

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию**

**Иванова Дмитрия Алексеевича**

**«Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды**

### **Актуальность темы**

В последнее десятилетие особое внимание в электроэнергетике, как в России, так и за рубежом, было обращено на проблему возрастания числа аварий в высоковольтном оборудовании, возникших из-за повреждений высоковольтных изоляторов (ВИ). Анализ аварий на подстанциях и открытых распределительных устройствах показал, что повреждения ВИ в большинстве случаев вызваны не только естественным старением в приложенном электрическом поле (ЭП), но и перенапряжениями, а также наличием первоначальных дефектов при изготовлении ВИ.

Применяемые методы контроля рабочего состояния высоковольтных изоляторов, согласно существующим ГОСТ РФ и международным стандартам, в основном сводятся к периодическим плановым визуальным осмотрам, при наличии технической возможности – проверкам с использованием тепловизоров или ультрафиолетовых камер. Для проведения полного обследования технического состояния ВИ его выводят из работы и испытывают в лаборатории по методикам в соответствии с ГОСТ или отраслевыми регламентами. Поэтому весьма актуальной является разработка методологии и аппаратного обеспечения для дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации для контроля их текущего технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

К настоящему времени существуют только отдельные попытки использования для бесконтактного контроля высоковольтного оборудования различных методов измерения характеристик частичных разрядов, причем, в основном, при контроле состояния высоковольтных трансформаторов. Как ранее было установлено, частичные разряды происходят в уже возникших дефектах, и тем самым их характеристики отражают степень дефектности высоковольтных элементов.

С учетом представленной выше актуальности темы исследований совершенно правильной видится цель работы, состоящая в улучшении метрологических, технико-экономических и функциональных возможностей дистанционного контроля и диагностики ВИ подстанций и линий электропередачи в процессе эксплуатации с оценкой технического состояния на основе анализа характеристик частичных разрядов, позволяющая решить важную научно-техническую проблему – повышение надежности энергетического оборудования (подстанций и линий электропередачи) и уменьшения потерь электроэнергии.

### **Оценка содержания диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 285 страниц машинописного текста, включает 74 рисунка, 9 таблиц, библиографию из 229 наименований, содержит 8 приложений.

Во введении диссертационной работы Иванова Д.А. приведена общая характеристика работы, кратко описываются актуальность темы и степень ее разработанности, цель и основные задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и публикациях, личном вкладе автора, соответствии диссертации научной специальности.

В первой главе диссертационной работы рассмотрены научные и технические проблемы диагностики диэлектрических элементов высоковольтного энергетического оборудования. Обсуждены физические свойства основных диэлектрических материалов, используемых для производства ВИ, а также процессы дефектообразования в них. На основе анализа известных данных и результатов экспериментов в конце главы сформулированы необходимые требования к выполнению работы и основная концепция исследования.

Во второй главе диссертационной работы на основе первоначальных экспериментов автора по изучению особенностей возникновения частичных разрядов (ЧР) и их детектирования в диэлектрических материалах с использованием контактного датчика были определены наиболее перспективные методы неразрушающего контроля и диагностики. Автором были установлены и обоснованы основные положения методологии – комплексность в применении нескольких физических методов детектирования ЧР и необходимый набор диагностических признаков для оценки состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

В третьей главе диссертационной работы описаны разработка и апробация методологических основ дистанционной диагностики ВИ в электроэнергетике. С помощью разработанного комплексного способа бесконтактной дистанционной диагностики работоспособности ВИ, включающего первоначальное стендовое обнаружение локальных областей с повышенными напряженностями электрического поля с использованием электрооптического датчика и измерение набора характеристик ЧР, были исследованы особенности дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель» полимерных и фарфоровых изоляторов. Полученные результаты выполненного обследования технического состояния ВИ в стендовом и полевом вариантах доказали возможность дистанционно обнаруживать вид и место расположения наиболее опасных дефектов с  $q \geq 2,5$  нКл и диагностировать степень работоспособности ВИ в условиях их эксплуатации. Это стало возможным при добавлении к ранее установленным автором диагностическим признакам дистанционного контроля, отличающим исправные ВИ от дефектных, дополнительных признаков, позволяющих определять вид и место расположения дефектов. К ним относится значительное расширение и изменение фазовых интервалов возникновения ЧР, увеличение количества и интенсивности ЧР в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, уменьшение ширины отрицательных импульсов ЧР.

В четвертой главе диссертационной работы представлены результаты изучения влияния мощных частичных разрядов (МЧР) на развитие дефектов в ВИ, рассмотрены особенности детектирования МЧР акустическим и электромагнитным датчиками. Изучение характеристик МЧР в полимерных и фарфоровых ВИ позволило экспериментально проверить ряд ранее выдвинутых гипотез, в которых обсуждались механизмы появления МЧР. С помощью электромагнитного и акустического датчиков бесконтактно были изучены характеристики ЧР, в том числе МЧР, на стенде кафедры ПЭ КГЭУ и на ряде подстанций ОАО «Сетевая компания», г. Казань, в полимерных и фарфоровых изоляторах.

В пятой главе диссертационной работы представлены результаты разработки технологии мониторинга технического состояния ВИ на текущий момент и прогноза их остаточного ресурса и его реализации на высоковольтных электрических подстанциях ОАО «Сетевая компания», г. Казань. На основе изучения основных причин преждевременного старения и электрического разрушения ВИ автором разработан комплексный метод контактного и дистанционного (бесконтактного) мониторинга такого оборудования. Полученный экспериментально с помощью трех физических

методов (электромагнитный, электрооптический и акустический) набор диагностических параметров дефектов позволяет регистрировать их зарождение, развитие, а также определять с достаточной степенью достоверности техническое состояние ВИ. Выполненные стендовые и полевые испытания разработанной методики и измерительного комплекса показали реальную возможность его использования для мониторинга состояния ВИ, находящихся в режиме эксплуатации.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработаны методики периодического дистанционного комплексного измерения одновременно электромагнитным и акустическим датчиками и анализа характеристик частичных разрядов, измерения напряженностей электрических полей электрооптическим датчиком, локализации положения дефектных изоляторов на подстанциях, которые повышают информативность и достоверность оценки технического состояния высоковольтных изоляторов путем сопоставления их с параметрами наиболее опасных при эксплуатации дефектов.

2. Разработан испытательный стенд, включающий в себя аппаратный комплекс с различными физическими датчиками (электромагнитный, электрооптический, акустический), цифровой программный комплекс и регулируемый источник высокого напряжения позволяет комплексно и дистанционно определять и анализировать характеристики диагностических параметров высоковольтных диэлектрических материалов и элементов.

3. Установлен набор диагностических параметров, включающий интенсивность, количество, смещение фазовых углов появления МЧР, форму и ширину импульсов МЧР, которые дают возможность определять техническое состояние ВИ в условиях эксплуатации.

4. Разработан комплексный метод обнаружения и регистрации вида, места расположения и роста наиболее опасных дефектов, который позволяет прогнозировать процессы деградации высоковольтных изоляторов путем периодической регистрации выявленных диагностических параметров.

5. Установлены особенности дистанционного мониторинга ЧР в ВИ. Обоснована роль мощных ЧР в ускорении процессов старения ВИ.

**Теоретическая и практическая ценность диссертационного исследования**

1. Разработана физическая модель особенностей появления и динамики развития МЧР, позволяющая определять характер дальнейшего развития наиболее опасных дефектов высоковольтных изоляторов и тем самым оценивать их техническое состояние.

2. Предложена и протестирована методология периодического диагностирования (мониторинга) с помощью разработанного набора характеристик частичных разрядов с использованием нескольких датчиков различной физической природы и последующей математической обработки результатов измерений, позволяющая более точно по сравнению с существующими методами оценивать текущее техническое состояние высоковольтных изоляторов на основе предложенного набора диагностических признаков и прогнозировать остаточный ресурс.

3. Разработанная методика мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов на основе детектирования и последующего анализа характеристик мощных частичных разрядов может быть применена для диагностики других конструктивных и технологических элементов высоковольтной энергетики.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов и обоснованность выводов и положений подтверждается согласованностью результатов по характеристикам ЧР, полученных различными методами, с результатами практических испытаний изоляторов в полевых условиях. Автором изучены и критически анализируются известные экспериментальные и теоретические результаты других исследователей. Список использованной литературы содержит 229 наименований. Результаты работы не противоречат известным положениям науки и опубликованным в научно-технической литературе данным.

Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на десятках международных и всероссийских научно-технических конференций. Результаты диссертации отражены в 75 печатных работах в журналах и сборниках. Автором опубликовано 11 статей в российских и зарубежных рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных SCOPUS или/и Web of Science (и приравненных к изданиям, входящим в перечень ВАК), 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 монография, и 39 работ в рецензируемых изданиях и сборниках материалов конференций, получены 1 патент на изобретение, 4 патента на полезную модель, 5 свидетельств на программы для ЭВМ.

**Автореферат** достаточно полно и адекватно отражает основное содержание диссертационной работы, написан, как и сама диссертация технически грамотным литературным языком с использованием принятой в данной области науки и техники терминологии.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1) В диссертации указано, что разработаны метод и аппаратно-программный комплекс дистанционного измерения характеристик частичных разрядов с определением вида и места расположения дефекта. В данном методе используются узконаправленные электромагнитная и акустическая антенны, которые принимают сигналы ЧР в виде электромагнитных импульсов и усиливают их с помощью широкополосных усилителей. В работе не представлено насколько их диаграммы направленности позволяют различать на подстанции отдельные изоляторы?

2) Автором на основе выполненных экспериментов и натурных испытаний установлен набор диагностических параметров на основе измеренных характеристик ЧР, позволяющий определять вид и место дефекта и определять техническое состояние ВИ. В качестве диагностических параметров предложено использовать интенсивность, количество, сдвиги фазовых углов появления МЧР, полный заряд мощных ЧР, измеренных одновременно акустическим и электромагнитным датчиками, форму и ширину одиночных импульсов МЧР. Однако не указано как меняются формы импульсов МЧР для двух видов исследованных дефектов - контакте «стержень-оконцеватель» и дефекте стержня в зависимости от текущего технического состояния ВИ в условиях эксплуатации.

3) В работе отсутствует, каким образом при проведении натурных испытаний измерялись формы импульсов МЧР для разных типов дефектов?

4) Автором диссертационного исследования разработана физическая модель особенностей появления и преобразования мощных частичных разрядов. В этой модели учитываются перераспределения приложенного и индуцированного электрических полей тождественно реально протекающим процессам в области дефекта диэлектрического материала ВИ на основе современных представлений о газовых разрядах в замкнутых пространствах миллиметрового или субмиллиметрового размера. Однако, я считаю, что требует пояснения вопрос, как с физической точки зрения происходит генерация критических акустических импульсов в высоковольтных изоляторах посредством индуцированных полей частичных разрядов.

Высказанные замечания не снижают общего благоприятного впечатления от диссертационной работы и во многом носят характер пожеланий для будущего продолжения исследований.

### **Заключение**

Оценивая уровень работы в целом, считаю, что, несмотря на вышеуказанные недостатки, диссертационная работа представляет собой

законченное научное исследование, результаты которого можно квалифицировать как новые научно обоснованные технические и методологические решения, внедрение которых вносит существенный вклад в развитие электроэнергетической отрасли Российской Федерации, а также содержат решение важной научно-технической проблемы повышения надежности энергетического оборудования (подстанций и линий электропередачи) и уменьшения потерь электроэнергии.

Представленная диссертационная работа «Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов» соответствует паспорту специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды по пунктам 1 («Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»), 2 («Разработка методологий прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса изделий, направляющих оптимизацию методов, приборов, систем контроля и диагностирования изделий, повышение надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»), 3 («Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»), 4 («Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды») и 6 («Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии»).

Диссертационная работа «Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов» отвечает критериям Положения о присуждении ученых степеней, а

ее автор – Иванов Дмитрий Алексеевич – заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Официальный оппонент

Заведующий кафедрой радиофизики  
ФГАОУ ВО «Казанский  
(Приволжский) федеральный  
университет»  
доктор физико-математических наук  
по специальности  
01.04.03 - Радиофизика,  
доцент



Шерстюков  
Олег  
Николаевич

01.03.2023г.

Сведения:

Полное наименование организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Юридический адрес: 420008, Россия, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18.

Телефон: 8(843) 292 81 92. Эл. адрес: [Oleg.Sherstyukov@kpfu.ru](mailto:Oleg.Sherstyukov@kpfu.ru)

Должность: Заведующий кафедрой радиофизики

Ф.И.О.: Шерстюков Олег Николаевич

