

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.310.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 17 марта 2023 г., № 2

О присуждении Иванову Дмитрию Алексеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов» по специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» принята к защите 14 декабря 2022 г. (протокол заседания № 10) диссертационным советом 24.2.310.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский государственный энергетический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, приказ № 717/нк от 09.11.2012 г.

Соискатель Иванов Дмитрий Алексеевич, 9 сентября 1986 года рождения,

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Комплексный метод и автоматизированная сканирующая установка для исследования магнитоакустооптических взаимодействий» защитил в 2013 году в диссертационном совете, созданном на базе ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет».

Работает в должности доцента кафедры «Промышленная электроника» в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор физико-математических наук Голенищев-Кутузов Александр Вадимович, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кафедра «Промышленная электроника», заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

1. **Никитин Константин Иванович**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск, кафедра «Теоретическая и общая электротехника», заведующий кафедрой;

2. **Шерстюков Олег Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань, кафедра радиофизики, заведующий кафедрой;

3. **Шилин Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, кафедра «Электротехника», профессор,

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань, в своем **положительном** отзыве, подписанном Морозовым Олегом Геннадьевичем, доктором технических наук, профессором, кафедра радиофотоники и микроволновых технологий, заведующим кафедрой, указала, что диссертация Иванова Д.А. 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 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 высоковольтных изоляторов при использовании комплексного метода их дистанционного диагностирования 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 Д. А. соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям по пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Соискатель имеет 75 опубликованных работ по теме диссертации общим объёмом 30,61 п.л. и авторским вкладом 15,84 п.л.; из них в *отечественных* рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах

данных SCOPUS и/или Web of Science (и приравненных к публикациям в изданиях, входящих в перечень ВАК) – 5, общим объёмом 1,85 п.л. и авторским вкладом 0,76 п.л., в *зарубежных* рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и/или SCOPUS – 6, общим объёмом 3,92 п.л. и авторским вкладом 1,86 п.л.; в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК – 12, общим объёмом 9,44 п.л. и авторским вкладом 5,55 п.л.; патентов и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ – 10, общим объёмом 3 п.л. и авторским вкладом 1,09 п.л.; глав в монографии – 1, общим объёмом 1,8 п.л. и авторским вкладом 0,54 п.л.; в других публикациях по теме диссертации – 41, общим объёмом 10,6 п.л. и авторским вкладом 6,04 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Galieva T.G. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation // *Energies*. 2021. V. 14. No. 18. P. 5670. DOI: 10.3390/en14185670. EISSN 1996-1073 (статья в рецензируемом научном издании МБД Q1 по SJR, вклад соискателя – 50%).

2. Ivanov D.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F. Portable Complex for Remote Control of High-Voltage Insulators using Wireless Data Collection and Transmission Module // *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. V. 13. No. 6. P. 2358-2362. EISSN 1819-6608 (статья в рецензируемом научном издании МБД Q2 по SJR, вклад соискателя – 50%).

3. Ivanov D., Golenishchev-Kutuzov A., Sadykov M., Yaroslavsky D., Galieva T. Assessment of the Technical Condition of High-Voltage Insulators during Operation. *Machines*. 2022. V. 10. P. 1063. DOI: 10.3390/machines10111063. ISSN 2075-1702 (статья в рецензируемом научном издании МБД Q2 по SJR, вклад соискателя – 50%).

4. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д., Евдокимов И.А. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 87-93. ISSN 1998-9903 (статья в рецензируемом научном издании ВАК, вклад соискателя – 35%).

5. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Марданов Г.Д. Дистанционный контроль технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 3-4. С. 99-107. ISSN 1998-9903 (статья в рецензируемом научном издании ВАК, вклад соискателя – 40%).

6. Галиева Т.Г., Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В. Лабораторный стенд для разработки метода и системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 80–87. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-80-87. ISSN 1813-8225 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К1, вклад соискателя – 35%).

7. Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Голенищев-Кутузов А.В., Садыков М.Ф., Калимуллин Р.И., Семенников А.В. Детектирование акустических сигналов частичных разрядов на дефектах изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 48-55. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-48-55. ISSN 1813-8225 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К1, вклад соискателя – 40%).

8. Иванов Д.А. Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 1. С. 151-163. ISSN 1998-9903 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 100%).

9. Иванов Д.А. Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 2.

С. 132-146. ISSN 1998-9903 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 100%).

10. Иванов Д.А. Экспериментальная система мониторинговой диагностики высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 6. С. 15-23. ISSN 2073-0004 (статья в рецензируемом научном издании ВАК RSCI, вклад соискателя – 100%).

На диссертацию и автореферат поступило 8 отзывов. Из них положительных – 8. С замечаниями – 8. Отзывы прислали:

1. Главный специалист Технического отдела Нижегородского филиала ООО «Газпром проектирование», профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», доктор технических наук, профессор Ларцов С.В. Замечание: автор ограничил свое исследование задачами диагностики изоляторов в процессе эксплуатации. Остается вопрос: даны ли рекомендации производителям изоляторов, используются ли диагностические методы автора при контроле производства и разработке новых изоляторов?

2. Профессор кафедры «Горная электромеханика» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», доктор технических наук, доцент Николаев А.В. Замечания: 1) на рис. 7 (с. 18 автореферата) представлена блок-схема дистанционного аппаратно-программного комплекса измерения характеристик ЧР, по тексту описаны используемые датчики и основные принципы обработки получаемых данных. Однако не представлены его характеристики, что не позволяет сделать сравнительный анализ с известными аналогами; 2) в тексте автореферата не указаны конкретные типы высоковольтных изоляторов, для контроля которых можно использовать разработанный автором дистанционный аппаратно-программный комплекс измерения характеристик ЧР.

3. Старший научный сотрудник – ученый хранитель государственного

эталона НИО-1 ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», п. Менделеево, Московская обл., Паринов С.Т. Замечания: 1) одной из целей работы является улучшение метрологических возможностей дистанционного контроля высоковольтных изоляторов. Однако никаких метрологических характеристик разработанного аппаратно-программного комплекса для измерения параметров частичных разрядов не приведено; 2) автором использован неинформативный термин «кажущийся» заряд, который вводит в заблуждение и не связан с определением или преобразованием этого параметра; 3) более уместным было бы использование терминов «наблюдаемый» или «приведенный» заряд с кратким пояснением специфики данного параметра при первом его упоминании; 4) имеют место неточности в оформлении работы. Так, на с. 118 под «плотностью» изолятора, видимо, имеется в виду его электрическая прочность; 5) также, приведенная на с. 119 величина 60 кВ/м неактуальна и относится исключительно к электростатическому полю. Для исследовавшихся в работе электрических полей промышленной частоты в соответствии с № 426-ФЗ на рабочих местах установлен ПДУ 25 кВ/м с возможностью превышения до 40 раз в зависимости от класса (подкласса) условий труда (приказ Минтруда № 33н от 24.01.2014 г., в ред. от 27.04.2020 г.).

4. Министр цифрового развития и связи Алтайского края, г. Барнаул, доктор технических наук, доцент Зрюмов Е.А. Вопрос и замечание: 1) каков порог безопасности интенсивности ЧР для высоковольтных изоляторов при номинальном рабочем напряжении, по которому можно судить о степени работоспособности? 2) рисунки автореферата (рис. 3, 16, 17) плохо читаемы.

5. Проректор по образовательной деятельности ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет», г. Омск, доктор технических наук, профессор Кузнецова В.Н. Замечания: 1) осталось неясным, какие допущения приняты автором при разработке методики периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов; 2) не указаны направления и перспективы дальнейших исследований автора по

теме диссертации.

6. Профессор кафедры «Технологии твердых химических веществ» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», доктор технических наук, профессор Мухутдинов А.Р. Замечания: 1) анализируются лишь ЧР в полимерных и фарфоровых изоляторах. Почему не рассматривались стеклянные изоляторы? 2) проводились ли какие-либо мероприятия для искусственного создания дефектов в высоковольтной изоляции?

7. Профессор кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент Соколов А.М. и доцент кафедры, кандидат технических наук, доцент Мельникова О.С. Замечание: в автореферате не отражены результаты лабораторных экспериментов по получению характеристик измеряемых параметров частичных разрядов – количество и амплитуда импульсов в каждом фазовом интервале, распределение количества частичных разрядов по амплитудам, изменение количества амплитуд в течение нескольких часов приложения высокого напряжения.

8. Главный метролог АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань, доктор технических наук Курт В.И. Вопрос: автором разработан испытательный стенд, включающий в себя аппаратный комплекс, цифровой программный комплекс и регулируемый источник высокого напряжения, позволяющий комплексно и дистанционно определять и анализировать характеристики диагностических параметров высоковольтных диэлектрических материалов и элементов. Как реализован цифровой программный комплекс, какую функцию в составе испытательного стенда он выполняет?

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** их известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и



способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Оппонент Никитин Константин Иванович является ведущим специалистом в области электрофизики и электрофизических установок, методов и средств диагностики изоляционных материалов, имеет соответствующие публикации и патенты.

Оппонент Шерстюков Олег Николаевич является ведущим специалистом в области радиофизики, разработки радиоэлектронной аппаратуры, изучения распространения электромагнитных и высокочастотных акустических волн, дистанционной диагностики с их помощью удаленных технических объектов, имеет соответствующие публикации.

Оппонент Шилин Александр Николаевич является ведущим специалистом в области электротехнических и информационных комплексов и систем, методов и устройств диагностики электрооборудования, имеет соответствующие публикации и патенты.

Ведущая организация, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ», является крупным научным центром, занимающимся научной деятельностью по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий. Сотрудники кафедры радиофотоники и микроволновых технологий занимаются исследованиями в области контроля и диагностики различного технического оборудования, распространения электромагнитных волн, разработкой различных контрольно-измерительных систем и устройств, в том числе устройств акустического обнаружения частичных разрядов в комплектных распределительных устройствах, имеют соответствующие публикации и патенты.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**Разработаны:**

- методики периодического дистанционного комплексного измерения (одновременно электромагнитным и акустическим датчиками) и анализа

характеристик частичных разрядов, измерения напряженностей электрических полей электрооптическим датчиком, локализации местоположения дефектных изоляторов на подстанциях, позволившие повысить информативность и достоверность оценки технического состояния высоковольтных изоляторов, путем сопоставления с выявленными параметрами наиболее опасных при эксплуатации дефектов;

- испытательный стенд, включающий в себя аппаратный комплекс (различные физические датчики – электромагнитный, электрооптический, акустический), цифровой программный комплекс и регулируемый источник высокого напряжения, позволивший комплексно и дистанционно определять и анализировать характеристики диагностических параметров высоковольтных диэлектрических материалов и элементов;

- комплексный метод обнаружения и регистрации вида, местоположения и роста наиболее опасных дефектов высоковольтных изоляторов (ВИ) путем дистанционного измерения повышенных напряженностей электрического поля, локально расположенных на поверхностях ВИ, и предложенного для диагностики набора характеристик частичных разрядов с помощью электромагнитного и акустического датчиков;

- цифровой программный комплекс для определения различных характеристик частичных разрядов, их изменений в зависимости от параметров дефектов и их развития, позволивший более достоверно оценивать техническое состояние высоковольтных изоляторов;

**предложен** набор диагностических параметров, включающий интенсивность, количество, смещение фазовых углов появления мощных частичных разрядов, параметры импульсов мощных частичных разрядов, которые дают возможность определять техническое состояние высоковольтных изоляторов в условиях эксплуатации;

**доказана** перспективность использования предложенных идей и обнаруженных закономерностей для дистанционного обнаружения вида и места расположения наиболее опасных дефектов и диагностирования степени

работоспособности высоковольтных изоляторов в условиях их эксплуатации;

**введен** новый термин «мощный частичный разряд» (МЧР) для ЧР, который создает на диэлектрических поверхностях дефекта индуцированное электрическое поле, сравнимое по напряженности с полем приложенного к изолятору высокого напряжения, и характеризуется существенно большей по сравнению с обычными частичными разрядами интенсивностью.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказаны** перспективность использования комплексных методов обнаружения и регистрации вида, места расположения и роста наиболее опасных дефектов высоковольтных изоляторов, что позволяет разрабатывать средства контроля нового класса, обладающие улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками, а также расширяющие круг решаемых задач контроля технического состояния изоляционных конструкций электротехнического оборудования;

**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** методы цифровой обработки сигналов и экспериментальных данных; электромагнитный, акустический и электрический методы измерений частичных разрядов в диэлектрических материалах; электрооптический метод измерения напряженности электрического поля;

**изложены** закономерности возникновения мощных частичных разрядов на дефектах в высоковольтных изоляторах в процессе эксплуатации; суть физической модели особенностей появления и динамики развития МЧР;

**раскрыты** причины возникновения МЧР на диэлектрических поверхностях дефекта высоковольтного изолятора;

**исследован** набор диагностических параметров высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации под рабочим напряжением, что позволило развить новые представления о природе возрастания электрического поля в области дефекта за счет полей, индуцированных предыдущими частичными разрядами;

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**разработан и внедрен** (имеется акт внедрения) в ПАО «Татнефть» (г. Альметьевск) в опытную эксплуатацию датчик частичных разрядов; методики периодического дистанционного измерения характеристик частичных разрядов для оценки технического состояния высоковольтных изоляторов;

**разработаны и внедрены** (имеются акты внедрения) в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» в научно-исследовательской лаборатории «Мониторинг технического состояния и повышение надежности объектов электроэнергетики», в учебный процесс на кафедре «Промышленная электроника» при подготовке бакалавров и магистров испытательный стенд для определения и анализа диагностических параметров высоковольтных диэлектрических материалов и элементов; комплексный метод обнаружения вида, места расположения и роста дефектов высоковольтных изоляторов и регистрации набора характеристик частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками; методики периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов и напряженностей электрических полей для оценки технического состояния высоковольтных изоляторов;

**определены и сформулированы** методические аспекты выполнения мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов;

**предложена и протестирована** методология периодического диагностирования (мониторинга) путем измерения предложенного 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;

**представлена** методика периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов.

### **Оценка достоверности результатов исследований выявила:**

**для экспериментальных работ** показана корректная постановка исследовательских задач, физическая обоснованность полученных результатов, совпадение результатов, полученных разными экспериментальными методами;

**теория** методик измерения характеристик частичных разрядов построена на базе воспроизводимых данных по охарактеризованным в лабораториях и стандартным образцам и согласуется с опубликованными теоретическими и экспериментальными результатами других авторов в этой области с использованием разных методов исследования;

**идея** построения физической модели особенностей появления и преобразования мощных частичных разрядов на основе перераспределения приложенного и индуцированного электрических полей **базируется** на результатах анализа полученных данных, передовой практике использования современных методов измерения характеристик частичных разрядов;

**использованы** совокупность нескольких современных методов неразрушающего контроля изоляции электротехнических изделий, сертифицированная и поверенная контрольно-измерительная аппаратура, лицензионное программное обеспечение;

**установлено** качественное согласие и количественное совпадение авторских результатов с результатами, полученными электрическим контактным методом в соответствии с ГОСТ Р 55191-2012.

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии в разработке общей методологии системы мониторинга, в разработке и создании методик измерения и измерительных устройств, аппаратно-программного комплекса, испытательного стенда, проведении полевых измерений характеристик ЧР на подстанциях. Диссертация выполнена с использованием результатов, полученных лично автором или при его непосредственном участии в измерениях на подстанциях. Автор принимал ключевое участие в постановке задач, подготовке образцов, планировании и проведении экспериментов, обсуждении результатов, формулировке выводов и написании публикаций.

**Диссертационный совет рекомендует использование результатов диссертационной работы** 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, таких как 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.

**В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:**

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 (*ведущая организация*).

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 (*ведущая*

*организация).*

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 (*ведущая организация).*

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

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 (*ведущая организация).*

6. В п. 1.9 «Постановка задач исследования» непонятно, каким образом диагностирование способствует увеличению эксплуатационного ресурса ВИ (*оппонент Никитин К.И.).*

7. В работе отсутствует статистика повреждаемости изоляторов. В актуальности неплохо было бы дать, иначе трудно обосновать необходимость данной работы (*оппонент Никитин К.И.).*

8. В обзоре не указаны методы, которые используются в настоящее время (оппонент Никитин К.И.).

9. В работе ни разу не упоминаются стеклянные изоляторы. Они запрещены в использовании, или есть причина их не диагностировать? (оппонент Никитин К.И.).

10. С. 106 – «Диагностическими признаками, отличающими работоспособные ВИ от неработоспособных, нуждающихся в замене, являются следующие: возникновение ЧР с интенсивностью, значительно (в 2-3 раза) превышающей порог безопасности при номинальном рабочем напряжении». В предложении не указаны величины порогов безопасности. Без этой величины невозможно судить о работоспособности или выходе из строя высоковольтных изоляторов (оппонент Никитин К.И.).

11. С. 118, 5-я строка сверху «как показали предварительные расчеты» - почему бы не привести эти расчеты? (оппонент Никитин К.И.).

12. Пункт 2 выводов к 4-й главе: «Результатом является разработанная усовершенствованная модель описания особенностей параметров ЧР, учитывающая вклад в излучение ЧР, помимо приложенного поля, также и поля, индуцированного разрядами...» - Модель начинается с математического описания и, благодаря компьютерным технологиям, затем обычно рассчитываются и показывают с помощью специальных программных пакетов для полевых структур, типа ANSYS, FLEXPDE, ELCUT и др. Они, рассчитанные методом конечных элементов, наглядно показывают разработанные модели как в статике, так и в динамике. Аналогично сказать относительно стримерной модели распространения импульсов МЧР (оппонент Никитин К.И.).

13. В диссертации не указано, какой прибор разработан на основе исследований (оппонент Никитин К.И.).

14. Не указано, как меняются формы импульсов МЧР для двух видов исследованных дефектов – на контакте «стержень-оконцеватель» и на дефекте стержня в зависимости от текущего технического состояния ВИ в условиях



эксплуатации (*оппонент Шерстюков О.Н.*).

15. Требуется пояснения вопрос, как с физической точки зрения происходит генерация критических акустических импульсов в высоковольтных изоляторах посредством индуцированных полей частичных разрядов (*оппонент Шерстюков О.Н.*).

16. Автором разработано несколько компьютерных программ, реализованных в виде цифрового программного комплекса для определения различных характеристик ЧР, их изменений в зависимости от параметров дефектов и их развития позволил более достоверно оценивать техническое состояние ВИ. Однако не указано, как другие исследователи могут его использовать и адаптировать в своих разработках (*оппонент Шилин А.Н.*).

17. В диссертации не приводятся подробные технические характеристики разработанного программного обеспечения: требуемый для работы объем памяти, скорость вычислений, требования к процессору и операционной системе (*оппонент Шилин А.Н.*).

18. Вы оперируете термином «кажущийся заряд», исходя из этого, у вас условия измерений должны быть одни и те же, ведь получаемые результаты зависят от расстояния, погодных условий, от ориентации антенны с учетом диаграммы направленности.

19. Название главы 4 «Мощные частичные разряды и их влияние на рост дефектов в высоковольтных изоляторах» вызывает недоумение. На с. 20 автореферата написано «Известно, что ЧР в основном возникают вследствие процессов ионизации воздушного зазора, а их параметры определяются во многом размерами дефекта». Что в реальности первично, а что вторично?

20. Название главы 5 «Система мониторинговой диагностики высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации» тоже вызывает недоумение. Как говорят в таких случаях, получилось «масляное масло». Из Интернета: Диагностика – определение значений параметров системы, характеризующих одномоментно ее состояние. Мониторинг – постоянное наблюдение за какими-нибудь процессами для оценки их состояния и

прогнозов развития.

21. При дистанционных измерениях частичных разрядов действующих опорных изоляторов узконаправленность датчиков следовало бы подтвердить их диаграммами направленности.

Соискатель Иванов Д.А. согласился с замечаниями 11, 20 и 21, а на остальные замечания ответил следующим образом:

1. Графический интерфейс последовательности разработанной методики измерения характеристик ЧР представлен на слайде 2.4. Алгоритм контроля технического состояния ВИ на подстанции представлен на слайде 4.3. Комплекс разработанных методик согласован с Управлением энергетики ПАО «Татнефть».

2. Поскольку все ЧР по интенсивности обладают большой стохастичностью, особенностью разработанных методик является дифференциальный способ регистрации только ЧР с наибольшей интенсивностью, при которой можно не учитывать более слабые ЧР, а не интегральный способ регистрации всех ЧР за определенный временной интервал. В результате выделяются ЧР, наиболее опасные для эксплуатации ВИ. Внешние помехи (электромагнитные и акустические) частично подавляются за счет привязки к фазе сетевого напряжения (синхронизация по 50 Гц) и предварительного анализа спектра шумов, а также разработанных схем шумоподавления. Поэтому главной решенной задачей разработанных методик стало повышение достоверности характеристик технического состояния ВИ и прогноза дальнейшего срока службы.

Следует подчеркнуть, что вследствие обнаруженной зависимости электрофизических процессов ЧР в полости дефектов от интенсивности ЧР, численные оценки улучшения метрологических и технико-экономических показателей дистанционного контроля различаются для каждого вида ВИ. Поэтому в дальнейшем необходимо сделать такие оценки для различных видов ВИ. Как показали выполненные нами измерения для полимерных и фарфоровых изоляторов с рабочим напряжением 35 кВ и 110 кВ,

разработанные методики измерения характеристик ЧР с использованием трех датчиков позволили повысить разрешающую способность измерения фазовых интервалов возникновения ЧР не менее чем на 15-25%, а точность прогноза дальнейшего срока службы ВИ до 30-50%.

На слайде 2.8 запечатлен момент измерения характеристик ЧР одновременно двумя датчиками (электромагнитный комплекс на основе радиочастотного приемника AOR5000A и акустический на основе приемника SDT270) на подстанции Казанских электрических сетей (филиал АО «Сетевая компания»).

3. Исследование только достаточно мощных дефектов и, соответственно, достаточно интенсивных ЧР ( $q \geq 1$  нКл) снизило требования к помехозащищенности измерительного комплекса при измерениях характеристик ЧР на подстанциях.

4. Прогнозирование остаточного ресурса любого контролируемого объекта является одной из важнейших, но при этом и одной из самых сложных задач любых методов, особенно когда выход из рабочего состояния происходит за долгое время (иногда в течение десятка лет). Предложенный нами метод (Глава 4 диссертации, С. 178, 181, 182, 183, 212, рис. 4.14, 4.15) более подробно изложен в статье [A10]. Из-за сложности выполнения экспериментов на подстанциях, их технических условий и соглашения с АО «Сетевая компания», нами были выполнены только измерения изменений в характеристиках ЧР на дефектных ВИ в течение трех месяцев (рис. 4.15). Как следует из графиков на рис. 4.14 и 4.15, наибольшей информативностью обладают фазовые сдвиги максимумов интервалов возникновения ЧР для положительных и отрицательных полупериодов напряжения ( $15-20^\circ$ ) при ширине фазового интервала  $8-10^\circ$  в сторону меньших углов, т.е. в 2,0-2,5 раза, а также увеличения интенсивности МЧР на 5-7% и расширение фазового интервала возникновения ЧР также в 2-2,5 раза. Дополнительным диагностическим параметром может быть локальное повышение электропроводности в области дефекта, измеряемое электрооптическим датчиком в пределах больших

дефектов ( $d \sim 10-20$  мкм).

5. В главах 3, 4 (рис. 3.7-3.9 и с. 174) рассмотрены особенности одновременного использования электромагнитного и акустического датчиков, а также интервалы интенсивности ЧР ( $q \leq 1,5$  нКл), в которых большинство параметров ЧР совпадает (до 90%), что позволяло использовать один датчик (электромагнитный). Это условие вполне удовлетворяет измерениям при рабочем напряжении  $U_a \leq 35$  кВ. Однако все измерения на подстанции ( $U_a = 110$  кВ), приведенные в главах 4, 5, были выполнены с одновременным использованием электромагнитного и акустического датчиков, на что указывается в начале главы 4, а также в табл. 4.1, рис. 4.1-4.5, 4.13, 5.12-5.14, и статье А9.

Согласен с замечанием, что в диссертации в п. 7 «Основных результатов и выводов» не указано, что мобильный вариант дистанционного мониторинга с использованием одного измерительного датчика предназначен для работы в сетях с напряжением не выше 35 кВ.

6. До настоящего времени в большинстве энергетических предприятий контроль технического состояния ВИ выполняется путем планово-профилактических осмотров с полной заменой ВИ, независимо от их состояния. Переход к мониторингу ВИ с уточнённым прогнозом эксплуатационного ресурса может позволить увеличить, на наш взгляд, срок между заменами ВИ по их рабочему состоянию.

7. Согласен с замечанием. Анализ аварийности ВИ и ЛЭП за 2021 год в государствах СНГ (Обзор аварийности и травматизма в электроэнергетических системах государств-участников СНГ за 2021 год. Инф. бюллетень № 22. Исп. ком. Электроэнергетического совета СНГ, 2022. 163 с.) показал, что высоковольтные ВИ составляют 15,5% от общего количества аварий, провода – 10,9%, выключатели – 18,3%, разъединители – 11,6%, а стоимость замены ВИ составляет 30%.

8. В настоящее время более 80% составляют контактные методы

диагностики с выводом подстанций и ЛЭП из работы, а также безконтактные оптические (УФ) и тепловизионные ( $\approx 10\%$ ). В ПАО «Россети» начата работа по созданию нормативно-технической базы для использования акустических детекторов и дефектоскопов для локализации дефектов и измерения уровня разрядной активности в высоковольтном оборудовании.

9. Наша группа также работает в области методов и средств контроля и диагностики стеклянной изоляции. Диагностика стеклянных ВИ рассматривалась в кандидатской диссертации Галиевой Т.Г., выполненной под моим руководством и защищенной 17.02.2023 г., поэтому было бы неэтичным рассматривать данные по стеклянным ВИ в моей диссертации.

10. Как показали экспериментальные исследования, проводившиеся практически одновременно нами и в ряде других организаций, критическим уровнем ЧР в фарфоровых ВИ можно считать кажущийся заряд на дефекте порядка 1,0-1,5 нКл, а в наших экспериментах именно этот уровень считается порогом безопасности для ВИ, работающем при рабочем напряжении до 35 кВ. В наших экспериментах с ВИ напряжением до 110 кВ мы оценивали порог безопасности для ВИ с кажущимся зарядом на дефектах до 2,5-3,0 нКл.

12. Физическая модель носит феноменологический многопараметрический прогностический характер и не имеет серьёзного расчета, поскольку ряд параметров пока невозможно измерить. В подобной форме представлены модели (до 10), описывающие механизмы ЧР для отдельных дефектов в последних отечественных, китайских и американских работах [103, 146, 191 и [Florkowski, Marek. Partial discharges in high-voltage insulating systems – mechanisms, processing, and analytics, 2021].

Однако в нашей методике с помощью программной среды LabView 12 описывается связь измеренных характеристик ЧР с процессами распространения импульсов по газовой полости дефекта и диэлектрическим поверхностям, что является основой для описания стримерного и таунсендовского механизмов.

13. На основе усовершенствования методик дистанционного

диагностирования ВИ был разработан электрооптический метод и сконструирован лабораторный прибор на основе сканирования сфокусированным лазерным пучком с диаметром 10 мкм области больших дефектов (раздел 3.4, с.118 диссертации).

14. Форма импульсов для различных видов дефектов представлена в диссертации на рис. 4.9 и 4.10 (с. 162, 163). До интенсивности ЧР менее 2,0-2,5 нКл форма импульсов ЧР симметрична для передней и задней частей, а длительность не превышает 5-10 нс в зависимости от размера дефекта, а также расположения дефекта на изоляторе. Длительность ЧР в этом интервале интенсивности определяется в основном временем распространения импульса в стримерном режиме между диэлектрическими границами дефекта. При увеличении размеров дефекта и интенсивности ЧР для обоих видов дефектов длительности и форма импульсов ЧР начинают различаться, и они становятся двухэтапными. В обоих видах дефектов первый этап по-прежнему относится к стримерному распространению электронов вдоль газового промежутка полости дефекта. Поскольку линейные размеры дефектов возрастают только для дефектов на стержне, длительности переднего фронта импульсов ЧР за счет удлинения пути электронного стримера, а заднего фронта за счет диффузного перемещения индуцированных электронов и ионов вдоль диэлектрической поверхности дефекта практически одинаковы для положительных и отрицательных импульсов ЧР. Для дефектов на границе «стержень-оконцеватель» передний фронт импульса несколько укорачивается за счет возрастания скорости распространения стримера, а задний фронт импульса удлиняется за счет замедления распространения потока индуцированных электронов и ионов вдоль диэлектрической поверхности. Скачки в интенсивности и форме импульсов ЧР для отрицательных ЧР, на наш взгляд, вызваны поверхностными ЧР при распространении ЧР вдоль диэлектрической поверхности.

15. При каждом поверхностном МЧР может, на наш взгляд, происходить генерация импульсов мощных акустических волн за счет механизма

акустоэлектронного взаимодействия, описанного в главе 4 (с. 158). Процессы генерации поверхностных ЧР (другое название – «скользящие ЧР» [Физическая энциклопедия, Т. 4, 1994]) описаны также в монографии [Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования, 2008] и в монографии [Ушаков В.Я. Изоляция установок высоковольтного оборудования, 1994]. По-видимому, это первое рассмотрение особенностей поверхностного разряда при распространении импульсов зарядов в тангенциальной плоскости к направлению приложения поля. Увеличение плотности зарядов вдоль диэлектрической поверхности связано с накоплением индуцированных зарядов от предыдущих ЧР в условиях функционирования подстанций или ЛЭП. Таким образом, поверхностные ЧР со сверхкороткой длительностью ( $\tau \leq 1$  нс) могут по интенсивности в несколько раз превышать интенсивность ЧР в полости дефекта и создавать критические значения интенсивностей акустических импульсов для полного пробоя ВИ в области дефекта. Следует подчеркнуть, что до настоящего времени нет установившегося представления о механизме распространения зарядов вдоль диэлектрической поверхности. Предполагается, что этот процесс отличен и от стримерного, и от таунсендовского и, скорее всего, он близок к плазменному процессу. Таким же многопараметрическим является и механизм генерации мощных акустических импульсов импульсами поверхностных разрядов, включая значительный импульсный разогрев плазмы [Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков, 2000].

16. Подробное описание компьютерных программ, разработанных автором, и возможность их использования изложены последовательно в ряде опубликованных работ [А34, А17, А18, А19]. Структурная схема акустической и электромагнитной систем измерения и компьютерной обработки сигналов ЧР приведены на рис. 2.11 диссертации. Цифровой программный комплекс для определения различных характеристик ЧР, их изменений в зависимости от параметров дефектов и их развития включает в себя блоки записи массива

данных с датчиков, обработки массива данных сигналов ЧР, отображения полученных данных в виде амплитудно-фазовых диаграмм и частотно-фазовых диаграмм, сохранения массива данных с сигналами ЧР в файл, загрузки сохраненных данных для просмотра и др.

17. Цифровой программный комплекс для определения различных характеристик ЧР, их изменений в зависимости от параметров дефектов и их развития реализован в программной среде LabView 12 для работы на персональном компьютере с процессором Pentium 4/М или выше, ОЗУ минимум 1 Гб, операционной системе Windows 7 и выше.

18. Да, измерения желательно проводить при одинаковых условиях, в противном случае требуется вводить поправочные коэффициенты, которые известны.

19. Первичным процессом начала пробойного состояния является появление частичных повреждений материала высоковольтного изолятора – газовые или проводящие включения, неоднородности структуры. При малых размерах неоднородностей в них не возникают ЧР, и такие неоднородности не влияют на электрическую прочность. Однако при увеличении размеров неоднородностей вследствие влияния внешних факторов возникают первичные ЧР. Увеличение размера полости дефекта приводит к повышению скорости распространения стримера и количества индуцированных электронов, способствующее появлению мощных ЧР. Мощные ЧР ускоряют развитие дефектов и старение изоляции.

На заседании 17 марта 2023 года диссертационный совет принял решение за новые научно-обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит существенный вклад в развитие страны, присудить Иванову Дмитрию Алексеевичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека,



входящего в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя  
диссертационного совета



Ившин Игорь Владимирович

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Калимуллин Рустем Ирекович

17 марта 2023 г.



Ившин И. В. Калимуллин Р. И.  
Мухоморова О. А.