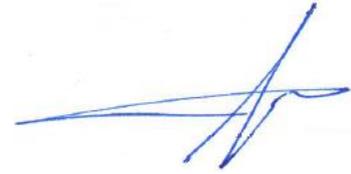


На правах рукописи



Гренчук Андрей Михайлович

**АДРЕСНОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ АВАРИЙНЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
МОРСКИХ И РЕЧНЫХ СУДОВ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Управление и защита в чрезвычайных ситуациях»

Научный руководитель: **Гуменюк Василий Иванович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Губанов Юрий Александрович**
доктор технических наук, профессор,
АО «Концерн «НПО Аврора»,
начальник самостоятельного электротехнического отдела

Григорьев Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и
речного флота имени адмирала С.О. Макарова»,
доцент кафедры судовых автоматизированных
электроэнергетических систем

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»**

Защита состоится 30 ноября 2017 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», расположенном по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.20
кандидат технических наук, доцент



Иванов Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Судовая электроэнергетическая система (ЭЭС) представляют собой сложный технический комплекс, состоящий из различных видов электрооборудования, объединенный общими процессами генерирования и распределения электрической энергии между приемниками, преобразующими ее в другие виды энергии, и обеспечивающий большинство тактико-технических характеристик современных морских и речных судов. В настоящее время с постоянным ростом электроэнерговооруженности судов происходит увеличение мощности основных источников электрической энергии и разветвленности сетей, что в совокупности с повышением общего уровня автоматизации и тенденцией к уменьшению численности личного состава обуславливает актуальность проблем, связанных с практическим обеспечением надлежащего качества функционирования судовых ЭЭС.

Электрические контактные соединения (КС) являются ответственным конструктивным элементом, обеспечивающим целостность любой электротехнической системы. Вместе с тем КС традиционно являются слабым звеном в системах передачи и распределения электрической энергии. Деградация контактного перехода, усугубляющаяся характерными для условий эксплуатации судовых ЭЭС внешними воздействующими факторами, приводит к увеличению переходных сопротивлений КС сверх нормируемых уровней. Эксплуатация аварийных КС с повышенным переходным сопротивлением негативно сказывается на качестве функционирования судовых ЭЭС, что проявляется в ухудшении помеховой обстановки в электрической сети, ухудшении параметров изоляции кабелей, увеличении вероятности аварий в распределительных устройствах при протекании токов коротких замыканий, а также повышении пожарной опасности электрооборудования.

Увеличение переходных сопротивлений КС наряду с короткими замыканиями и перегрузками электросети является одним из наиболее распространенных аварийных режимов работы электрооборудования, т.к. в работе судовых ЭЭС задействованы тысячи силовых КС. Как известно, для предупреждения негативных последствий коротких замыканий и перегрузок используются аппараты защиты, однако зафиксировать подобным образом локальное повышение температуры или падение напряжения в результате увеличения переходного сопротивления контактного перехода невозможно, поскольку токи в цепи не превышают штатных значений. Общепромышленные методы выявления аварийных контактов, в частности, тепловизионное обследование, несмотря на хорошую методическую оснащенность, при обслуживании судовых ЭЭС не применяется, поскольку для его осуществления необходимо обеспечение номинальных токовых нагрузок на все КС. Такой подход требует задействования

непосредственно во время обследования всех основных потребителей электроэнергии судна, в том числе движительного комплекса, и неприменим во время регламентных работ, когда судно находится у причала и электропитание осуществляется от генератора для бытовых нужд либо с берега.

Научные исследования, направленные на повышение эффективности и безопасности эксплуатации КС электрооборудования, проводились Н.Н. Дзекцером в ЛенПЭО ВНИИ Проектэлектромонтаж – в части изучения соединений алюминиевых проводников подстанций промышленных предприятий; Ю.С. Висленевым, А.И. Горшковым и Н.А. Лазаревским в ЦНИИ СЭТ (ныне филиал ФГУП «Крыловский государственный научный центр») – в части разработки технологий монтажа и обслуживания КС судового электрооборудования; Г.И. Смелковым, В.Н. Веревкиным и В.А. Пехотиковым в ФГБУ ВНИИПО МЧС России – в части обеспечения пожарной безопасности КС; Н.К. Мышкиным в ГНУ ИММС НАН Беларуси – в части исследования средств промышленного мониторинга КС. Исследования, направленные на обеспечение безопасной эксплуатации КС судового электрооборудования, также проведены ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в рамках реализации Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009-2016 г., мероприятие 6.4.1. «Разработка новых технологий и оборудования высоконадежных конкурентоспособных судовых электроэнергетических систем и их компонентов с применением современной элементной базы».

Тем не менее, в настоящее время борьба с негативными последствиями увеличения переходного сопротивления контактов судового электрооборудования в подавляющем большинстве случаев ведется без использования каких-либо технических средств в рамках регламентных работ по обслуживанию электроустановок силами личного состава путем внешнего осмотра и обслуживания всех без исключения КС. Такие операции могут быть проигнорированы личным составом из-за низкой эффективности: вероятность увеличения переходного сопротивления для отдельно взятого КС невелика, вместе с тем, с учетом большого количества КС эти работы могут занимать до 30 % трудоемкости при регламентном обслуживании судовых электроустановок.

Номенклатура морских и речных судов исчисляется сотнями, соответственно, номенклатура только основного комплектующего оборудования – десятками тысяч. Поэтому для обеспечения безопасного и эффективного функционирования судовых ЭЭС с заданным качеством актуальным становится решение ряда задач в рамках разработки универсальных средств своевременного адресного выявления аварийных КС.

Цель работы: повышение качества функционирования электроэнергетических систем морских и речных судов путем разработки эффективной технологии выявления аварийных

контактных соединений электрооборудования и технических средств в обеспечение этой технологии.

Основные задачи исследования

1. Анализ и систематизация общепромышленных методов и средств выявления аварийных контактных соединений с учетом специфики эксплуатации электрооборудования морских и речных судов.
2. Разработка технологии адресного выявления аварийных КС оборудования судовых ЭЭС с использованием термобиметаллических индикаторных элементов.
3. Разработка математической модели термобиметаллического индикаторного элемента для выявления аварийных КС электрооборудования.
4. Разработка методики расчета предельной температуры срабатывания термобиметаллических индикаторных элементов при перегреве КС сверх допустимого уровня.
5. Разработка автоматизированной системы регистрации аварийного состояния КС оборудования ЭЭС в процессе эксплуатации морских и речных судов

Объект исследования – системы электроснабжения и электрооборудования морских и речных судов.

Предмет исследования – методы и средства выявления аварийных контактных соединений в процессе эксплуатации оборудования судовых ЭЭС.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовался комплексный метод, включающий в себя научное обобщение, анализ аварийных ситуаций и методов их предотвращения, методы теории вероятностей, аналитические исследования, а также комплекс вычислительных и стендовых экспериментов. Теоретические исследования основаны на разработке математической модели слоистых оболочек, подверженных неравномерному нагреву с учетом естественной конвекции, и осуществлении численного моделирования с помощью программного обеспечения Ansys Multiphysics, основанном на использовании метода конечных элементов.

Научная новизна заключается в обосновании создания технических средств для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации судовых электротехнических систем и проявляется в работе в:

1. Разработке оригинальной математической модели и методики расчета термобиметаллического индикаторного элемента, позволяющей учесть сложную геометрию и неравномерное распределение температуры;
2. Использовании конечно-элементного моделирования полей температур и перемещений слоистых оболочек для обеспечения нового применения в технике термобиметаллических материалов.

3. Обосновании включения в состав электротехнических комплексов морских и речных судов автоматизированной системы контроля локальных превышений температуры на основе термобиметаллических индикаторных элементов, позволяющей перекалибровать пассивные признаки аварийного состояния конструктивно-монтажных узлов этих комплексов в активные.

Теоретическая значимость состоит в разработке универсальной математической модели и методики расчета слоистых оболочек, имеющих сложную геометрию и неравномерное распределение температуры, с возможностью применения для оценки температуры срабатывания биметаллических индикаторных элементов.

Практическая значимость работы состоит в разработке технологии выявления в процессе профилактических мероприятий по обслуживанию судового электрооборудования аварийных контактных соединений в результате фиксации информации о локальных превышениях допустимой температуры, произошедших в процессе эксплуатации, и определяется возможностями его применения:

- при разработке распределительных устройств электротехническими конструкторскими бюро;

- для разработки руководящих документов и инструкций для проведения профилактических осмотров и ремонтов оборудования судовых ЭЭС;

Достоверность научных результатов, достигнутых в диссертационном исследовании, положений и выводов обеспечена использованием апробированных методов исследования, критическим анализом полученных результатов, экспериментальной проверкой теоретических положений, корректной обработкой результатов экспериментов, апробацией на научно-технических конференциях и семинарах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ возможностей использования общепромышленных методов и средств диагностики контактных соединений применительно к оборудованию судовых ЭЭС в процессе эксплуатации.

2. Технология адресного выявления аварийных контактных соединений оборудования судовых ЭЭС с использованием термобиметаллических индикаторных элементов в составе автоматизированной системы.

3. Математическая модель термобиметаллического индикаторного элемента.

4. Методика расчета предельной температуры срабатывания термобиметаллических индикаторных элементов.

5. Автоматизированная система регистрации аварийного состояния контактных соединений в процессе эксплуатации судовых ЭЭС.

Личный вклад автора. Автор на всех этапах работы участвовал в постановке задачи; анализе и систематизации общепромышленных средств и методов, используемых для выявления аварийных КС, разработке математической модели и методик расчета термобиметаллического индикаторного элемента; в разработке технологии выявления аварийного состояния КС и автоматизированной системы для реализации этой технологии; в экспериментальном подтверждении работоспособности предложенных технических решений для термобиметаллических индикаторных элементов.

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на VI-й всероссийской научно-практической конференции «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (г. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2014); Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии в национальных исследовательских университетах» (г. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2014); Международной научной конференции «Молодые исследователи – регионам» (г. Вологда, 2014), Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции «Изобретатели в инновационном процессе России» (г. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2013), Конференции молодых ученых и специалистов ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (г. Санкт-Петербург, 2014), Межотраслевой научно-практической конференции «Военное кораблестроение России. Кораблестроение в XXI веке: состояние, проблемы, перспективы. ВОКОР-2014» (г. Санкт-Петербург, ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2014), Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (г. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, среди которых 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 4 патента на изобретение.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 90 наименований, и двух приложений. Полный объем диссертационной работы – 160 страниц, в том числе рисунков – 42, таблиц – 22.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, определены объект и предмет исследования, цель работы, изложены результаты исследований и положения, выносимые на защиту, их новизна, теоретическая и практическая значимость. Приводится аннотация работы, и даны сведения о публикациях, апробации и реализации результатов исследования.

В первой главе **«Анализ общепромышленных средств и методов выявления аварийных КС и возможности их применения для оборудования судовых ЭЭС»** проанализированы и систематизированы существующие технические средства и методы выявления изменения температуры с точки зрения возможности их использования для выявления аварийных КС во время регламентного обслуживания судовых электроустановок.

Электрооборудование морских и речных судов в процессе эксплуатации подвержено влиянию специфического комплекса внешних воздействующих факторов, негативно влияющих на стабильность параметров КС. Для элементов судовых ЭЭС характерны следующие условия эксплуатации:

- периодическое пребывание в различных климатических зонах (в течение одного рейса судно может побывать в тропиках, арктических водах, средних широтах);
- непрерывное пребывание в условиях повышенной влажности (от 70 до 100 %), при этом в машинных отделениях в течение длительного времени относительная влажность составляет до 80% при высоких температурах, а на палубах – до циклического ежесуточного выпадения росы;
- постоянное содержание солей в воздухе (3 – 5 мг на 1 м³);
- повышенная вибрация и периодические ударные нагрузки, связанные с сотрясением корпуса судна от ударов волн и воздействием ледовых нагрузок.

В соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства электрооборудование должно надежно работать в следующих условиях:

- относительная влажность воздуха - 75 ± 3 % при температуре 45 ± 2 °С или 80 ± 3 % при температуре 40 ± 2 °С, а также 95 ± 3 °С при температуре 25 ± 2 °С;
- при вибрациях с частотами от 2 до 80 Гц, а именно в диапазоне частот от 2 до 13,2 Гц с амплитудой перемещений ± 1 мм, в диапазоне частот от 13,2 до 80 Гц с ускорением $\pm 0,7$ g;
- при воздействии ударных нагрузок с ускорением ± 5 g и частотой следования от 40 до 80 ударов в минуту;
- при длительном крене судна до 15° и дифференте до 5° , а также в условиях бортовой качки до $22,5^\circ$ с периодом 7 – 9 с и килевой качки до 10° от вертикали.

Начальная стадия процесса деградации контактного перехода может протекать долгое время, не приводя к видимым изменениям, так как свойства кластеров контактных пятен и их общее сопротивление меняются незначительно. Однако если контактное сопротивление меняется, приводя к существенному локальному перегреву, то наблюдается ускоренное ухудшение контакта из-за синергетического эффекта, проявляющегося в результате совокупного действия тепловых, химических и механических процессов. Резкое увеличение переходного сопротивления сопровождается интенсивным тепловыделением, характеризующим аварийное состояние КС. Длительность начальной стадии процесса деградации контактного перехода может быть использована для облегчения выявления аварийных КС в рамках профилактических мероприятий по обслуживанию электрооборудования судовых ЭЭС.

Из-за большого количества КС в судовых ЭЭС увеличение переходных сопротивлений является одним из самых распространенных аварийных режимов работы электрооборудования. Указанные обстоятельства накладывают определенные ограничения на средства выявления аварийных КС:

- технология выявления аварийных контактов должна вписываться в существующую систему профилактических мероприятий по обслуживанию электрооборудования морских и речных судов;
- внедрение такой технологии не должно приводить к необоснованному усложнению и удорожанию производства, монтажа и дальнейшего обслуживания элементов судовых ЭЭС;
- индикаторные элементы не должны негативно влиять на коррозионную стойкость применяемых электротехнических материалов;
- для индикаторных элементов должна быть обеспечена устойчивость к внешним воздействующим факторам согласно требованиям, предъявляемым к электрооборудованию морских и речных судов, с максимальной степенью жесткости.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики средств выявления аварийных КС с точки зрения возможности их массового использования для элементов судовых ЭЭС.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики средств выявления аварийных КС

Технические средства	Достоинства	Недостатки
Термоуказатели с легкоплавким припоем	Наглядность при визуальном осмотре, низкая стоимость	Являются индикаторами однократного действия, при срабатывании загрязняют полость электрооборудования
Контактные датчики температуры (термопары, термометры)	Точность температурных измерений	Сложность при обработке получаемой с датчиков информации
Бесконтактные датчики температуры (инфракрасные термометры, пирометры, инфракрасные сканеры изображений и оптоволоконные термометры)	Обладают быстроедействием и могут быть установлены в труднодоступных или опасных для человека местах	Сложность обслуживания, предъявляют повышенные требования к квалификации электротехнического персонала
Индикаторы из сплавов с памятью формы (СПФ-индикаторы)	Наглядность при визуальном осмотре, невысокая стоимость	Влияние механической обработки СПФ-материалов на характеристики индикатора
Температурные наклейки, термоиндикаторные краски и карандаши	Простота применения, невысокая стоимость	Ограниченный срок службы, низкая стойкость при воздействии агрессивной окружающей среды (например морского тумана), нанесение и удаление красок требует проведения дополнительных малярных работ в полости электрооборудования
Датчики контактной нагрузки	Устройство контроля силы затяжки резьбового соединения, выполненное в виде тензодатчика и установленное в отверстии внутри болта, является элементом болтового соединения	Требуется высверливание дополнительных отверстий, что негативно сказывается на надежности резьбовых соединений
Ультразвуковые детекторы	Фиксируют нарушение контакта по акустическому излучению на ранних стадиях деградации	Сложность устройства, относительно высокая стоимость

Элементами судовых ЭЭС, для которых наиболее актуально применение средств выявления аварийных КС, являются электрораспределительные устройства (рис.1).



Рисунок 1. Область применения средств выявления аварийных контактов

Различают следующие виды судовых электrorаспределительных устройств: главный электrorаспределительный щит (ГРЩ), являющийся частью судовой электростанции и предназначенный для присоединения источников электроэнергии к судовой электрической сети и управления работой источников электроэнергии; аварийный электrorаспределительный щит, являющийся частью судовой электростанции; районные, групповые и отсечные щиты; а также генераторные щиты, служащие для передачи энергии от генератора к определенному ГРЩ в тех случаях, когда генератор и ГРЩ расположены в разных отсеках судна. Типовым объектом, для которого предназначены термометаллические индикаторные элементы, являются также щиты привода.

Несмотря на многообразие общепромышленных средств и методов выявления аварийных КС, по различным техническим и организационным причинам они не нашли широкого применения при обслуживании судового электрооборудования. На сегодняшний день для обеспечения качественного функционирования элементов судовых ЭЭС в части выявления аварийных КС в рамках мероприятий по регламентному обслуживанию электрооборудования применяются органолептические методы контроля: визуальный контроль КС по наличию почернения и обгорания изоляции и ручная обтяжка всех без исключения КС. Визуальные признаки проявляются, когда дефект КС уже перешел в опасную стадию, что характеризуется дуговыми микроразрядами в контактной зоне, ухудшающими помеховую обстановку в электрической сети; карбонизацией изоляции с потерей изолирующих свойств вблизи КС и существенным тепловыделением, что как само по себе, так и в совокупности с другими аварийными режимами работы электрооборудования, в частности при протекании токов коротких замыканий через дефектные КС, может привести к аварийной ситуации.

Высокая аварийность элементов судовых ЭЭС по причине неудовлетворительного обслуживания и ошибочных действий личного состава обуславливает необходимость разработки технических средств выявления аварийных КС судового электрооборудования.

Во второй главе «Расчетно-экспериментальное обоснование конструкции термобиметаллических индикаторных элементов для выявления аварийных КС» описаны разработанные методики расчета параметров чувствительных элементов индикаторов, методики проведения вычислительного эксперимента для анализа их температурных перемещений с учетом температуры окружающего воздуха и воздействия вибрационных нагрузок для исключения ложного срабатывания при вибромеханических воздействиях. Также приведены данные испытаний опытных образцов на работоспособность, устойчивость при воздействии вибрационных и ударных нагрузок, повышенной температуры окружающего воздуха и пусковых токов.

Как показано в предыдущей главе, технические характеристики существующих средств для выявления аварийных КС, накладывают ряд существенных ограничений на возможности их эксплуатации в условиях, характерных для электрооборудования морских и речных судов. Для решения этой проблемы предложен ряд технических решений, основанных на применении термобиметаллических индикаторных элементов. Термобиметаллический индикаторный элемент нагревается за счет теплообмена с КС и переходит в аварийное положение, которое фиксируется в памяти автоматизированной системы регистрации аварийных КС либо при осмотре электрооборудования. Индикаторные термобиметаллические элементы в зависимости от варианта исполнения могут иметь конструктивные различия (Рис. 2), однако с точки зрения граничных условий их нагревание происходит в точке или на поверхности контакта с контролируемым элементом электрооборудования. При этом в технической литературе при расчете термобиметаллических пластин основным расчетным предположением является равномерное распределение температуры. В связи с указанными обстоятельствами для определения температуры срабатывания индикаторных элементов на стадии проектирования возникла необходимость разработки соответствующих математической модели и методик расчета.

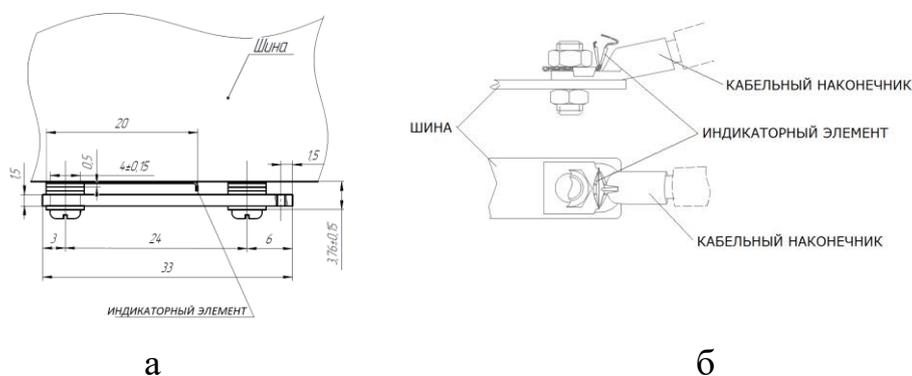


Рисунок 2. Варианты исполнения термобиметаллических индикаторных элементов: а) для выявления аварийных КС в составе автоматизированной системы; б) для монтажа непосредственно на КС

Математическая модель термобиметаллического индикаторного элемента:

чувствительный элемент представляли в виде слоистой оболочки. Каждый конечный элемент такой оболочки задается путем определения последовательных слоев, обладающих соответствующими термомеханическими свойствами. При этом на поверхности сопряжения активного и пассивного слоев термобиметалла ставятся условия кинематической и соматической совместности:

- 1) кинематическая совместность: непрерывность перемещений $[\underline{u}] = 0$ или температуры $[T] = 0$ ($[\]$ – обозначение скачка функции);
- 2) соматическая совместность: непрерывность механических напряжений $[\underline{\sigma}] = 0$ или градиента температуры $[\nabla T] = 0$.

Для определения перемещений чувствительного элемента индикатора при нагреве КС в рамках предложенной методики последовательно решаются задачи теплопроводности и термоупругости (Рис.3).

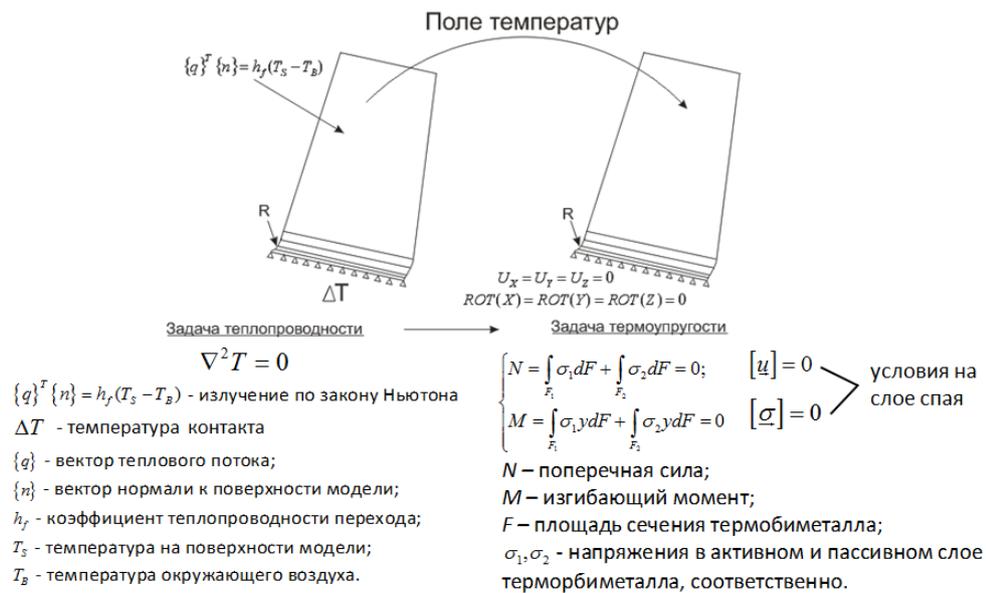


Рисунок 3. Математическая модель индикаторного термобиметаллического элемента для численного моделирования нагрева с учетом температуры окружающего воздуха

Методика расчета температуры срабатывания термобиметаллических индикаторных элементов. Методика предназначена для расчетной оценки предельной температуры срабатывания термобиметаллических индикаторных элементов, а именно – перехода индикаторных элементов из рабочего в аварийное положение.

Исходными данными методики являются:

- марка термобиметалла;
- температура контакта;
- температура окружающего воздуха;

- геометрические параметры индикаторных элементов.

1 На стадии проектирования производится выбор геометрических параметров и моделирование индикаторного элемента в САПР в виде оболочки. Указанные геометрические параметры определяются исходя из типоразмера конструктивно-монтажного узла электрооборудования, который будет оснащен индикаторным элементом.

2 Производится выбор марки термобиметалла и его толщины, которые регламентируются нормативными документами, например ГОСТ 10533. На этом же шаге определяется марка сплава активного и пассивного слоя.

3 Для модели чувствительного элемента (оболочки) определяются толщины активного и пассивного слоев с постановкой условий кинематической и соматической совместности на поверхности их сопряжения. В случае использования материалов по ГОСТ 10533 соотношение толщин активного и пассивного слоев термобиметалла определяется из условия максимального изменения кривизны при нагреве: $\frac{h_1}{h_2} = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$, где h_1, h_2 – толщины слоев, E_1, E_2 – значения модулей упругости (индексами 1 и 2 обозначены активный и пассивный слой, соответственно).

4 Для построенной геометрической модели генерируется конечно-элементная сетка, которая является единой для задач теплопроводности и термоупругости.

5 Решение задачи теплопроводности

С учетом особенностей деградации КС в процессе эксплуатации, проведение численного эксперимента предусматривает использование решения стационарного уравнения теплопроводности в отсутствие внутренних источников тепла.

5.1 В качестве параметров материалов для марок сплавов активного и пассивного слоев, определенных по п.2, вводятся удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг·К) и теплопроводность λ , Вт/(м·К).

5.2 В качестве граничных условий (см. рис.3) на линии основания задается температура перехода из рабочего в аварийное положение ΔT (температура срабатывания), а на остальной поверхности – условие конвективной теплоотдачи с заданием температуры окружающего воздуха T_B и коэффициента теплопроводности перехода h_f (для спокойного воздуха $h_f = 8,7 \frac{Вт}{м^2 * К}$).

5.3 Для поставленной таким образом конечно-элементной задачи решается стационарное уравнение теплопроводности. По итогам решения получается поле температур в узловых точках конечно-элементной модели по п.4, которое записывается в файл для последующего решения задачи термоупругости.

6 Решение задачи термоупругости

6.1 В качестве параметров материалов для марок сплавов активного и пассивного слоев, определенных по п.2, вводятся модули упругости E , Па, коэффициенты Пуассона ν и коэффициенты линейного температурного расширения α , $1/К$.

6.2 В качестве граничных условий (см. рис.3) на линии основания задается условие заделки, которое для оболочки выражается в равенстве нулю перемещений $U_X=U_Y=U_Z=0$ и поворотов $ROT(X)=ROT(Y)=ROT(Z)=0$ вокруг координатных осей.

6.3 В качестве дополнительной нагрузки в узловых точках конечно-элементной модели задается поле температур, полученное в результате решения задачи теплопроводности по п. 5.3.

6.4 Для поставленной таким образом конечно-элементной задачи решаются уравнения равновесия при определяющих соотношениях в виде закона Гука. По итогам решения задачи термоупругости можно получить поле перемещений в узловых точках конечно-элементной модели. В качестве результата расчета, определяющего переход индикаторного элемента в аварийное положение, используется перемещение незакрепленного конца моделируемой оболочки, необходимого для срабатывания устройства (рис. 2).

Результаты расчетов подтвердили возможность использования для индикаторных элементов материалов по ГОСТ 10533 как для визуального определения локального перегрева резьбовых КС типоразмерного ряда резьбовых соединений от М4 до М20, так и для работы в составе автоматизированной системы, где визуальная различимость рабочего и аварийного положений не является определяющей. Варьирование геометрических параметров индикаторных элементов позволяет для стандартных материалов добиться угла раствора индикаторных пластин при нагреве до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно комнатной температуры порядка $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соответствующего перемещения свободного конца индикаторной пластины от 5 до 20 мм, что является достаточным условием визуальной различимости рабочего и аварийного положений. По результатам расчетных оценок можно сделать вывод о принципиальной работоспособности описанных технических решений при температурах срабатывания от 60 до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты натурных испытаний подтвердили работоспособность предложенных конструкций в условиях воздействия пусковых токов, температурных и механических нагрузок.

В третьей главе «**Разработка технологии адресного выявления аварийных КС оборудования судовых ЭЭС**» произведен анализ требований нормативной документации, регламентирующей эксплуатацию электрооборудования морских и речных судов для непосредственной интеграции технологии адресного выявления аварийных КС оборудования судовых ЭЭС в существующую систему регламентного обслуживания. Произведено технико-экономическое обоснование внедрения предложенной технологии и технических решений в обеспечение ее реализации.

Основная идея заключается в фиксации информации о локальных превышениях температуры КС во время работы судовой ЭЭС сверх установленного порогового уровня с последующим обслуживанием только аварийных КС во время регламентных работ. Информация может быть зафиксирована как в памяти автоматизированной системы регистрации аварийного состояния КС, так и при механической фиксации индикаторного элемента в аварийном положении. На рис. 4 изображена блок-схема технологии адресного выявления аварийных КС с использованием автоматизированной системы.

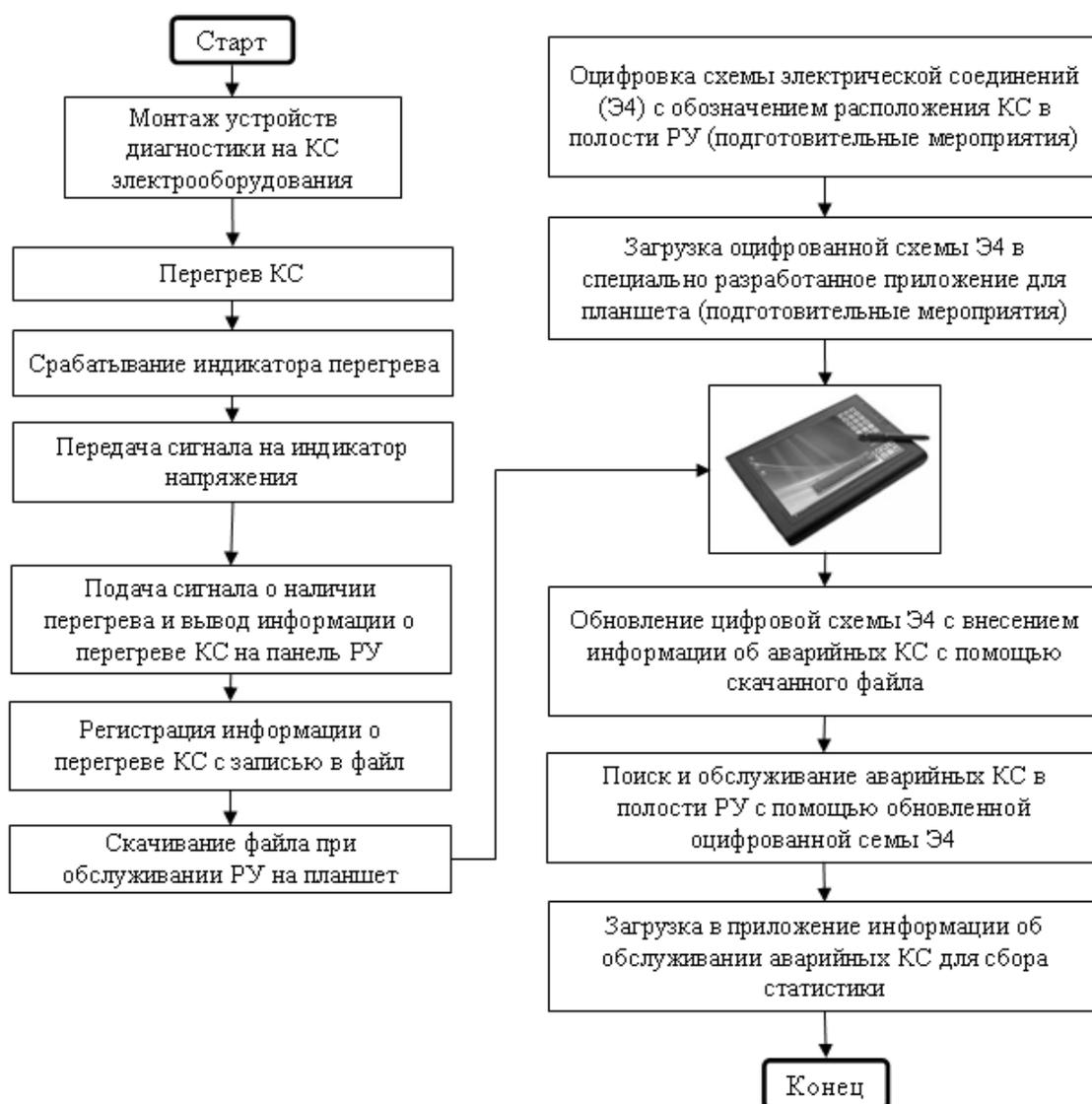


Рисунок 4. Технология адресного выявления аварийных КС с использованием автоматизированной системы

Технология предусматривает три различных вида работ, выполняемых в процессе выявления аварийных КС. Среди них:

-подготовительные технологические работы, выполняемые в режиме «off line», по конфигурированию и настройке параметров системы под конкретную реализацию;

-непрерывная работа в автоматическом режиме по сбору, диагностике и регистрации информации о текущем состоянии всех КС;

-работы, осуществляемые по запросу оператора с внешнего персонального компьютера по извлечению диагностической информации и её дальнейшей обработке.

В процессе выполнения работы регистратор информации о локальных превышениях температуры КС изготовлен в макетном исполнении. Регистратор предназначен для фиксации в энергонезависимой памяти информации о локальном повышении температуры КС и передаче (по запросу) этой информации на внешнее устройство (персональный компьютер). Регистратор также обеспечивает световую индикацию наличия перегрева КС на панели макета распределительного устройства.

Регистратор выполнен в виде единого конструктивного блока, устанавливаемого на DIN-рейку. Внутри блока располагаются все необходимые функциональные элементы макета, а на его лицевой панели – панель из светодиодных индикаторов, отображающих текущее состояние каждого из подключённых КС.

Структурная схема регистратора перегрева КС приведена на рисунке 5.

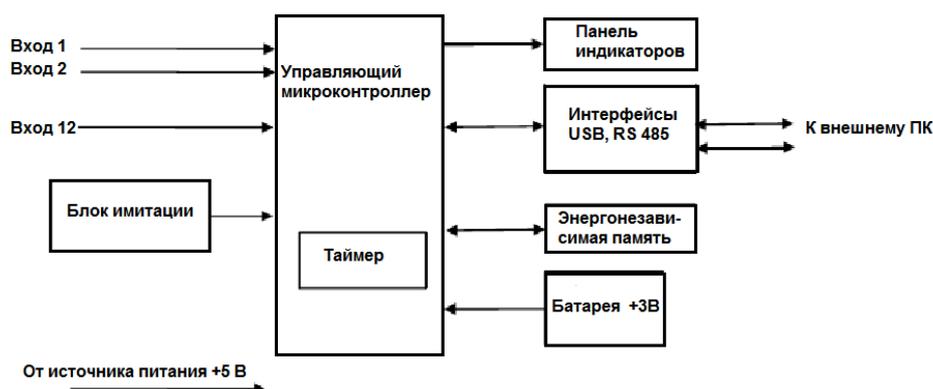


Рисунок 5. Структурная схема регистратора перегрева КС

Регистратор состоит из управляющего микроконтроллера со встроенным таймером и устройством дискретного ввода/вывода, панели светодиодных индикаторов, энергонезависимой электрически стираемой ПЗУ (EEPROM), контроллеров интерфейсов USB и RS-485, блока имитации «сухих контактов», внешней резервной +3В батареи. Штатное электропитание макета осуществляется от источника постоянного тока номиналом в +5В.

На рисунке 6 изображены регистратор, установленный в макете распределительного устройства и интерфейс программы для сбора статистики и анализа данных по наличию аварийных КС.

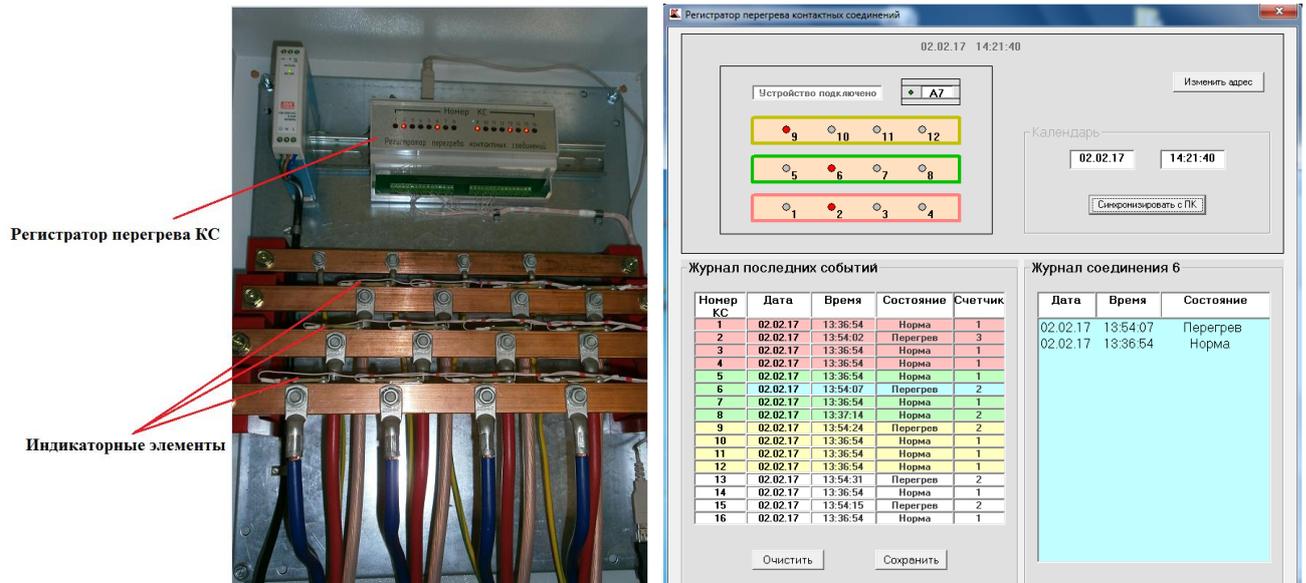


Рисунок 6. Автоматизированная система выявления аварийных КС в макетном исполнении

Центральным элементом регистратора является его вычислительное ядро – микроконтроллер, который управляет всеми основными функциями. Сигналы срабатывания термобиметаллических индикаторных элементов непрерывно поступают на встроенное устройство дискретного ввода/вывода микроконтроллера. Микроконтроллер регистрирует сигналы срабатывания индикаторных элементов, обрабатывает их, выводит на плату светодиодных индикаторов и записывает информацию о событии (номер канала и время срабатывания) в энергонезависимую EEPROM память. Для каждого канала предусмотрена запись 1000 событий. Запись производится «по кольцу», т.е., при заполнении памяти 1001 событие заменит первое.

Просмотр журнала событий состояния каждого КС производится при помощи внешнего компьютера путем отправления соответствующего запроса.

С помощью встроенного в микроконтроллер системного таймера реализуется работа программного модуля часов реального времени, обеспечивающего запоминание и регистрацию времени и даты срабатывания каждого из датчиков в формате «час-минута- секунда-число-месяц-год».

Для поддержания работы модуля часов реального времени при отсутствии основного питания, служит резервная литиевая батарея напряжением +3В. Настройка часов производится программно при помощи внешнего компьютера.

Блок имитации предназначен для контроля работоспособности регистратора. Он представляет собой плату микропереключателей, позволяющих имитировать срабатывание каждого датчика и осуществлять сквозной контроль канала регистрации.

Регистратор имеет встроенные средства для подключения внешних устройств и интеграции в электрическую сеть судна на основе последовательного удалённого интерфейса RS-485.

Дальнейшая разработка и внедрение автоматизированной системы регистрации аварийного состояния КС призваны повысить качество функционирования судовых ЭЭС и значительно сократить трудоемкость профилактических работ по обслуживанию электроустановок за счет фиксации информации о перегреве КС во время эксплуатации и адресного выявления аварийных контактов.

В **заклучении** подводятся итоги диссертационного исследования и перечисляются полученные результаты.

Основные выводы по работе

1. Проведённый анализ общепромышленных средств и методов выявления аварийного состояния контактных соединений электрооборудования показал, что применение этих средств и методов при эксплуатации судовых ЭЭС в ряде случаев малоэффективно либо неэффективно по технико-экономическим показателям. С учетом особенностей внешних воздействующих факторов, а также специфики эксплуатации и обслуживания электрооборудования судовых ЭЭС для выявления аварийных контактных соединений наиболее эффективным представляется применение термобиметаллических индикаторных элементов.
2. Разработана математическая модель, учитывающая особенности работы термобиметаллического индикаторного элемента средств выявления аварийного состояния контактных соединений электрооборудования. Указанная математическая модель позволяет оценить температурные перемещения термобиметаллических индикаторных элементов сложной формы с учетом температуры окружающего воздуха.
3. На основе разработанной математической модели предложена методика расчета предельной температуры срабатывания термобиметаллических индикаторных элементов для выявления аварийного состояния контактных соединений. Предложенная методика позволяет обосновать состав элементной базы средств выявления аварийного состояния конструктивно-монтажных узлов электрооборудования судовых ЭЭС.
4. Предложена технология адресного выявления аварийных контактных соединений оборудования судовых ЭЭС с использованием термобиметаллических индикаторных элементов в составе автоматизированной системы контроля. Эта технология непосредственно вписывается в систему планово-предупредительных работ по обслуживанию электрооборудования судовых ЭЭС, не требуя их корректировки.
5. Для реализации предложенной технологии разработана в макетном исполнении автоматизированная система регистрации аварийного состояния контактных соединений в

процессе эксплуатации судовых ЭЭС. Использование автоматизированной системы позволит осуществлять фиксацию информации о наличии аварийных контактных соединений в процессе эксплуатации судовых ЭЭС, существенно облегчить поиск аварийных контактов в полости электрооборудования для их дальнейшего обслуживания, а также осуществлять дополнительный контроль качества выполнения работ по обслуживанию электрооборудования для уменьшения влияния человеческого фактора.

6. Основными направлениями дальнейших исследований является интеграция автоматизированной системы выявления аварийных контактных соединений в системы диагностики судовых ЭЭС более высокого уровня, а также компенсация температуры окружающей среды при работе термобиметаллических индикаторных элементов.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных в перечне ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Гренчук А.М. О возможности массового применения средств диагностики пожароопасного состояния электрооборудования / А.М. Гренчук, В.И. Гуменюк // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – №2 [195]. – С. 210 – 215. (0,45/0,23 п.л.).
2. Гренчук А.М. Диагностика и анализ больших переходных сопротивлений для обеспечения пожарной безопасности электрических контактов / А.М. Гренчук, В.И. Гуменюк // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – №4 [207]. – С. 92 – 99. (0,43/0,26 п.л.).

Патенты на изобретения:

3. Патент № 2491687 (РФ). МПК Н01R 4/00, приор. 11.10.2011. Устройство для диагностики ослабления затяжки резьбового контактного соединения с токоведущим наконечником./ А.И. Горшков, А.М. Гренчук и др. – Бюл. № 24, 27.08.2013.
4. Патент № 2493640 (РФ). МПК Н01R 4/30, приор. 11.10.2011. Устройство для диагностики ослабления затяжки гайки резьбового контактного соединения токоведущих шин./ А.И. Горшков, А.М. Гренчук и др. – Бюл. № 26, 20.09.2013.
5. Патент № 2527567 (РФ). МПК Н01R 4/30, приор. 09.10.2012. Устройство регистрации ослабления затяжки гайки резьбового контактного соединения/ А.И. Горшков, А.М. Гренчук и др. – Бюл. № 25, 10.09.2014.
6. Патент № 2616285 (РФ). МПК Н01R 4/30, приор. 10.09.2015. Индикатор перегрева резьбового контактного соединения/ А.И. Горшков, А.М. Гренчук и др. – Бюл. № 11, 14.04.2017.

Публикации во всероссийских, региональных и ведомственных научных журналах и изданиях:

7. Гренчук А.М. Снижение пожарной опасности электроустановок с помощью средств визуальной диагностики аварийного состояния электрических контактных соединений / А.М. Гренчук, В.И. Гуменюк // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: сборник научных трудов VI Всероссийской научно-практической конференции, 24-26 апреля 2014 г. – СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014. – С. 213 – 215.
8. Гренчук А.М. Индикаторы пожарной опасности электрических контактных соединений / А.М. Гренчук, А.И. Горшков // Изобретатели в инновационном процессе России: Материалы Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, 20-21 декабря 2013 г. – СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014. – С. 322 – 324.

9. Гренчук А.М. Средства визуальной диагностики пожароопасного состояния электрических контактных соединений / А.М. Гренчук // Конференция молодых ученых и специалистов 2014. Сборник докладов. – СПб: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. – С. 35 – 38.
10. Гренчук А.М. Термобиметаллические индикаторы перегрева резьбовых контактных соединений / А.И. Горшков, А.М. Гренчук, В.В. Груздев // Крепеж, клеи, инструмент и ... - 2013. № 2 (44). – С. 32 – 33.
11. Гренчук А.М. О пожарной безопасности контактных соединений судового электрооборудования / В.И. Гуменюк А.М. Гренчук, // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, 23-25 апреля 2015 г. – СПб: Издательство Политехнического университета, 2015. – С. 223 – 226.
12. Гренчук А.М. Применение средств визуальной диагностики аварийного состояния электрических контактных соединений для снижения пожарной опасности электроустановок / А.М. Гренчук, В.И. Гуменюк // Высокие интеллектуальные технологии в национальных исследовательских университетах: Материалы международной научно-методической конференции, 5-7 июля 2014 г. – СПб: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014. С. – 17 – 22.