

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Сарсенбаева Ерлана Алиаскаровича
«Динамический мониторинг и прогнозирование перегрева
труднодоступных контактных элементов электрооборудования
технологических комплексов»

представленной на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности: 6D071800 – Электроэнергетика

Актуальность. В рамках реализации концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года предполагается существенное снижение среднего уровня износа электроэнергетического оборудования в Республике Казахстан к 2030 году. В настоящее время высокая степень изношенности электрооборудования технологических комплексов (ЭТК) относится к слабым сторонам электроэнергетической отрасли. Это предъявляет повышенные требования к рациональному выбору стратегии технического обслуживания и своевременному проведению ремонтных работ. Одним из наиболее слабых мест ЭТК являются контактные соединения (КС) коммутационных аппаратов распределительных устройств, ухудшенное техническое состояние которых приводит к значительным перегревам вплоть до фатального сваривания контакт-деталей. Поэтому мониторинг и прогнозирование перегрева контактных элементов являются необходимым компонентом технического обслуживания и ремонта (ТОиР) коммутационного оборудования.

Цель работы – разработка методики температурного контроля и прогнозирования перегрева недоступных контактных элементов разборных контактных соединений электрооборудования технологических комплексов (ЭТК) в режиме динамического мониторинга с использованием микропроцессорного датчика температуры недоступной поверхности (МД ТНП).

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи**:

- провести анализ существующих методов мониторинга технического состояния разборного КС, тесно связанного с его тепловым состоянием, характеризуемым переходным сопротивлением и температурой контактных элементов - поверхности токоведущей шины и контактной поверхности КС. Выбрать из существующих первичный измеритель – преобразователь для измерения температуры контактных элементов в высоковольтных установках среднего напряжения. По результатам исследований это терморезистор;

- проанализировать существующие методы температурного контроля контактных элементов КС коммутационных аппаратов ЭТК. Дать обоснование применения для контроля температуры недоступных контактных элементов в высоковольтных установках среднего напряжения одного из вариантов резистивного датчика температуры -

микропроцессорного датчика температуры недоступной поверхности (МД ТНП);

- разработать конструкцию и алгоритмы работы датчика МД ТНП поверхности токоведущей шины, недоступной для прямых измерений с помощью терморезистора, обеспечивающие повышение точности измерений за счёт использования аналитических решений уравнения теплопередачи через слой изолятора между измеряемой поверхностью и терморезистором. Разработать алгоритмы работы датчика МД ТНП при измерениях температуры поверхности токоведущей шины и температуры контактной поверхности;

- разработать методику температурного контроля в режиме динамического мониторинга и прогнозирования перегрева разборных КС с использованием датчика МД ТНП. Дать рекомендации по разработке конструкции МД ТНП, обеспечивающей возможность работы в условиях электромагнитных помех от высоковольтного электрооборудования.

Основная идея и внутреннее единство работы. Основопологающей идеей диссертационной работы является представление контакт-детали плоского симметричного КС в виде теплоизолированного с одного торца и боковой поверхности тонкого стержня, противоположный торец которого нагревается тепловой мощностью, выделенной на переходном контактном сопротивлении. Раздельный анализ процесса нагрева модельного стержня объёмным и плоским источником теплоты позволяет получить реализуемую средствами микропроцессорной техники формулу пересчёта измеренной на доступном теплоизолированном торце в температуру противоположного торца стержня, совмещённого с недоступной контактной поверхностью КС. Динамический мониторинг температуры контактной поверхности с помощью микропроцессорного датчика температуры недоступной поверхности (МД ТНП) на линейном участке процесса нагрева стержня испытательным или эксплуатационным прямоугольным импульсом тока силы, достаточной для обеспечения линейного закона изменения температуры, позволяет прогнозировать дальнейший процесс нагрева и тем самым исключить сваривание контакт-деталей. Перепрограммирование микроконтроллера МД ТНП даёт возможность перейти от определения температуры контактной поверхности к определению температуры поверхности плоской шины. При этом, задание в модифицированной передаточной функции пяти поправочных коэффициентов сводит динамическую погрешность измерений температуры поверхности токоведущей шины с помощью изолированного от неё тонким слоем диэлектрика терморезистора к 1°C .

Научная новизна работы. Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые предложено диагностировать дефектность разборных контактных соединений ЭТК, приводящую к фатальному свариванию, путём оперативного контроля температуры контактной поверхности КС при токовых воздействиях, создающих близкие по форме к прямоугольной импульсы тепловыделения, осуществляемого в режиме динамического мониторинга с помощью датчика МД ТНП.

Достоверность работы. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются публикациями в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки РК и в трудах Международных научных конференций, а также инновационным патентом РК на изобретение и положительным решением на выдачу патента на изобретение РФ. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается их сравнением с проведенными теоретическими расчетами.

Практическая ценность работы. Сильноточные контакты высоковольтного коммутационного оборудования среднего напряжения в процессе эксплуатации периодически подвергаются воздействию токов, существенно превосходящих номинальные значения, длительность которых сравнима с периодом тока промышленной частоты. Это происходит, например, при протекании через них токов короткого замыкания, пусковых токов мощных электродвигателей и т.д. Такие воздействия могут вызывать значительный нагрев контактов, вплоть до их плавления и возникновения фатальной сварки.

В процессе использования электрических машин, трансформаторов, аппаратов, кабелей и другого электрооборудования технологических комплексов возникают потери энергии в виде теплоты. Выделенная теплота повышает температуру проводников и контактных поверхностей и передается окружающей среде. Происходящий при этом нагрев оборудования ЭТК ограничивает срок его службы и является причиной возникновения аварийных ситуаций. Это приводит к необходимости проведения диагностики ЭТК, в частности разборных КС, на стадии его эксплуатации, использующей методы температурного контроля.

Наиболее критично к нагреву силовое электрооборудование. Кратковременные токовые импульсы, возникающие в ошиновках силового электрооборудования в результате коммутаций при пусках двигателей, отключения коротких замыканий и т.п. приводят к опасным повышениям температуры контактных поверхностей шин, требующим проведения защитных мероприятий. При этом мгновенные значения температуры на контактной поверхности не могут быть зафиксированы какими-либо средствами измерений вследствие ее недоступности.

Поскольку толщина токоведущих шин достигает десятков миллиметров, а толщина слоя с повышенным уровнем тепловыделения вблизи контактной поверхности составляет весьма малые доли миллиметра, то прямые измерения на поверхности шины не позволяют зафиксировать истинное значение температуры непосредственно в зоне контакта.

В то же время, анализ поля температуры в зоне плоского контакта на контактной поверхности, например, болтового контактного соединения, позволяет установить функциональную связь температур в контактной зоне и на открытой (свободной) поверхности контактного элемента (токоведущей шины). Связь фиксируемой на поверхности шины температуры с физическими характеристиками качества контакта (в частности с переходным сопротивлением и удельным тепловым потоком) позволяет сделать вывод о состоянии контакта.

Использование динамической оценки температуры при импульсных воздействиях в отличие от методик, основанных на анализе стационарного

теплового поля, позволяет в течение некоторого отрезка времени наблюдать тепловые проявления дефектов в условиях контрастного распределения температуры. По результатам температурного контроля на ранней стадии действия импульса с помощью МД ТНП можно прогнозировать перегрев разборного КС и определять время срабатывания защиты КС коммутационных аппаратов от перегрева и от фатального сваривания контакт-деталей в том числе.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В качестве первичного измерителя – преобразователя МД ТНП для температурного контроля КС высоковольтных установок среднего напряжения при соответствующем выборе материала и толщины изолятора могут использоваться терморезисторы, изолированные от токоведущей шины.

2. Полученные в результате теоретических исследований и подтвержденные экспериментами передаточные функции, связывающие температуру на доступной для измерения поверхности плоских шин с температурой на контактирующих поверхностях разборного контакта.

3. Расчетная методика, основанная на представлении тепловыделения в переходном сопротивлении контакта в виде плоского источника теплового потока, обеспечивает достаточную точность оценки температуры при развитии дефекта контакта.

4. Определение времени срабатывания защиты разборного соединения от перегрева по тепловой реакции на воздействие прямоугольным импульсом тока.

Личный вклад соискателя состоит:

- в анализе и обобщении литературных данных;
- в создании и проведении исследований на экспериментальном стенде для испытаний микропроцессорного датчика МД ТНП;
- в разработке новых технических решений.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы были представлены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Энергетика» и на международных научно-практических конференциях и форумах:

- международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» (Россия, г. Севастополь, 2014);

- международный форум «Инженерное образование и наука в XXI веке: проблемы и перспективы», посвященный 80-летию КазНТУ имени К.И. Сатпаева (г. Алматы, 2014);

- международные Сатпаевские чтения «Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана» (г. Алматы, 2015);

- международные Сатпаевские чтения «Конкурентоспособность технической науки и образования» (г. Алматы, 2016);

- конференция «NDT days 2016» (Болгария, г. Созополь, 2016);

- Всемирный Конгресс инженеров и ученых «Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации» WSEC-2017 (г. Астана, 2017).

Публикации. Результаты выполненной работы отражены в 17 научных публикациях, в том числе в международных и зарубежных научных изданиях, а также входящий в базу данных Scopus (импакт-фактор 0,208 журнал Russian Electrical Engineering), 7 статей в материалах международных научно-практических конференциях и форумах, 1 инновационном патенте РК и 1 положительном решении о выдаче патента на изобретение РФ.

Объем и структура. Работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 149 страницах машинописного текста, включает 46 рисунка, 12 таблиц, 8 приложений, список использованных источников из 105 наименований.

Во введении показана актуальность научной работы и конкретизирована исследуемая проблема. Поставлены цель и задачи научных исследований. Приведены научная новизна и положения, выносимые на защиту. Показана практическая значимость полученных результатов. Освещены публикации, апробация, а также связь работы с планом государственных научных программ.

Первый раздел диссертации посвящён обзору существующих методов мониторинга технического состояния и изучению вопросов перегрева разборных контактных соединений ЭТК.

Мониторинг технического состояния электрооборудования технологических комплексов осуществляются путём визуального и тепловизионного контроля. Предпочтение отдаётся тепловизионному – бесконтактному методу мониторинга. Этим способом оценивается дефектность элементов ЭТК через его тепловое проявление на внешних поверхностях электрооборудования. Существенным недостатком тепловизионного способа является то, что он не позволяет выявлять дефекты, связанные с нагревом внутренних частей контролируемого электрооборудования – недоступных контактных элементов, и в частности, внешней поверхности токоведущей шины и контактной поверхности КС.

Указанный недостаток устраняется переходом к использованию в системах мониторинга технического состояния разборных КС контактных методов измерений температуры с помощью терморезисторов.

Во втором разделе рассмотрено выявление дефектов контактных соединений ЭТК на ранней стадии их развития, контроль температуры КС с использованием микроконтроллеров, дано обоснование резистивного микропроцессорного датчика температуры недоступной поверхности (МД ТНП) и описание особенностей динамического мониторинга КС.

В основу динамического мониторинга температуры недоступных для прямого измерения контактных элементов ЭТК (поверхности токоведущей шины и контактной поверхности) положена динамическая оценка температуры контактной поверхности при импульсных токовых нагрузках.

Использование динамической оценки температуры при импульсных воздействиях, основанной на анализе нестационарных полей температуры, в отличие от методик, основанных на анализе стационарного теплового поля, позволяет в течение некоторого достаточно короткого отрезка времени наблюдать тепловые проявления дефектов в условиях более контрастного распределения температуры и по результатам температурного контроля на ранней стадии прогнозировать перегрев КС вплоть до температуры плавления материала контакт-деталей.

Для осуществления динамического мониторинга предложено использовать микропроцессорный датчик температуры недоступной поверхности (МД ТНП).

В третьем разделе рассмотрены технические решения реализации датчика МДТНП, построение передаточных функций датчика и алгоритмы работы датчика в режимах измерения температуры поверхности токоведущей шины и температуры контактной поверхности.

Предложена конструкция датчика МД ТНП - поверхности токоведущей шины с резистивным чувствительным элементом, размещённым на верхней поверхности диска диэлектрического материала, толщина которого во много раз меньше диаметра, но обеспечивает надёжную изоляцию терморезистора от поверхности шины, находящейся под высоким электрическим напряжением.

Рассмотрены возможности повышения точности косвенных измерений температуры трудно доступных контактных элементов КС путём рационального выбора конструкции датчика, совершенствования алгоритмов работы датчика и уточнения передаточных функций, реализованных в микроконтроллере МД ТНП.

Разработан алгоритм и построена передаточная функция датчика МД ТНП для работы в режиме измерения температуры поверхности токоведущей шины. Рассмотрены варианты передаточной функции с двумя и пятью поправочными коэффициентами, полученные путём анализа аналитического решения уравнения теплопроводности, описывающего теплопередачу от токоведущей шины к терморезистору через тонкий слой диэлектрика.

Разработан алгоритм и построена передаточная функция датчика МД ТНП для работы в режиме измерения температуры контактной поверхности при нагреве разборного КС прямоугольным импульсом тока.

Четвёртый раздел посвящён разработке методики температурного контроля разборного КС в режиме динамического мониторинга и прогнозированию перегрева разборных КС. Рассмотрены: построение передаточной функции датчика МД ТНП с использованием параметров импульса тока, реализация датчика МД ТНП с гальваническим типом передачи сигнала и возможности применения для передачи сигнала оптических каналов. Показано применение микропроцессорного датчика МД ТНП в задачах тепловой диагностики разборных контактных соединений ЭТК.

Наличие датчиков температуры МД ТНП, обладающих достаточным, не хуже 0.001с временным разрешением, позволяет эффективно решать задачи

тепловой диагностики контактных соединений в ошиновках распределительных устройств высокого напряжения. Способность датчика измерять временные зависимости температуры поверхности шин на отрезках 0.1-1с, позволяет диагностировать состояние контактных соединений в процессе отключения токов короткого замыкания или при пусках электродвигателей. Наряду с требованиями к временному разрешению, МД ТНП должен удовлетворять условиям электромагнитной совместимости при характерных значениях тока короткого замыкания порядка 10 кА. Он должен также безопасно функционировать при электрическом потенциале шин относительно земли до 35 кВ.

Датчик на основе терморезистора необходимо снабдить автономным источником питания на основе индуктивной связи с током силовой шины, снабженным необходимыми электронными компонентами для защиты от перенапряжений при токах короткого замыкания и пусковых токах, а также средствами стабилизации входного напряжения.

Применение контактного сенсора для измерения температуры поверхности силовой шины высокого напряжения (выше 30 кВ) нецелесообразно вследствие низких динамических характеристик и небезопасных последствий электрического пробоя изоляционной компоненты конструкции.

Использование пленочного терморезистора в сочетании с оптическим каналом передачи сигнала к усилительно-преобразовательному устройству обеспечивает малую инерционность датчика, его помехоустойчивость, но требует автономного источника тока питания терморезистора. Перспективным вариантом представляется непосредственная передача теплового излучения шины с помощью оптоволокну в инфракрасном диапазоне волн. Однако оптоволоконные кабели, способные передавать излучение с длиной волны порядка 10-20 мкм в настоящее время существуют только в виде экспериментальных образцов.

В заключении отражены основные результаты и выводы по диссертационной работе.