солдатов Д.А.**, Солдатова Е.С., Крыгин А.С. Определение Переходного Контактного Сопротивления Методом Термоэдс // Материалы IV Национальной научно-практической конференции. В 2-х томах. Редколлегия: Э.Ю. Абдуллазянов [и др.]. 2018 стр. 222

7. **Солдатов Д.А.**, Солдатов А.И., Солдатова А.С. Определение переходного контактного сопротивления методом термоЭДС \ Сб.статей международной конференции «Научная сессия ТУСУР-2019», т.2. с.212-215

8. **Д.А. Солдатов**, А.А. Солдатов, Е.С. Солдатова, А.С. Крыгин, В.Ю. Борталевич. Исследование тепловых процессов в контактных соединениях в

электрической сети промышленной частоты \ \ СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XVII международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ИННОВАТИКА-2021», 22 – 23 апреля 2021г., г. Томск, с. 410-413

9. **Солдатов Д.А.,** Абуллаель А.А., Солдатов А.А. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕФЕКТОСКОПА \ В сборнике: Современные технологии, экономика и образование. Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции. 2019. С. 17-19.

*Патенты*

1. Пат. 2762125 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08 (2006.01), G 08 B 17/06 (2006.01). Устройство неразрушающего контроля неисправностей в электрической сети/ **Д.А. Солдатов,** А.И. Солдатов, А.А Солдатов, М.А. Костина, Г.Ф. Нариманова, С.В. Борталевич; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТУСУР» № 2021105791 ; заявл. 09.03.2021 ; опубл. 15.12.2021

2. Пат. 2762526 Российская Федерация, МПК G 08 B 17/06 (2006.01), G 01 R 31/00 (2006.01). Способ неразрушающего контроля неисправностей в электрической сети/ **Д.А. Солдатов,** А.И. Солдатов, А.А Солдатов, М.А. Костина, Г.Ф. Нариманова, С.В. Борталевич; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТУСУР» № 2021105793 ; заявл. 09.03.2021 ; опубл. 21.12.2021