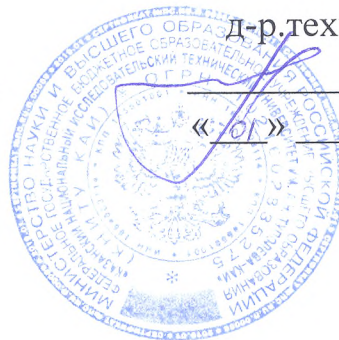


-МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ»
(КНИТУ-КАИ)
ул. К. Маркса, д. 10, Казань, 420111
Тел.: (843) 238-41-10 Факс: (843) 236-60-32
E-mail: kai@kai.ru <http://www.kai.ru>
ОКПО 02069616, ОГРН 1021602835275,
ИНН/КПП 1654003114/165501001

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной и
инновационной
деятельности КНИТУ-КАИ

д-р.техн.наук, профессор

С.А.Михайлов



« 01 »

03

2023 г.

02.03.2023 № 1-5090-1-17/1
На № _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации

федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

на диссертационную работу Иванова Дмитрия Алексеевича «Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов», представленную в диссертационный совет 24.2.310.01, созданный на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Актуальность темы диссертации

Проблема повышения эксплуатационной надежности высоковольтного энергетического электрооборудования является первостепенной для отечественной энергетики. Одним из основных элементов высоковольтных энергетических систем являются высоковольтные изоляторы (ВИ) (подвесные, опорные), техническое состояние которых напрямую влияет на надежность всей системы. В высоковольтном оборудовании используются

различные диэлектрические материалы и элементы конструкции. В процессе эксплуатации оно подвергается влиянию сильных электрических полей, электродинамических и тепловых воздействий. Это приводит к образованию дефектов, а затем электрических пробоев и в конечном итоге к выходу ВИ из строя.

В этой связи проводятся многочисленные исследования в таких направлениях, как изучение электрофизических и физико-химических процессов в диэлектрических материалах, создание на этой основе более совершенных изолирующих элементов, а также разработка и применение более совершенных методов контроля и диагностики оборудования.

Актуальной целью технического диагностирования является однозначное определение дефектов с прогнозированием их дальнейшего развития и остаточного ресурса высоковольтного оборудования. Современные отечественные ГОСТ и международные стандарты рекомендуют метод контроля состояния изоляции на основе регистрации частичных разрядов (ЧР), который является одним из общепризнанных способов неразрушающего контроля ВИ. Этот метод позволяет выявлять дефекты изоляции на самых ранних стадиях ее возникновения, отслеживать их развитие, оценивать текущее состояние изоляции и возможность ее дальнейшей эксплуатации. Он применяется в основном для однократных оценок рабочего состояния высоковольтных энергосистем при плановых обследованиях.

В последние десятилетия в электроэнергетике осуществляется переход от системы планово-предупредительного обслуживания и ремонта к обслуживанию по техническому состоянию. Анализ текущего технического состояния осуществляется с помощью различных методов и средств неразрушающего и аналитического контроля. Их отличает дистанционность проведения контроля, работа на действующих объектах без прекращения передачи электроэнергии, а также переход от разовых обследований к мониторингу ВИ. Стандартизированные методы и устройства дистанционного определения параметров дефектов, их развития и степени влияния на дальнейшую работоспособность оборудования используются энергетическими компаниями достаточно редко ввиду отсутствия нормативно-технической документации.

Решить эти проблемы можно путем периодического контроля развития дефектов в ВИ, который стал еще более актуальным после обнаружения в изоляторах мощных частичных разрядов (МЧР), превышающих по интенсивности обычные ЧР в несколько раз. Было установлено, что МЧР возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях

больших дефектов, созданных предыдущими обычными по интенсивности ЧР.

МЧР вызывают деградацию диэлектрических поверхностей дефектов, ускоряя развитие дефектов и уменьшая срок эксплуатации ВИ, что говорит об **актуальности** создания и исследования методов и аппаратуры дистанционного мониторинга технического состояния находящихся в работе высоковольтных изоляторов и других диэлектрических элементов линий электропередачи и подстанций, установления их технического состояния посредством дистанционного измерения и последующего анализа разработанных автором диагностических параметров (по характеристикам ЧР) наиболее опасных дефектов.

Диссертация Иванова Дмитрия Алексеевича посвящена разработке методологии дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации, прогнозированию срока их службы на основе изучения характеристик частичных разрядов, что способствует в конечном итоге повышению функциональной надежности энергетического оборудования.

Иванов Д.А. при проведении диссертационного исследования использовал комплексный подход к измерению характеристик частичных разрядов в высоковольтных изоляторах, включающий применение системного анализа характеристик дефектов, которые были определены в ходе экспериментальных исследований, выполненных на оригинальных стендах и производственных объектах высоковольтной энергетики с использованием нескольких физических методов. Разработанный комплексный метод дистанционного диагностирования ВИ в процессе эксплуатации обеспечит повышение достоверности в оценке технического состояния и прогнозирования эксплуатационного ресурса ВИ, что является важным для развития энергетической отрасли Российской Федерации.

Новизна полученных результатов и выводов

Научная новизна диссертации не вызывает сомнений, поскольку в работе представлены новые методики, предложены и разработаны оригинальные авторские решения и подходы.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Выполненное с помощью разработанного и изготовленного аппаратно-программного комплекса изучение набора диагностических параметров ВИ в стендовом и полевом вариантах позволило развить новые представления о природе возрастания электрического поля в области дефекта за счет полей, индуцированных предыдущими частичными разрядами.

2. Впервые изучены закономерности возникновения мощных частичных разрядов на дефектах в высоковольтных изоляторах в процессе эксплуатации. Установлено, что главной причиной возникновения мощных частичных разрядов является векторное сложение напряженностей приложенного к ВИ электрического поля и поля, образованного предыдущими частичными разрядами на диэлектрических поверхностях дефекта.

3. Предположено и экспериментально подтверждено, что индуцированные поля по напряженности могут значительно превосходить напряженности приложенных полей в энергетических высоковольтных системах, и таким образом приводить к ускоренной локальной деградации диэлектрических элементов в процессе эксплуатации.

4. Разработанный цифровой программный комплекс для определения различных характеристик ЧР, их изменений в зависимости от параметров дефектов и их развития позволил более достоверно оценивать техническое состояние ВИ.

5. Разработана комплексная методика определения вида, места расположения наиболее опасных дефектов, позволяющая прогнозировать процессы деградации высоковольтных изоляторов путем периодической регистрации выявленных диагностических параметров.

Новизна технических решений подтверждена патентами РФ №2679759 «Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов», №206382 «Устройство оперативного мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи», №193020 «Роботизированное устройство для верхового осмотра состояния воздушных линий электропередачи», №185311 «Устройство оперативного мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи», №211126 «Устройство оперативного онлайн-мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи», свидетельствами на ПЭВМ №2021668517 «Программный комплекс записи и обработки сигналов частичных разрядов в процессе мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов», №2020666708 «Программа анализа среднего значения мощности сигналов радиоканалов протокола ZigBee на разных частотах», №2022664225 «Программа обработки и визуализации данных для системы автоматического мониторинга состояния ВЛЭП и подстанций», №2022663236 «Программа обработки сигналов с акустических датчиков», №2022666391 «Программа обработки диагностической информации, регистрируемой электромагнитным датчиком частичных разрядов».

Теоретическая и практическая значимость

Результаты диссертационного исследования Иванова Д.А. обладают несомненной теоретической и практической значимостью. Совокупность сформулированных в диссертации положений и выводов развивает методическое приборно-программное обеспечение дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации, позволяет прогнозировать срок их службы на основе изучения предложенного набора характеристик частичных разрядов.

Практическая значимость заключается в том, что:

1. 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.

2. Разработанная методика мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов на основе детектирования и последующего анализа характеристик мощных частичных разрядов может быть применена для диагностики других конструкционных и технологических элементов высоковольтной энергетики, таких как трансформаторы тока и напряжения, вводы силовых трансформаторов, токоограничивающие сухие реакторы, проходные изоляторы, кабельная арматура и др.

Результаты работы внедрены в виде разработанной системы мониторинга технического состояния ВИ на подстанции, комплексной методики определения вида, места расположения и дальнейшего развития наиболее опасных дефектов, многопараметрического измерительного устройства в ПАО «Татнефть», г. Альметьевск, а также на кафедре «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета, в учебном процессе и при проведении научных исследований, что подтверждается приведенными в диссертации актами использования.

Результаты работы использовались при выполнении хозяйственной НИР по договору 2015/КЭС/21 от 21.01.2015 в ОАО «Сетевая компания», г. Казань, поддержаны грантами РФФИ 17-48-160878, 18-08-00203, 20-38-90145, Президента Российской Федерации 075-15-2020-172, Госзаданием на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий

электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (номер темы 075-03-2022-151).

Обоснованность и достоверность

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, разработанных конструкций и приборов для периодического дистанционного комплексного измерения и анализа характеристик частичных разрядов, локализации положения дефектных изоляторов на подстанциях, подтверждаются обширным объемом экспериментальных данных на стандартных образцах, апробацией блоков аппаратно-программного комплекса при исследованиях ВИ на подстанциях и ЛЭП, широким использованием цифровых методов конструирования, математического моделирования и обработки данных на базе лицензионных программ LabView, Altium Designer и Multisim.

Работу отличает глубина проработки рассматриваемых вопросов, последовательная аргументация выводов. Выводы представляются обоснованными, результаты отличаются научной достоверностью, которая обеспечена использованием апробированных методов, корректной постановкой исследовательских задач и их физической обоснованностью, применением в измерительном комплексе современной элементной базы, комплексным подходом к методам исследований, которая подтверждена сопоставимостью результатов, полученных в стендовом режиме, с результатами испытаний ВИ на подстанциях в условиях эксплуатации; корректной обработкой полученных результатов с использованием современных средств вычислительной техники.

Важно подчеркнуть всесторонний характер проведенного исследования, последовательность содержащихся в нем предложений и выводов, чему во многом способствовала удачная структура диссертации, которая состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 285 страницах текста, включает 74 рисунка, 9 таблиц, библиографию из 229 наименований, содержит 8 приложений. Результаты работы изложены в 75 печатных работах в журналах и сборниках, в том числе 11 статьях в российских и зарубежных рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах SCOPUS или/и Web of Science (и приравненных к изданиям, входящим в перечень ВАК), 12 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патенте на изобретение, 4 патентах на полезную модель, 5 свидетельствах на программы для ЭВМ, 1 монографии и 39

работах в прочих рецензируемых изданиях и сборниках материалов конференций.

Изложение материала последовательное, логичное и адекватно отражает существо решаемых задач. Содержание автореферата соответствует диссертации и правильно отражает ее основные результаты и выводы.

Значимость результатов диссертации для развития соответствующей отрасли науки

Результаты диссертации соответствует паспорту специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Значимость результатов диссертации для науки и производства заключается в том, что в ней содержится разработка и апробация методик периодического дистанционного комплексного измерения и анализа характеристик частичных разрядов, измерения напряженностей электрических полей электрооптическим датчиком, локализации положения дефектных изоляторов на подстанциях, разработка испытательного стенда для комплексного и дистанционного определения и анализа характеристик диагностических параметров ВИ, сформулированный набор диагностических параметров для определения технического состояния ВИ в условиях эксплуатации, разработка и апробация комплексного метода обнаружения и регистрации вида, места расположения и роста локально расположенных на поверхностях ВИ наиболее опасных дефектов и набора характеристик частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками, особенности дистанционного мониторинга ЧР и МЧР и их роль в ускорении процессов старения ВИ. Совокупность указанных результатов имеет значение для развития теории и практики неразрушающего и аналитического контроля и диагностики высоковольтного энергетического оборудования.

Вместе с тем диссертация не лишена **недостатков**:

1. Методология. Для широкого спектра разработанных методик отсутствуют:

- алгоритмический или любой другой графический интерфейс их представления, что снижает восприятие достигнутых результатов;
- сведения о прохождении методиками экспертных процедур и реквизитов их утверждения уполномоченными органами, что очевидно сделано, но не отражено в работе.

2. Аппаратно-программный комплекс. При последовательном и систематическом изложении в диссертации этапов формирования комплекса, что является стержнем работы, в заключении и выводах отсутствуют:

- численные оценки улучшения метрологических и технико-экономических возможностей дистанционного контроля и диагностики, что заложено в цели работы;

- визуальное представление комплекса в реальных полевых условиях, что также заложено в цели работы, как диагностика высоковольтных изоляторов (ВИ) подстанций и линий электропередачи в процессе эксплуатации.

3. Система дистанционного мониторинга. В диссертации отражены в основном вопросы обработки информации с известных измерительных преобразователей. Обеспечение помехозащищенности комплекса и системы сбора информации, дистанционности измерений практически не отражено в работе или сводится к обеспечению принципов неразрушающего контроля и его бесконтактности, хотя комплекс в своей аппаратной части работает в жесткой окружающей среде и электромагнитной помеховой обстановке.

4. Решение научной проблемы. Необходимо пояснить где и как по тексту диссертации отражено решение одной из компонент поставленной научной проблемы – прогнозирование срока их службы на основе изучения характеристик частичных разрядов, способствующее повышению функциональной надежности энергетического оборудования.

5. Анализ представления результатов. В опубликованной автором статье в журнале *Energies* (Q1) можно найти больше существенных деталей, определяющих достоинства диссертации, чем в самой диссертации и ее автореферате. Это еще раз свидетельствует о том, что в диссертации не дано практических рекомендаций для четкого понимания, например, обязательности применения всех типов датчиков одновременно, или достаточно одного из них в определенных условиях для получения требуемого количества информации для решения основных задач – дефектности изолятора или прогноза по его сроку службы.

Указанные недостатки при соответствующей аргументации автора не могут существенно повлиять на научную, методическую и практическую ценности диссертационной работы, важность проведенных исследований, и ставят своей целью уточнение ключевых моментов диссертации, что и является основной функцией ведущей организации.

Результаты диссертации рекомендуется использовать при разработке более совершенных методов и приборов неразрушающего контроля высоковольтных диэлектрических элементов в процессе эксплуатации, программных продуктов и баз данных об остаточном ресурсе парка изоляционного оборудования электросетевых компаний специализированными организациями в области диагностического приборостроения и программного обеспечения для электроэнергетики Российской Федерации, что связано сегодня с необходимостью срочного и наукоемкого импортозамещения: ПАО «Россети», г. Москва, АО «НТЦ ФСК ЕЭС», г. Москва, ОАО «Сетевая компания», г. Казань, АО «Электросетьсервис ЕНЭС», г. Ногинск, ООО «НПО «Техносервис-электро», г. Москва, ООО «Димрус», г. Пермь, ООО НТЦ «ЭДС», г. Москва, Сибирский НИИ энергетики, г. Новосибирск.

Изложенное позволяет сделать вывод, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, характеризуется внутренним единством, содержит новые обоснованные научные результаты и выводы. Основные научные результаты диссертации прошли апробацию, что отражено в научных работах, опубликованных в рецензируемых изданиях, указанных в перечне Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России, и приравненных к ним и свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

Диссертация «Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов», является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические (аппаратно-программный комплекс для дистанционного периодического контроля технического состояния находящихся в эксплуатации высоковольтных изоляторов на подстанциях и ЛЭП в автоматизированном дистанционном режиме), технологические (алгоритмы анализа и обработки результатов измерений по диагностическим признакам для выявления дефектов и неисправностей высоковольтных изоляторов) и методические (методика периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов и напряженностей электрических полей) решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение достоверности в оценке технического состояния и прогнозирования эксплуатационного ресурса ВИ при использовании комплексного метода дистанционного диагностирования ВИ в процессе

эксплуатации, что является важным для развития энергетической отрасли Российской Федерации.

По своей актуальности, новизне, значимости для теории и практики неразрушающего и аналитического контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды диссертация Иванова Дмитрия Алексеевича на тему «Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям по пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (в редакции Постановлений Правительства РФ № 335 от 21.04.2016, № 1168 от 01.10.2018, № 426 от 20.03.2021), 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.

Диссертационная работа и отзыв на нее обсуждались на расширенном заседании кафедры радиодифракции и микроволновых технологий с приглашением сотрудников научно-исследовательского института прикладной электродинамики, фотоники и живых систем КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева « 20 » января 2023 г., протокол № 3.

Заведующий кафедрой
радиодифракции и микроволновых
технологий ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ»,
доктор технических наук, профессор
Морозов Олег Геннадьевич

О.Г.Морозов

420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 31/7. 5-е учебное здание КАИ,
тел.: +7 (843) 231-59-18; e-mail: mwptdep@kai.ru

Подпись Морозова О. Г.
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля

Михайлов Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»,
420111, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.
тел. +7 (843) 238-91 -69, e-mail: sergey.mikhaylov@kai.ru