

На правах рукописи

Сухичев Михаил Иванович

**Анализ тепловых полей некоторых элементов
электроустановок высокого напряжения
применительно к задачам их диагностики**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор

Титков Василий Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Фоминич Эдуард Николаевич

кандидат технических наук, доцент

Кадзов Георгий Долматович

Ведущая организация: **Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения»**

Защита состоится «_____» _____ 2011 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», расположенном по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент

Попов М. Г.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Тепловой метод диагностики получил широкое распространение в электроэнергетике в связи с развитием технических средств и методов инфракрасной термографии.

В практике встречаются задачи, когда объект контроля находится вне зоны измерения. В этом случае приходится прибегать как к контактным методам контроля теплового режима, так и к анализу тепловых полей вне зоны тепловыделяющего дефекта. Для эксплуатации высоковольтного электрооборудования важно определить состояния, например, контактных соединений в необслуживаемых ячейках РУ, некоторых дефектов ОПН. Для решения поставленных задач в диссертации применяется численное моделирование, аналитическое решение задачи теплообмена, экспериментальное исследование.

В электроустановках возможен подогрев по шине контактных соединений (КС) расположенным рядом на этих же шинах оборудованием. Не меньшую проблему представляет собой оценка температуры контактного соединения вне зоны, в которой можно провести измерения.

Традиционно в электроэнергетике применяется модель одного КС на бесконечной шине с одинаковыми параметрами. Такая модель описана ещё в работах Хольма и повторялась многими авторами в последствии. Однако такая модель не позволяет эффективно проводить диагностику в описанном выше современном оборудовании.

В качестве другого примера можно выделить ограничители перенапряжений (ОПН), которые являются сегодня неотъемлемым элементом защиты высоковольтного оборудования. Они выполняют важную роль, защищая дорогостоящие элементы оборудования высокого напряжения от выхода из строя вследствие воздействия перенапряжений. Важность диагностики в эксплуатации ОПН

подчёркивалась многими авторами, например, Дмитриевым В. Л., Демьяненко К. Б. и других.

Несмотря на то, что ОПН является легко доступным для обследования объектом, отсутствие достаточно адекватных тепло-электрических моделей ОПН ограничивает возможность и пути улучшения качества их диагностики.

Цель диссертационной работы

Получение более совершенных, по сравнению с имеющимися, критериев тепловой диагностики контактных соединений и ОПН на основе математического моделирования физических полей данного оборудования.

Задачи диссертационной работы

1. Разработка аналитической математической модели теплового поля контакта на основе теории теплопередачи и её верификация.
2. Разработка диагностической модели дефектного контакта на основе аналитической модели теплового поля шины.
3. Сравнение и выбор методов численной реализации диагностической модели контакта.
4. Разработка численной модели и расчёт характеристик теплообмена в горизонтальных токопроводах применительно к использованию в диагностической модели контактных соединений.
5. Разработка математической модели ОПН и её конечно-элементной реализации.
6. Адаптация конечно-элементной модели на основе сравнения с результатами экспериментальных исследований ОПН с искусственными дефектами.
7. Выработка диагностического критерия ОПН для некоторых нарушений изоляции (частичное внешнее и частичное внутреннее загрязнение).

Научная новизна

1. Разработана аналитическая модель теплового поля шинпровода с группой контактов на основе модели теплопроводности вдоль шины и поперечного теплообмена в модели Ньютона—Рихмана. Получены общие решения для всех возможных сочетаний граничных условий и распределений контактов вдоль шины.
2. Разработан теоретически обоснованный критерий дефектности контактных соединений по полю температуры в зависимости от параметров среды и шины.
3. Разработана методика оценки коэффициентов теплоотдачи горизонтальных шинпроводов для различных условий прокладки (одно и трехфазные шинпроводы, шинпроводы в кожухе).
4. Разработана методика оценки состояния контакта на основе фрагмента теплового поля шины. Работоспособность методики продемонстрирована путем моделирования работы алгоритмов распознавания при использовании искусственно «зашумленных» данных.
5. Разработана конечно-элементная модель ОПН на основе совместного решения уравнений для электрического и теплового поля при учете нелинейности проводящей среды резистора ОПН. Выработан качественный критерий диагностики ОПН с нарушениями изоляции.

Практическая значимость заключается в следующих положениях:

1. обоснованы и реализована в виде программного кода методики оценки состояния контактов по тепловому полю шин, в том числе находящихся вне зоны измерения.

2. предложен теоретически обоснованный критерий дефектности контактных соединений в зависимости от параметров среды и шины.
3. предложен формируемый на основе анализа поверхностного распределения температуры ОПН теоретически обоснованный диагностический признак для выявления частичного внутреннего или внешнего перекрытия изоляционного корпуса аппарата.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Аналитическая модель теплового поля шины с группой контактов.
2. Методика диагностики контакта, находящегося вне зоны измерения.
3. Критерий дефектности контактных соединений в зависимости от параметров среды и шин.
4. Результаты исследования распределения теплового поля по поверхности изоляционного корпуса ОПН и диагностический признак для выявления частичного внутреннего или внешнего перекрытия изоляционного корпуса ОПН.

Апробация работы Основные результаты работы докладывались на международных научно-технических конференциях «Перенапряжения и надёжность эксплуатации электрооборудования» (2009), «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики» (2009), «XXXVIII неделя науки СПбГПУ» (2009), российской научно-технической конференции «Молодые учёные — промышленности Северо-Западного региона» (2009).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах, из них 2 статьи в изданиях, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертационных работ, 2 статьи в сборниках трудов конференций и 2 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, 3 глав и 4 приложений, включает 170 страниц основного текста, 62 рисунка, 16 таблиц и список литературы из 80 наименований.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проведён обзор методов регистрации и анализа тепловых полей в электрооборудовании.

Указана ограниченность тепловых бесконтактных методов диагностики из-за возможности анализа только поверхностного распределения теплового поля. Для расширения возможностей тепловых методов применяются методы анализа тепловых полей.

Сформулирована цель диссертационной работы и обозначены подходы к решению проблемы.

Во второй главе рассмотрена проблема диагностики контактных соединений (КС).

В первом разделе главы более подробно показана актуальность данной задачи в том числе из-за невозможности прогнозирования состояния КС, слабости нормативной базы и особенностей нового оборудования, препятствующих проведению тепловизионного обследования.

Так же в этом разделе сформулированы основные подходы к решению задачи диагностики КС, заключающиеся в

1. нахождении аналитического решения задачи о растекании тепла по шине от дефектного КС;

2. установлении степени влияния на результат принятых при решении аналитической задачи допущений;
3. разработка диагностических приемов и методов обработки результатов измерений поля температуры на основании разработанных математических моделей и оценка возможностей для применения диагностики оборудования по особенностям его теплового поля на практике;
4. сравнение с опытными данными для подтверждения аналитических выводов.

Во втором разделе главы проведён анализ известных аналитических решений задачи о растекании тепла вдоль шины, указано на их ограниченность только одним КС на бесконечной шине.

Поэтому было выведено общее одномерное аналитическое решение задачи в виде набора участков с неизменными термоэлектрическими характеристиками.

Для каждого участка распределение температуры определено как

$$T(x) = T'_0 \operatorname{ch} \sqrt{A} x + \Phi'_0 \operatorname{sh} \sqrt{A} x + \frac{B}{A}, \quad (1)$$

где $T'_0 = T(x)|_{x=0} - \frac{B}{A}$, $\Phi'_0 = \frac{1}{\sqrt{A}} \left. \frac{d}{dx} T(x) \right|_{x=0}$,

$A = \frac{\alpha p}{\lambda S}$ и $B = \frac{I^2 R' + \alpha p T_0}{\lambda S}$ — расчётные коэффициенты;

α — коэффициент теплоотдачи с поверхности шины;

p — периметр сечения шины;

λ — коэффициент теплопроводности;

S — площадь поперечного сечения шины;

I — полный электрический ток на участке;

$R' = \frac{\rho'}{S}$ — электрическое сопротивление на единицу длины;

T_0 — температура среды.

При этом, если участки стыкуются в точке $x = l$, условия стыковки участков можно записать в виде системы

$$\begin{cases} T_1(x)|_{x=l} = T_2(x)|_{x=l}, \\ \lambda_n S_n \frac{d}{dx} T_n(x) \Big|_{x=l} = \lambda_{n+1} S_{n+1} \frac{d}{dx} T_{n+1}(x) \Big|_{x=l}. \end{cases} \quad (2)$$

Особенности компьютерной реализации схемы расчёта для любых возможных граничных условий, в том числе заданных в произвольной точке на шине вынесены в приложение.

Кроме того, был обоснован отказ от аналитического решения задачи с учётом лучистого теплообмена и установлено, что введение зависимости удельного сопротивления от температуры вида $\rho = \rho_0 (1 + a(T(x) - T_{оп}))$ не приводит к изменению уравнения распределения температуры на участке, а лишь изменяет постоянные коэффициенты A и B .

Так же выведены варианты его упрощения для практического использования, которые совпадают с уже известными решениями.

Показано, что решение для шины с несколькими КС может быть получено по принципу суперпозиции с учётом пространственного сдвига источников из нескольких решений для шины с одним КС. В частности для шины с двумя разнесёнными в пространстве источниками тепла имеем:

$$\begin{aligned} T_{\Sigma}(x) - \frac{B}{A} &= T_1(x) + T_2(x) - 2 \frac{B}{A} = \\ &= T'_1 \operatorname{ch} \sqrt{A}(x - l_1) + dT'_1 \operatorname{sh} \sqrt{A}(x - l_1) + \\ &+ T'_2 \operatorname{ch} \sqrt{A}(x - l_2) + dT'_2 \operatorname{sh} \sqrt{A}(x - l_2), \end{aligned} \quad (3)$$

где $T_1(x)$, $T_2(x)$, $T_{\Sigma}(x)$ — распределение теплового поля вдоль шины для первого, второго КС и суммарное соответственно.

В третьем разделе главы для установления степени влияния на решение принятых в постановке аналитического решения допущений выполнен расчёт в котором лучистый теплообмен был заменён на теплообмен по закону

Ньютона—Рихмана. Этот расчёт показал, что для температур, характерных для высоковольтного электрооборудования, погрешность не превышает 0,07 К, что лежит ниже погрешности лучших средств измерения.

Для учёта эффектов вызываемых неравномерным распределением температуры в сечении проводника и влиянием эффекта искривления токовых линий, было решено несколько вариантов двумерного численного решения той же задачи, которые так же показали погрешность ниже точности средств измерения.

В данном разделе был приведён пример сведения трёхмерной задачи к двум задачам более низкой размерности. Это пример демонстрирует возможность использования аналитического выражения в случае, когда термоэлектрические характеристики шины зависят от температуры.

Кроме того, на примере одно- и трёх-фазных токопроводов показан метод нахождения коэффициента теплообмена α путём построения численной модели. При этом учёт конвекции выполнен на основании решения двумерной задачи газовой динамики.

В четвёртом разделе главы, посвящённом диагностике, теоретически обосновано, что тепловизионным обследованием могут быть определены все практически значимые величины, кроме расстояния от точки измерения до КС или температуры КС, так как последние являются связанными величинами.

Кроме того, в разделе рассмотрены возможные критерии браковки и указано, что наилучшим с точки зрения автора является температура КС.

Так же в разделе на основании расчётов из второго раздела предложен теоретически обоснованный критерий дефектности КС в зависимости от параметров среды и шины:

$$T_{\text{крит.}} = \frac{2 \sqrt{L}}{n \lambda S \sqrt{A}} \cdot \frac{I^2}{I_{\text{max}}} \cdot \sqrt{T_{\text{плав.}}^2 - \left(\frac{B}{A}\right)^2} + \frac{B}{A}, \quad (4)$$

где $T_{\text{крит.}}$ — браковочная температура КС;

$T_{\text{плав.}}$ — температуру плавления металла покрытия (если есть) или шины;

I_{\max} — максимально возможный на данном присоединении ток;

n — число отходящих от КС участков шин. Для прямой шины без отпаек $n = 2$;

$L = 2,45 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}\cdot\text{ом}}{\text{К}^2}$ — коэффициент из закона Франца—Видемана.

Так же в разделе указано теоретически обоснованное выражение для связи точности и дальности определения дефектного КС:

$$l < \frac{1}{\sqrt{A}} \ln \left(\frac{\Delta T_{\text{доп}}}{\delta T} \right) \quad (5)$$

где l — расстояние от места измерения до КС;

$\Delta T_{\text{доп}}$ — минимальный прирост температуры в контакте, регистрация которого необходимо обеспечить;

δT — точность средства измерения температуры.

В пятом разделе главы для подтверждения возможности диагностики КС, находящегося вне зоны прямой видимости тепловизора, проводится моделирование диагностики и сравнение трёх вариантов диагностики: по базе данных, с помощью нейронных сетей и на основе аппроксимации аналитической формулой.

Так же в разделе обосновываются преимущества и недостатки методов.

Автор рекомендует использовать метод на основе аппроксимации полученной выше аналитической зависимости, так как последний не требует предварительного обучения или набора базы данных.

В шестом разделе главы приводится пример опытного исследования, подтверждающего правильность полученных теоретических результатов.

Практический пример восстановления картины поля представлен на рис. 1. Для примера специально была выбрана термограмма с сильно зашумленным распределением температуры (рис. 2).

В седьмом разделе главы приводятся основные результаты главы.

Третья глава посвящена проблеме тепловизионной диагностики ОПН.

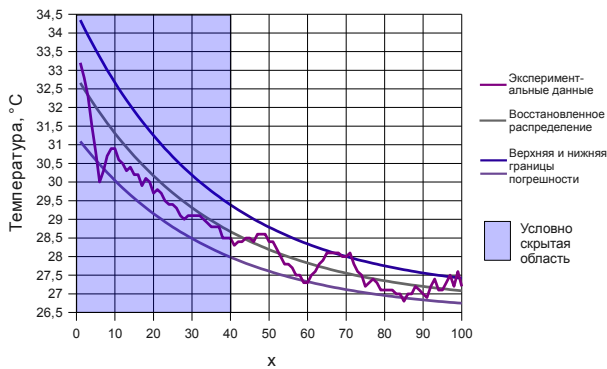


Рис. 1. Распределение температуры вдоль шины по термограмме, восстановленный участок кривой и границы погрешности.

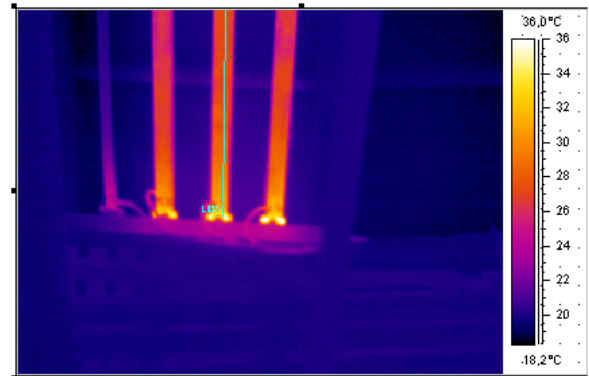


Рис. 2. Термограмма использованная для примера восстановления температуры КС.

Для подтверждения актуальности задачи проведён сравнительный анализ тепловизионного метода диагностики ОПН и метода на основании измерения токов утечки. Показано, что тепловой метод обладает рядом преимуществ по сравнению с методами измерения токов утечки.

Так же актуальность задачи была подтверждена анализом современных нормативных документов по этой проблематике, который показал недостаточное теоретическое обоснование представлений о тепловых процессах в ОПН.

Отдельно отмечены методы, предлагающие расчёт падения напряжения на варисторах по распределению теплового поля, которые дают приблизительную оценку в следствии неучёта продольного теплового потока в ОПН.

Для определения качественного и количественного влияния дефектов на тепловое поле ОПН, а значит и теоретического обоснования диагностики, была разработана математическая модель ОПН-27 кВ, используемого на железной дороге, с применением метода конечных элементов(рис. 3).

Математическая модель ОПН основана на решении уравнений в частных производных:

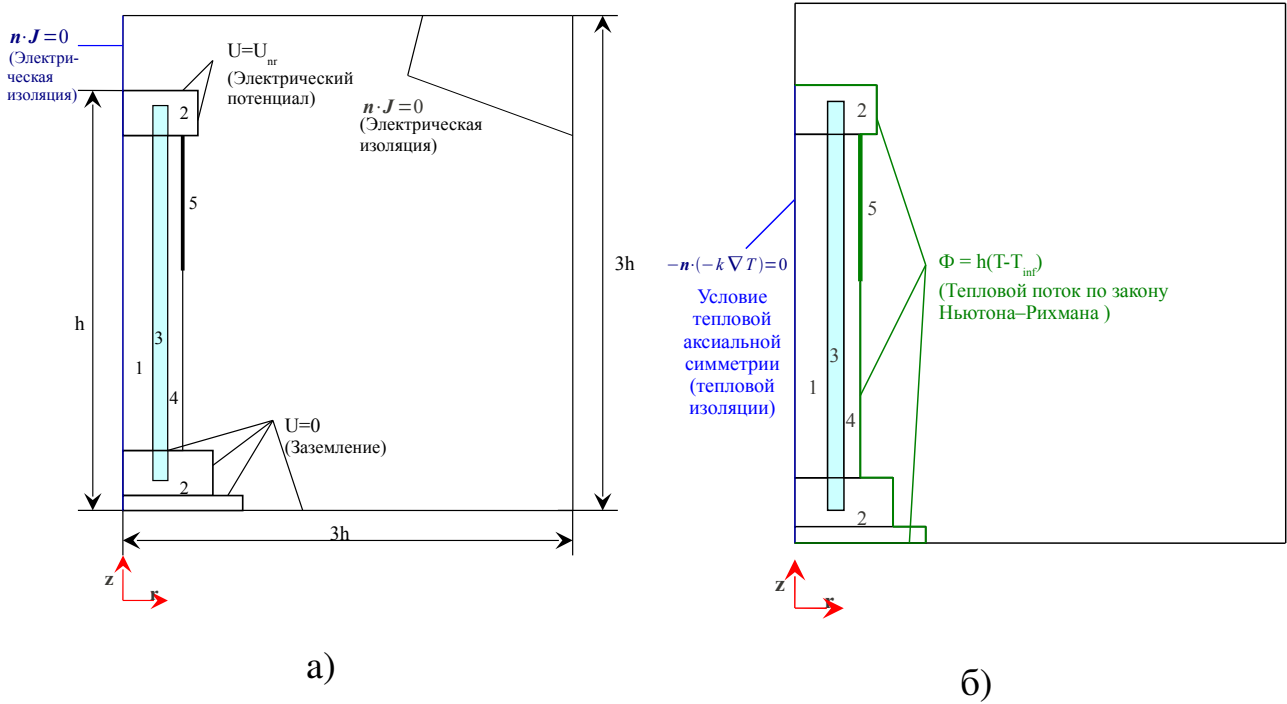


Рис. 3. Граничные условия электрической (а) и тепловой (б) части модели ОПН.

1 – нелинейный резистор; 2 – алюминиевые фланцы; 3 – стеклопластиковая труба;
 4 – силиконовое покрытие; 5 – загрязнение.

1. для потенциала, учитывающие проводимость и ток смещения;

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla U - \vec{J}^e) = q_j, \quad (6)$$

где σ — электропроводность; ω — круговая частота тока; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость; U — электрический потенциал; \vec{J}^e — плотность внешнего тока; q_j — плотность источников тока.

2. для теплового поля, учитывающие тепловыделение в теле ОПН источника.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_V T(\vec{r}, t)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T(\vec{r}, t)) + Q(\vec{r}, t), \quad (7)$$

где ρ — плотность среды; c_V — теплоёмкость среды при постоянном объёме V ; T — температура; \vec{r} — радиус-вектор; λ — коэффициент теплопроводности; Q — плотность тепловых источников.

При этом для учёта нелинейных характеристик колонки варисторов ОПН применяется её проводимость вычисляется по формуле

$$\sigma(E_d) = \sigma_{ref} \left(\frac{E_d}{E_{ref}} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \cdot \frac{2^{\frac{1+3\alpha}{2\alpha}}}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin^{\frac{1+\alpha}{\alpha}}(\omega t) dt, \quad (8)$$

где α — коэффициент нелинейности материала варистора, описываемой с помощью стандартной формулы $E = E_{ref} \left(\frac{j}{j_{ref}} \right)^\alpha$;

σ_{ref} — опорная проводимость при известной опорной напряжённости электрического поля E_{ref} .

T и ω — период и круговая частота приложенного напряжения.

На основании изложенной математической модели и проведённых экспериментов, было определено, что тепловое поле ОПН в модели отличается от представленного в нормативных документах. При этом температура в верхней части аппарата выше, чем в нижней, что можно использовать при практических измерениях (рис. 4).

Опыты качественно совпадают с результатами расчёта по математической модели (рис. 4).

Расчёты так же показали принципиальную возможность объективной диагностики ОПН на основе анализа распределения теплового поля и его характеристик.

В результате численного анализа сформулирован качественный диагностический признак нарушения целостности изоляции ОПН, заключающийся в смещении точки наибольшей температуры.

Заключение

В работе рассмотрена проблема тепловой диагностики контактных соединений и ОПН. На основе теоретических и экспериментальных исследований в диссертации получены следующие результаты:

1. Разработана аналитическая модель теплового поля шины произвольной

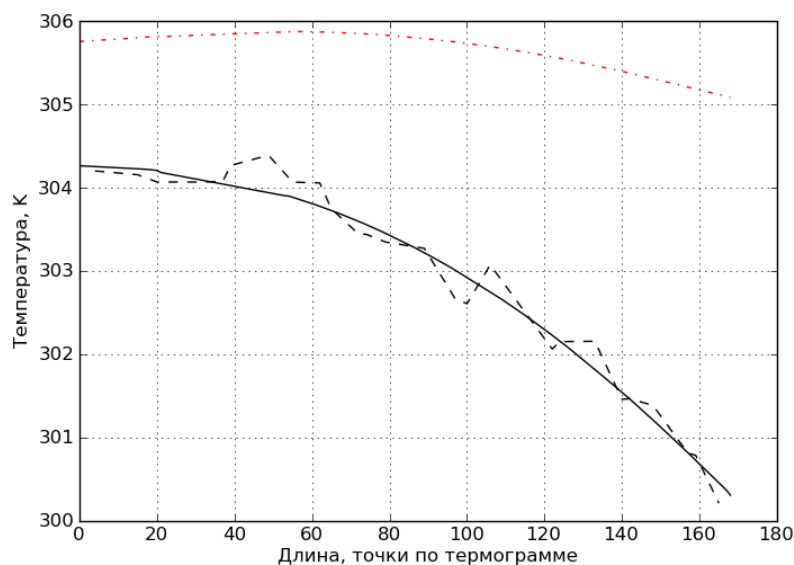


Рис. 4. Распределение теплового поля вдоль тела ОПН (верх аппарата слева):

- · - · — расчётное при усреднённом для всей поверхности коэффициенте теплопроводности;
- — расчётное при раздельном для каждой части коэффициенте теплопроводности;
- - — экспериментальное.

длины с группой контактов. Проведена её верификация.

2. Предложена методика диагностики контакта, находящегося вне зоны измерения, по тепловому полю шины.
3. Предложен критерий дефектности контактных соединений в зависимости от параметров среды и шин.
4. Выполнены исследования распределения теплового поля по поверхности изоляционного корпуса ОПН.
5. Предложен качественный диагностический признак для выявления частичного внутреннего или внешнего перекрытия изоляционного корпуса ОПН.

Публикации в изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК

1. Сухичев М. И., Титков В. В. К вопросу о тепловизионной диагностике контактных соединений // Электро. 2010. — 6. Т. 3. С. 37–39.
2. Сухичев М. И., Титков В. В. Тепловые процессы в шинах электроустановок // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. Т. 3 (106)/2010. С. 14–21.

Публикации в других изданиях

1. Сухичев М. И. О нормативных документах по тепловизионной диагностике контактных соединений. // Молодые учёные — промышленности Северо-Западного региона. материалы конференции Политехнического симпозиума. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 211–213.
2. Сухичев М. И. О нормативных документах по тепловизионной диагностике ограничителей перенапряжений нелинейных. // Молодые учёные — промышленности Северо-Западного региона. Материалы конференции Политехнического симпозиума. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 210–211.
3. Сухичев М. И., Титков В. В. Изменение распределения теплового поля ОПН с внутренним и внешним загрязнением // XXXVIII неделя науки СПбГПУ. Т. II из Материалы международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 4–5.
4. Сухичев М. И., Титков В. В., Гусейнов Г. А. и др. Оценка технического состояния ОПН с внутренним и внешним загрязнением // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики / Под ред. Воробай Н. И., Таджибаев А. И. Т. 60 из «Методы и средства исследования и обеспечения надёжности систем энергетики». СПб.: «Северная звезда», 2010. С. 532–536.