

На правах рукописи



Галиева Татьяна Геннадьевна

**МЕТОД И СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЙ И
ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ СТЕКЛЯННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ
НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», на кафедре «Промышленная электроника»

Научный руководитель: Иванов Дмитрий Алексеевич
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», доцент кафедры «Промышленная электроника»

Официальные оппоненты: Данилаев Максим Петрович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электронных и квантовых средств передачи информации ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»

Мельникова Ольга Сергеевна
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «17» февраля 2023 г. в 14 ч 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д 224, тел.: (843)5194202, 5194237).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/198?idDiss=137>

Автореферат разослан «__» _____ 202_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Калимуллин Рустем Ирекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В настоящее время в электроэнергетике диагностику технического состояния высоковольтных изоляторов (ВИ), как наиболее уязвимых элементов изоляции, проводят посредством осмотра и применения различных мобильных переносимых диагностических устройств (тепловизоров, ультрафиолетовых дефектоскопов, приборов, основанных на ультразвуковых и электромагнитных приемниках). Протяженность одного участка ЛЭП может составлять десятки километров, и осмотр с помощью таких приборов занимает длительное время. Облет воздушных ЛЭП с помощью вертолетов, квадрокоптеров или других летательных аппаратов возможен при периодических осмотрах только в дневное время при хороших погодных условиях.

Вероятность выявления дефектов и загрязнения изоляции при плановом периодическом контроле существенно зависит от погоды во время проведения измерений, так как частичные разряды (ЧР) наибольшей амплитуды возникают весной, летом, осенью в период высокой влажности окружающей среды (дождь, роса) или зимой при температурах таяния снега и возникновения изморозевых отложений на поверхности изоляторов.

Метод контроля состояния изоляции по характеристикам сигналов ЧР является одним из общепризнанных способов неразрушающего контроля высоковольтных изоляторов [1-2]. Этот метод позволяет выявлять дефекты изоляции на самых ранних стадиях ее возникновения, отслеживать их развитие, оценивать текущее состояние изоляции и возможность ее дальнейшей эксплуатации. Однако он применяется в основном для однократных оценок рабочего состояния высоковольтных энергосистем при плановых обследованиях.

В связи с этим разработана дистанционный метод «онлайн» мониторинга высоковольтных изоляторов, позволяющего выявлять загрязнения и дефекты в изоляционном оборудовании и оценивать уровень его технического состояния, является **актуальной задачей** на сегодняшний день. В соответствии с методическими указаниями ФСК ЕЭС отсутствие поверхностных частичных разрядов (ПЧР) на внешней изоляции является необходимым, а иногда и достаточным признаком нормальной работы. Интенсивность разрядных процессов увеличивается по мере снижения изолирующей способности конструкции, вследствие появления дефектов или загрязнения и увлажнения поверхности. Таким образом, возникновение или увеличение интенсивности ПЧР можно использовать для косвенной оценки технического состояния ВИ.

С помощью разработанного в диссертации метода определяется средняя мощность электромагнитного излучения ЧР и в реальном времени производится синхронное накопление данных с фазой сетевого напряжения, с учетом относительной влажности окружающего воздуха.

Использование фазового распределения сигналов ЧР позволяет определять наличие поверхностного дефекта или загрязнения, скорость его развития и местоположение гирлянды с дефектным или загрязненным изолятором, а также возможность дальнейшей эксплуатации оборудования.

Результатом работы системы мониторинга стеклянных ВИ является определение уровня загрязнения и поверхностных дефектов на изоляторах. На основе определения напряжения возникновения ЧР (при максимальном уровне влажности) дается общая оценка технического состояния в соответствии с требованиями приказа от

17.02.2002 № 706/100 РАО «ЕЭС России» и ОАО «ФСК ЕЭС» как «нормальное», «ухудшенное» (есть риск пробоя, дальнейшая эксплуатация возможна) и «предварийное» (пределный риск, необходима замена).

Методология и методы исследования

Объект исследования: частичные разряды в высоковольтных стеклянных изоляторах.

Предмет исследования: методы и средства мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов в высоковольтных стеклянных изоляторах.

Цель диссертационной работы: разработка метода и системы дистанционного мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения частичных разрядов с синхронным накоплением с фазой сетевого напряжения.

Основные задачи диссертации:

1. Провести анализ известных теоретических и экспериментальных исследований в области методов и средств диагностики высоковольтных изоляторов на основе регистрации электромагнитного излучения ЧР.

2. Разработать метод и систему дистанционного мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения ЧР с синхронным накоплением с фазой сетевого напряжения и с учетом относительной влажности окружающей среды.

3. Выбрать оптимальный диапазон частот измерений и тип антенны и провести анализ чувствительности различного типа антенн в зависимости от частоты электромагнитного излучения.

4. Разработать лабораторный стенд с целью изучения электрофизических процессов в ВИ под воздействием высоких напряжений и проведения экспериментальных исследований.

5. Экспериментально обосновать эффективность применения разработанного метода с помощью электрического метода в соответствии с ГОСТ Р 55191-2012 и акустического метода с применением специализированного дефектоскопа.

6. Экспериментально обосновать влияние относительной влажности на среднюю мощность электромагнитного излучения ЧР при загрязнении и образовании поверхностных дефектов стеклянных изоляторов.

7. Определить для разработанной системы мониторинга критерии оценки трех технических состояний стеклянных ВИ (нормальное, ухудшенное, предаварийное).

8. Разработать и создать устройство для дистанционного определения средней мощности электромагнитного излучения ЧР и фазы сетевого напряжения ВЛЭП, на которой расположены подконтрольные изоляторы.

9. Разработать методику локализации находящихся в эксплуатации стеклянных высоковольтных изоляторов ВЭЛ с ухудшенным и предаварийным состоянием.

10. Провести натурные испытания разработанной системы мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных ВИ.

Методы исследования

На основе разработанных положений и рекомендаций в международном стандарте IEC TS 62478:2016 [3] и ГОСТ Р 55191-2012 [4] в диссертации для оценки загрязнений и поверхностных дефектов ВИ использовался метод определения средней мощности электромагнитного излучения ЧР с синхронным накоплением сигналов с

фазой сетевого напряжения и по изменению средней мощности определялось наличие ЧР. Местоположение гирлянды изоляторов с ухудшенным и предаварийным состоянием определялось по модели затухания ЭМ излучения. Для измерений и обработки результатов экспериментов был разработан комплекс, осуществляющий в процессе мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов регистрацию сигналов ЧР с устройств, их оцифровывание, запись и обработку с помощью среды LabView 14. Анализ статистических данных проводился с использованием программного обеспечения OriginPro. Моделирование принципиальных схем проводилось в программах Altium Designer 16 и MultiSim 10.0.

На защиту выносятся

1. Метод дистанционного мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных высоковольтных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения ЧР с синхронным накоплением с фазой сетевого напряжения, с учетом относительной влажности окружающей среды.

2. Устройство дистанционного определения средней мощности электромагнитного излучения ЧР с синхронным накоплением с фазой сетевого напряжения, с учетом относительной влажности окружающей среды.

3. Система дистанционного мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных высоковольтных изоляторов, созданная на основе разработанного метода, позволяющая выявлять гирлянду с ухудшенным и предаварийным техническим состоянием.

4. Программы и алгоритмы, обеспечивающие обработку и визуализацию диагностических данных для мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов.

Научная новизна диссертационной работы

1. Разработан метод мониторинга загрязнения и поверхностных дефектов стеклянных высоковольтных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения ЧР с синхронным накоплением с фазой сетевого напряжения, с учетом относительной влажности окружающей среды.

2. На основе предложенного метода разработана система мониторинга загрязнения и поверхностных дефектов стеклянных высоковольтных изоляторов.

3. Разработан алгоритм локализации гирлянды изоляторов с ухудшенным и предаварийным состоянием на основе модели затухания электромагнитного излучения ЧР.

4. Разработаны алгоритмы обработки диагностических данных для мониторинга технического состояния высоковольтных стеклянных изоляторов.

5. Разработано программное обеспечение для устройств контроля, системы сбора и накопления данных, анализа и визуализации информации.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в том, что проведенная работа способствует развитию комплексного подхода к определению и локализации дефектов в высоковольтных изоляторах в процессе эксплуатации под рабочим напряжением.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанная система мониторинга технического состояния высоковольтных стеклянных изоляторов позволяет:

- определять загрязнения и поверхностные дефекты стеклянных изоляторов в режиме реального времени;
- определять местоположение гирлянды изоляторов с загрязнением и поверхностным дефектом;
- при предаварийном техническом состоянии ВИ сигнализировать о необходимости принятия мер по замене ВИ или его очистке от загрязнения.

Система позволит повысить надежность и эффективность работы энергосистемы благодаря своевременному предупреждению о развитии аварийных ситуаций, организации ремонта по фактическому техническому состоянию с учетом последствий отказа основного технологического оборудования (рисков). Это позволит уменьшить издержки на восстановление линии и повысить бесперебойность подачи электроэнергии потребителям.

Достоверность результатов достигается сходимостью результатов предложенного метода и электрического (контактного) метода по ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000); сходимостью результатов, полученных с помощью разработанного устройства и стационарного приемника с поверенными характеристиками; корректной обработкой полученных результатов с использованием современных средств вычислительной техники; экспертизами ФИПС на разработанные алгоритмы, программы и технические решения; использованием поверенных приборов. Полученные результаты не противоречат выводам, сделанным другими авторами.

Соответствие паспорту специальности.

Работа соответствует специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды и отвечает следующим пунктам паспорта специальности.

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.

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.

Апробация работы

Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных молодежных научных конференциях «Тинчуринские чтения: Энергетика и цифровая трансформация», Казань, 2020, 2021, 2022; 92-м Международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Казань, 2020; VI Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», Казань, 2020; XV Всероссийской (седьмой Международной)

научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Иваново, 2020; Международной молодежной конференции, приуроченной к 90-летию СГТУ им. Гагарина Ю.А., Самара, 2020; XVIII Международной научно-практической конференции преподавателей вузов, ученых, специалистов, аспирантов, студентов «Промышленное развитие России: проблемы, перспективы», Нижний Новгород, 2021; XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», Казань, 2020; Международной научно-технической конференции, посвященной 140-летию изобретения электро-сварки Н.Н. Бенардосом (XXI Бенардосовские чтения) «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии, Иваново, 2021; XIV Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем». Чебоксары, 2021; научном семинаре «Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия», Яльчик, 2021; V Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности», Чебоксары, 2021; Международной молодежной научной конференции «XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых)», Казань, 2021; VII Международной научно-практической конференции «Технологические инновации и научные открытия», Уфа, 2021; I Всероссийской с международным участием молодежной конференции «Бутаковские чтения», Томск, 2021.

Публикация результатов исследования

По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, включая 5 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и/или Scopus, 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 2 патента на полезную модель, 2 статьи в прочих рецензируемых научных изданиях.

Реализация результатов работы

Метод мониторинга загрязнения и поверхностных дефектов стеклянных высоковольтных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения разработан при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90145 «Методика и прибор для диагностики высоковольтных диэлектрических элементов в процессе эксплуатации на основе динамической регистрации электромагнитного излучения».

Исследования метода мониторинга загрязнения и поверхностных дефектов высоковольтных изоляторов, разработка системы на его основе и проведение натурных испытаний выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания 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» (соглашение №075-03-2022-151 от 14.01.2022).

Система мониторинга загрязнения и поверхностных дефектов стеклянных ВИ внедрена в опытную эксплуатацию ПАО «Татнефть», г. Альметьевск.

Личный вклад автора

Результаты, представленные в диссертации и отраженные в публикациях, получены при непосредственном участии соискателя. Личный вклад автора состоит в уча-

сти в разработке метода и системы мониторинга загрязнения и поверхностных дефектов ВИ, ею проведены лабораторные и полевые измерения и технические расчеты. Автор подготавливала и принимала участие в обсуждении публикаций по выполненной работе, совместно с научным руководителем разработала алгоритмы обработки и визуализации данных для метода и системы мониторинга ВИ. В работе используются полученные автором результаты анализа и интерпретации экспериментальных данных за период опытной эксплуатации системы мониторинга состояния ВИ.

Постановка задач, направление исследований осуществлялось совместно с научным руководителем к.т.н., доцентом Д.А. Ивановым.

Структура и объем диссертации: диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. В конце каждой главы даны краткие выводы по ее материалам. Работа изложена на 142 страницах текста, включая 67 рисунков, 11 таблиц и библиографию из 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении 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 рассмотрены факторы внешних воздействий, которые могут привести к появлению дефектов в ВИ, загрязнению ВИ, понятие термина ЧР, рассмотрены различные способы и устройства контроля технического состояния изоляционного оборудования, научные и технические проблемы контроля технического состояния диэлектрических элементов высоковольтного энергетического оборудования.

Во второй главе проведён анализ известных теоретических и экспериментальных исследований, описан разработанный метод мониторинга загрязнения и поверхностных дефектов стеклянных высоковольтных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного (ЭМ) излучения ЧР с синхронным накоплением с фазой сетевого напряжения, с учетом относительной влажности окружающей среды [А1-А3, А6-А7, А15, А16].

Понятие средней мощности основано на оценке напряженности ЭМ поля, измеренного с помощью приемника бесконтактно и пропорционального среднему току i через ЧР [5].

$$E_{д} = \frac{k^2 i l}{4\pi\omega\epsilon_a r}, \quad (1)$$

где $E_{д}$ – напряженность поля в зоне измерения радиоволны; i – ток ЧР, l – длина пробойного промежутка, ω – круговая частота колебаний, ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, r – расстояние от источника ЧР, λ – длина волны, k – волновое число.

Таким образом, выражение (1) позволяет связать характеристики ЧР со средним током $i_{ср}$, а последний с мощностью ЧР, поскольку $i_{ср}$ в соответствии с приведенными стандартами определяется как

$$I = (|q_0| + |q_1| + |q_2| + \dots + |q_{\max}|) / t_{1Ц}, \quad (2)$$

где $q_0, q_1, q_2, \dots, q_{\max}$ – абсолютные значения кажущихся зарядов ЧР, зарегистрированных за $t_{1Ц}$.

А мощность определяется как:

$$P = (q_0 U_0 + q_1 U_1 + q_2 U_2 + \dots + q_{\max} U_{\max}) / t_{1Ц}, \quad (3)$$

где U_0, U_1, U_2, U_{\max} – мгновенные значения воздействующего на изоляцию напряжения в момент образования соответствующих ЧР.

С целью регистрации ЭМ излучения был создан лабораторный образец устройства дистанционного определения средней мощности электромагнитного излучения ЧР (далее – Устройство), состоящего из следующих элементов (рис. 1): ЭМ сканирующего приемника; аналого-цифрового преобразователя (АЦП); штыревой антенны; датчика фазы; программного обеспечения на языке программирования LabVIEW [A12] на ПК.

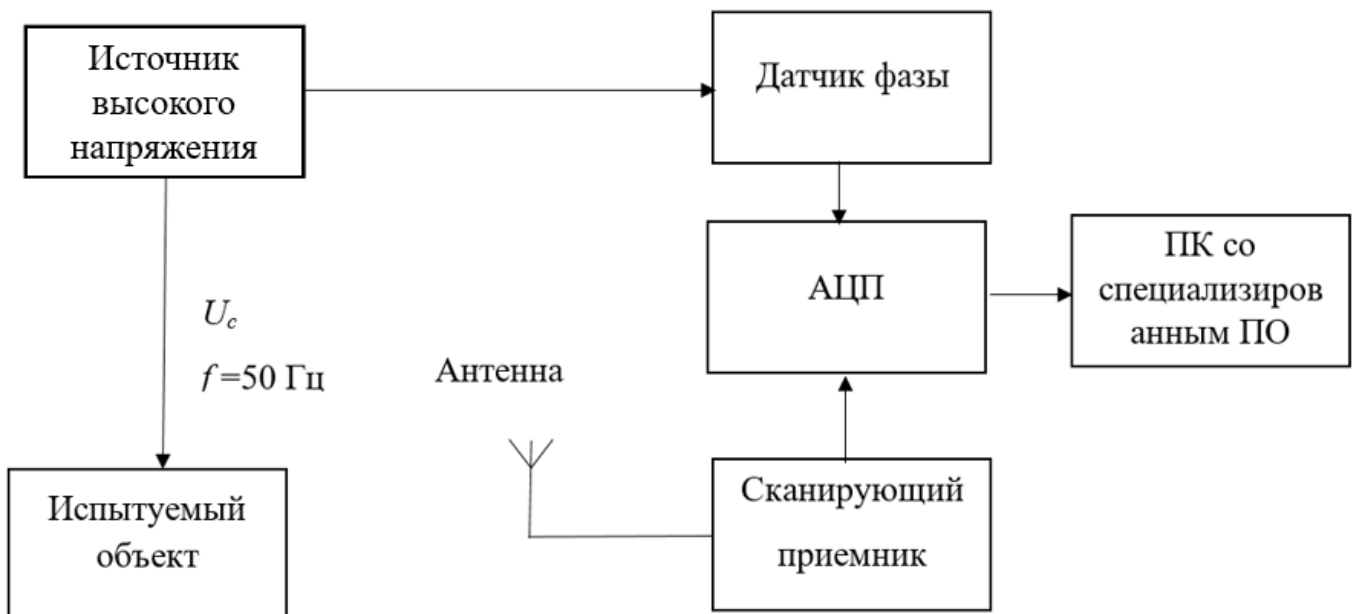


Рис. 1. Схема лабораторного образца устройства дистанционного определения средней мощности электромагнитного излучения ЧР

С помощью ЭМ приемника на основе модуля E70-868T14S в соответствии с международным стандартом IEEE 802.15.4 с частотой дискретизации 2,5 кГц определяется средняя мощность ЭМ излучения ЧР и производится синхронное накопление данных с фазой сетевого напряжения. На рис. 2. представлен алгоритм работы программы регистрации и обработки ЧР.

Рабочий частотный диапазон определяется исходя из соображений максимального уменьшения помех при достаточно уверенной регистрации сигналов ЧР от дефектов изоляции. С целью выбора рабочего диапазона частот был просканирован спектр частот [A12] от 30 МГц до 1,7 ГГц без ЧР и с ЧР (рис. 3) со штыревой широкополосной антенной с круговой диаграммой направленности (рис. 4). В результате была выбрана полоса с наименьшими шумовыми сигналами и достаточным соотношением сигнал/шум (861-876 МГц), учитывая, что до 400 МГц имеются помехи вблизи подстанций от трансформаторов, имеющих дефекты.

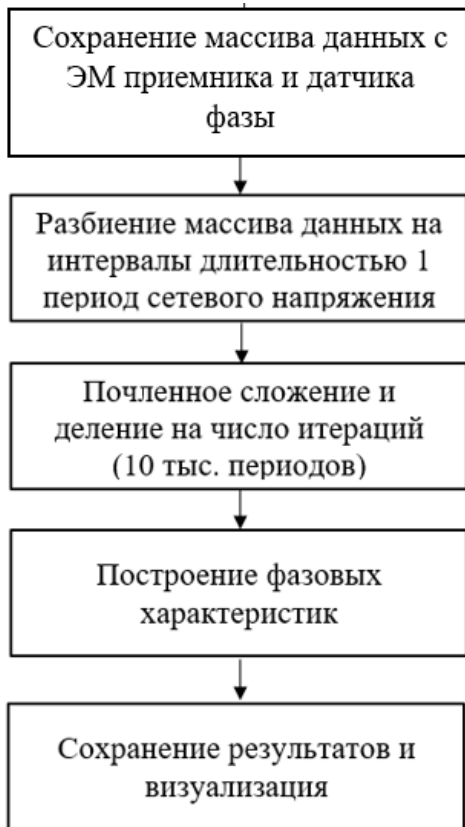


Рис. 2. Алгоритм работы программы регистрации и обработки ЧР

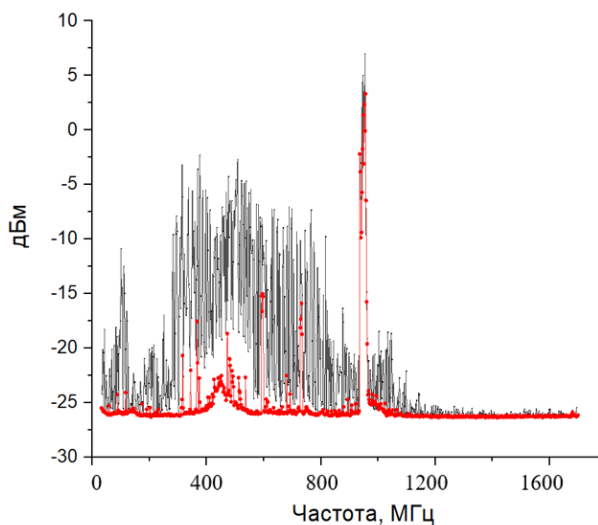


Рис. 3. Спектр частот (от 30 МГц до 1,7 ГГц) электромагнитного фона (красная линия с круглыми маркерами) и спектр, полученный при наличии ЧР в изоляции (черная линия без маркеров)

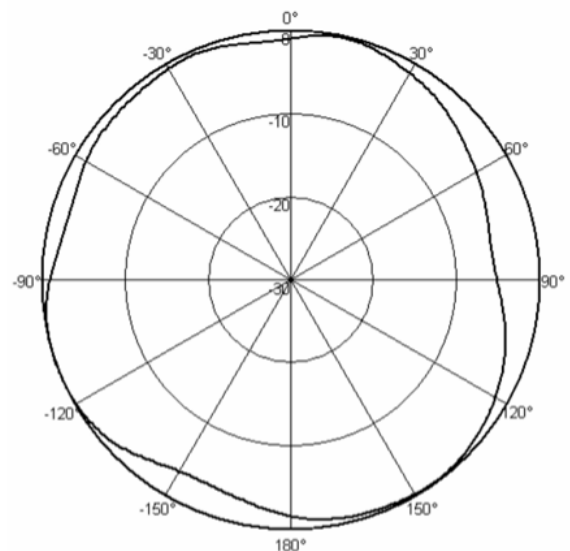


Рис. 4. Диаграмма направленности используемой антенны

Для реализации метода и проведения реальных экспериментов на ВИ был разработан лабораторный стенд, который состоит из следующих основных элементов (рис. 5) [А6, А11]: источника высокого напряжения АИД-70М (поз. 1); испытуемой гирлянды стеклянных высоковольтных изоляторов (ПС70Е) (поз. 2); контактного датчика для измерения кажущегося заряда электрическим методом (поз. 3); ЭМ приемника, измеряющего средний уровень мощности ЭМ излучения, диапазон частот 861-876 МГц (поз. 4); сканирующего приемника стационарного типа AOR AR5001D (супергетеродинный радиоприёмник) (поз. 5); датчика фазы напряжения (поз. 6); цифрового осциллографа (поз. 7) TBS2204B; АЦП (National Instruments USB-6351) и ПК с разработанным ПО (поз. 8); калибратора кажущегося заряда для калибровки измерительной системы (поз. 9) CAL1B; датчика температуры и относительной влажности (поз. 10) CENTER 310.

Затем была проведена калибровка измерительной системы с целью проверки ее функционирования и установления зависимости амплитуд

регистрируемых сигналов от значения кажущегося заряда, имитируемых ЧР и определения чувствительности каждого канала регистрации ЧР.

На лабораторном стенде измерения проводились под рабочим напряжением одновременно тремя методами и приборами: сертифицированным ультразвуковым дефектоскопом (NL-камера), электрическим методом в соответствии с ГОСТ Р 55191-2012 [4] и разработанным в диссертации методом.

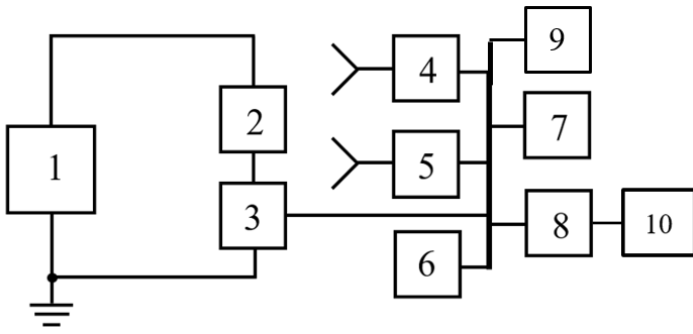


Рис. 5. Схема лабораторного стенда

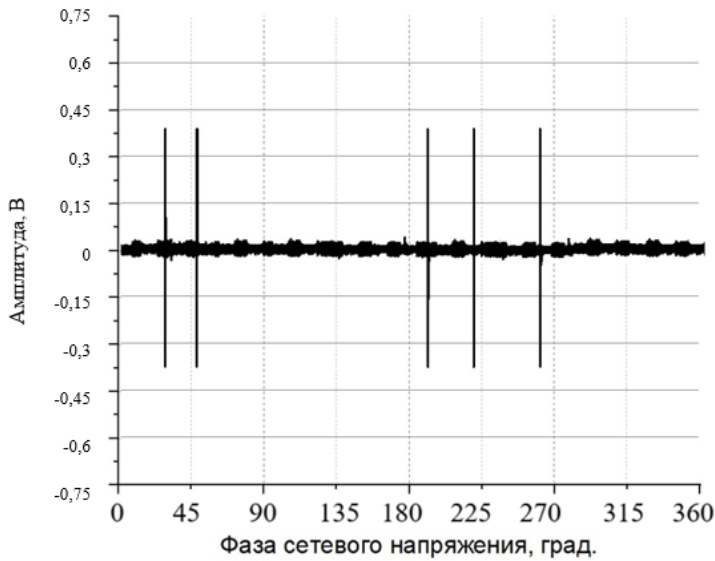


Рис. 6. Амплитудное распределение ЧР дефектного ВИ, полученное осциллографированием с помощью электрического метода (ось x – фаза сетевого напряжения в градусах, ось y – амплитуда ЧР)

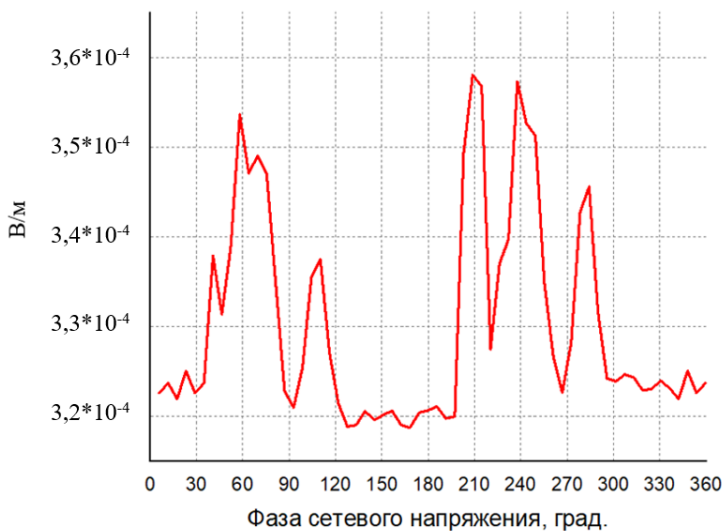


Рис.7. Фазовое распределение ЧР, полученное разработанным методом (ось x – фаза сетевого напряжения в градусах, ось y – напряженность поля в зоне измерения ЧР, В/м), диапазон частот 868-876 МГц

В качестве испытуемого объекта использовалась гирлянда из двух стеклянных высоковольтных изоляторов (марки ПС-70Е), один из которых имел дефект. Электрическим методом с помощью осциллографа (поз. 7) измерялась амплитуда кажущегося заряда на контактном датчике (поз. 3) и фаза сетевого напряжения с помощью датчика фазы (поз. 6).

На рис. 6 представлено амплитудное распределение ЧР, полученное за 1 период сетевого напряжения. В результате экспериментов в положительном полупериоде было установлено начало возникновения ЧР при $40 (\pm 10)$ градусов фазы сетевого напряжения, в отрицательном начале возникновения ЧР – $195 (\pm 10)$ град. При калибровке системы было установлено, что кажущийся заряд был равен 100 пКл. Фазовое распределение напряженности поля в зоне измерения ЧР (форм. 1) для того же испытуемого объекта, полученное с помощью разработанного метода ЭМ приемником (поз. 4), датчиком фазы и ПК с разработанным ПО представлено на рис. 7.

Приведенная погрешность, разработанного в диссертации метода в сравнении с электрическим методом по фазовому углу начала возникновения ЧР, составила 5,3%, что свидетельствует о работоспособности предложенного метода.

Нами были проведены исследования влияния относительной влажности окружающего воздуха на уровень средней мощности излучения ЧР. В климатической камере помещалась гирлянда из двух стеклянных изоляторов, загрязненных в соответствии с ГОСТ 56735-2015 [6] и в результате экспериментов было установлено,

что средняя мощность ЭМ излучения ЧР повышается в зависимости от относительной влажности. Поэтому целесообразно состояние ВИ определять при 100%-ной относительной влажности.

На основании ГОСТ [6], научных работ [5, 7], на основании результатов сертифицированного ультразвукового дефектоскопа NL Camera (который классифицирует техническое состояние изоляции по степеням опасности дефектов), а также на основании собственных экспериментов были установлены критерии для трех технических состояний стеклянных изоляторов: «нормальное», «ухудшенное» (есть риск пробоя) и «предаварийное» (предельный риск, необходима замена или очистка от загрязнений). Три варианта технического состояния изоляторов имитировались с помощью различного уровня загрязнения с различной плотностью солевых отложений на поверхности изолятора в соответствии с ГОСТ [6].

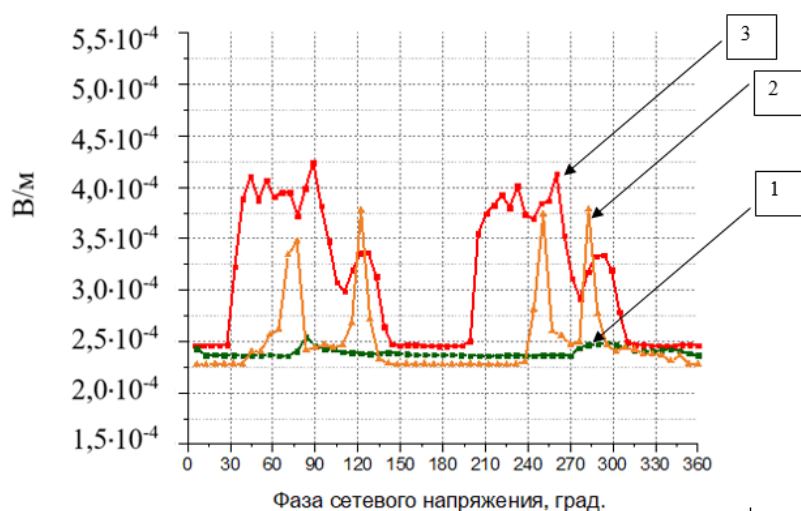


Рис. 8. Сравнение сигналов с трех групп гирлянд с различным уровнем загрязнения поверхности, полученных с помощью разработанного метода и Устройства, диапазон частот 868-876 МГц:
 Линия 1 – «нормальное» техническое состояние;
 2 – «ухудшенное» (есть риск пробоя); 3 – «предаварийное» (предельный риск, необходима замена или очистка)

в соответствии с ГОСТ [6].

Измерения трех групп изоляторов проводились следующими приборами: разработанным измерительным устройством, осциллографом, ультразвуковым дефектоскопом NL Camera и сканирующим приемником AOR AR5001D [A4, A8].

На рис. 8. представлены данные с разработанного Устройства для изоляторов трех групп с различным техническим состоянием.

В Табл. 1 приведены критерии оценки загрязнения и поверхностных дефектов высоковольтных изоляторов.

Таблица 1. Критерии оценки загрязнения и поверхностных дефектов высоковольтных изоляторов

Параметры	Нормальное	Ухудшенное	Предаварийное
Фазовый угол появления ЧР (Δφ), град.	80-90	45-80	<45
Напряжение появления ЧР, кВ (для ЛЭП 35 кВ)	>20	14,5-20	<14,5

В третьей главе описаны разработанное устройство дистанционного определения средней мощности ЭМ излучения ЧР, система мониторинга загрязнения и поверхностных дефектов стеклянных ВИ (далее – Система) [A5, A9, A10, A14] и методика локализации гирлянды изоляторов с ухудшенным и предаварийным состоянием с помощью модели пространственного затухания ЭМ излучения [A7].

Разработанное устройство включает в себя (рис. 9) ЭМ приемник, определяющий среднюю мощность ЭМ излучения; датчик фазы; датчик температуры; датчик влажности; радиомодуль; микроконтроллер с АЦП; флеш-память.

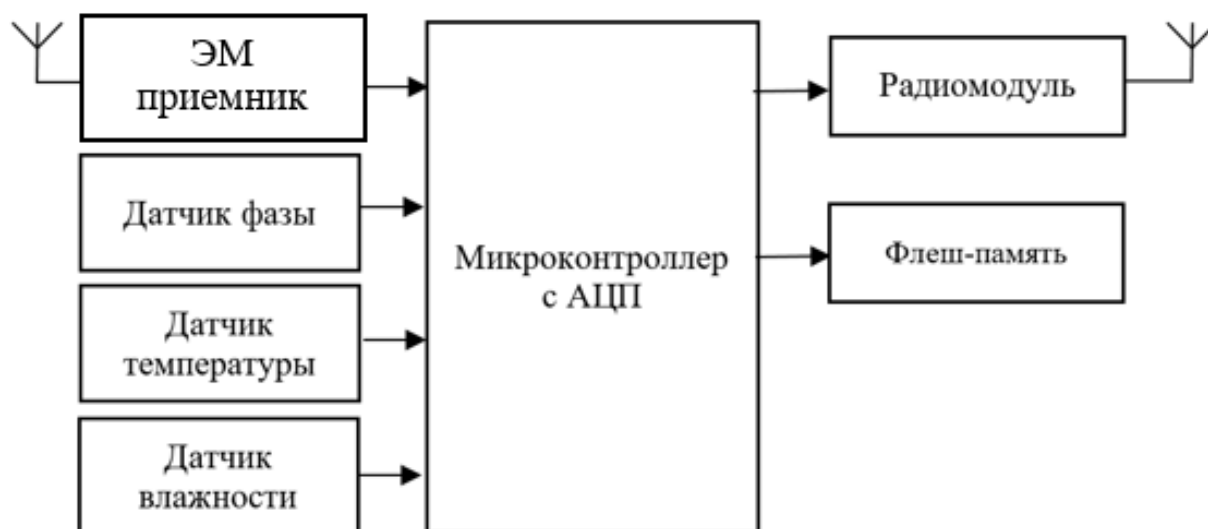


Рис. 9. Расширенная блок-схема устройства 1-3

Три одинаковых откалиброванных устройства устанавливаются по одному на каждый фазный провод ВЛЭП и вместе с пунктом сбора и обработки данных формируются в группу для каждой опоры (рис. 10). Система представляет собой сеть из множества групп устройств, установленных на фазных проводах на всей воздушной линии, и программы визуализации на диспетчерском пульте [А5].

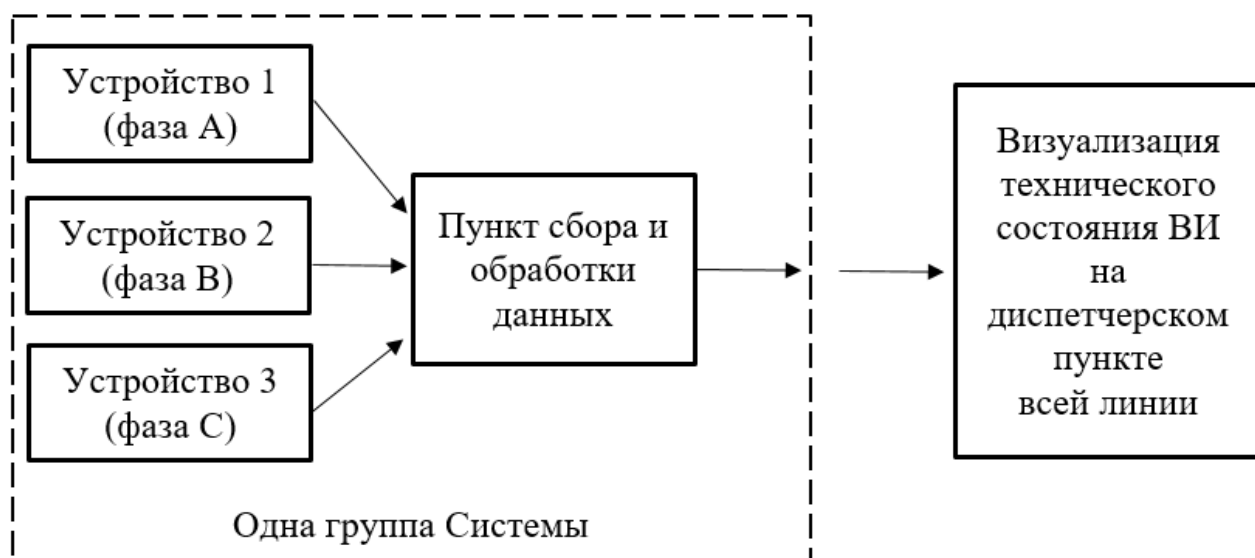


Рис.10. Система организации мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов ВИ

Устройства определяют и в режиме реального времени синхронно накапливают данные о средней мощности электромагнитного излучения ЧР и фазе сетевого напряжения, с учетом относительной влажности окружающей среды. Основное заключение о техническом состоянии стеклянных ВИ Система формирует при 100% относительной влажности, основываясь на напряжении возникновения ЧР по

таблице 1. При приближении к указанной влажности Система накапливает данные каждые 10 тыс. периодов сетевого напряжения и отправляет их на диспетчерский пункт. При меньшей влажности Система работает в режиме энергосбережения и направляет данные на диспетчерский пункт 1 раз в сутки или в случае сдвига фазового угла возникновения ЧР до уровня значительной или критической степени опасности.

В пункте сбора и обработки данных производится локализация гирлянды изоляторов с ухудшенным и предаварийным состоянием. Передача усредненных данных с трех устройств по радиоканалу [A5] составляет 768 байт и осуществляется по беспроводному каналу (Zigbee) в соответствии с протоколом IEEE 802.15.4.

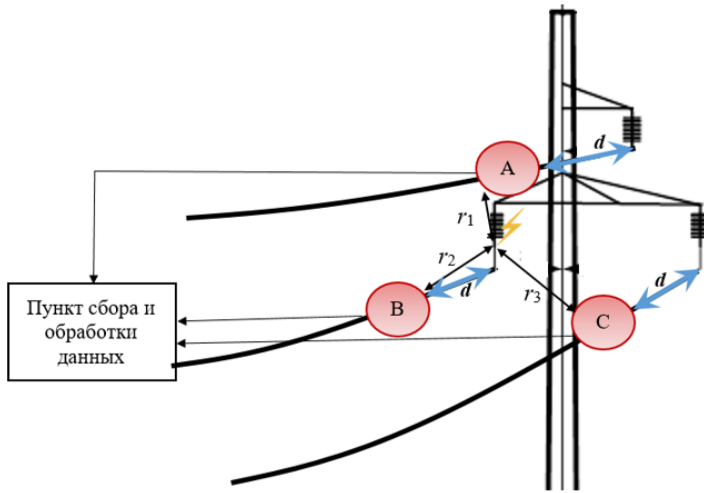


Рис. 11. Три устройства А, В, С, установлены на соответствующих фазных проводах ЛЭП, r_1, r_2, r_3 – соответствующие расстояния от устройства до гирлянды изоляторов с предаварийным состоянием, d – заданное расстояние от точки подвеса провода до устройства

Каждое устройство установлено на одинаковом расстоянии d от гирлянды изоляторов на соответствующей устройству фазе. В связи с затуханием ЭМ излучения фазовые распределения ЧР одного и того же дефекта на трех устройствах будут отличаться по амплитуде (формула 1), так как различны расстояния до дефекта – r_1, r_2, r_3 (рис. 11). Локализация дефектной гирлянды производится с помощью подставляется каждой гирлянды в качестве единственного источника излучения и вариант с наименьшим среднеквадратичным отклонением принимается как истинный.

С целью обеспечения круглосуточного функционирования Системы

на ЛЭП, мы внедрили ее в имеющуюся систему мониторинга СМГ-16, разработанную ранее в научно-исследовательской лаборатории КГЭУ [8]. СМГ-16 ранее диагностировала механические нагрузки на ЛЭП, кручение провода, короткие замыкания и т.п.

Измерительные элементы СМГ-16 устанавливаются на каждый фазный провод, питаются посредством трансформатора тока от самой линии и передают данные по радиоканалу (протокол Zigbee) по технологии Mesh-сети, которая обеспечивает передачу данных до диспетчерского пункта. С помощью добавления разработанной Системы (модуль диагностики ВИ) в СМГ-16 появляется новая функция мониторинга загрязнения и поверхностных дефектов стеклянных ВИ. Данная модификация запатентована [A8, A9, A13, A14].

Модернизированная система СМГ-16 внедрена в опытную эксплуатацию в ПАО «Татнефть» на ЛЭП 35 кВ (рис. 12). Модуль контроля технического состояния ВИ в составе СМГ-16 успешно работает с марта 2022 года.

Положение гирлянды изоляторов с наиболее опасным состоянием было определено с погрешностью порядка 1 метра и выявлено, что ЧР с максимальной мощностью излучались с изолятора фазы А. Было установлено, что гирлянда изоляторов имеет ухудшенное состояние, дальнейшая эксплуатация возможна.



Рис. 12. Датчики модернизированной Системы, установленные на ЛЭП 35 кВ в ПАО «Татнефть»

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа исследований физических и технических возможностей различных методов и устройств, предназначенных для определения состояния высоковольтных изоляторов, обоснована целесообразность использования метода мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных высоковольтных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения ЧР.

2. Разработан метод мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных высоковольтных изоляторов на основе определения средней мощности сигнала электромагнитного излучения ЧР с синхронным накоплением с фазой сетевого напряжения с учетом относительной влажности окружающей среды.

3. Разработан лабораторный стенд с целью изучения электрофизических процессов в ВИ под воздействием высоких напряжений и проведения лабораторных исследований. Лабораторный стенд позволяет имитировать воздушную линию с напряжением до 50 кВ, проводить на нем испытания электрического и электромагнитного методов контроля технического состояния ЧР.

4. На основе проведенных экспериментов и расчетов выбраны наиболее оптимальный частотный диапазон 861-876 МГц и параметры штыревой широкополосной антенны для определения средней мощности сигнала электромагнитного излучения ЧР.

5. Разработано программное обеспечение для обработки и визуализации данных о текущем состоянии стеклянных ВИ. Программа обрабатывает и визуализирует данные фазового распределения средней мощности электромагнитного излучения ЧР, с учетом относительной влажности окружающей среды.

6. Путем проведения лабораторных испытаний с помощью электрического метода экспериментально подтверждена эффективность предложенного в диссертации метода мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных ВИ.

7. Экспериментально установлено, что средняя мощность ЭМ излучения ЧР при загрязнении и поверхностных дефектах стеклянных изоляторов увеличивается при увеличении относительной влажности.

8. Для разработанной системы мониторинга определены три состояния ВИ:

нормальное, ухудшенное и предаварийное. Определены критерии их оценки: фазовый угол начала возникновения ЧР и напряжение возникновения ЧР (для ЛЭП 35 кВ). Оценка технического состояния производится при 100%-ной относительной влажности.

9. Разработана система мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов в стеклянных ВИ, совместимая с ранее разработанной системой СМГ - 16.

10. Разработана методика локализации гирлянды изоляторов с ухудшенным и предаварийным состоянием с помощью модели затухания ЭМ излучения ЧР.

11. Проведены натурные испытания разработанной системы мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов в составе имеющейся системы мониторинга воздушной ЛЭП СМГ-16. Разработанный модуль мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов в составе СМГ-16 успешно работает с марта 2022 года. Обнаружена гирлянда со ухудшенным техническим состоянием на фазе А, дальнейшая эксплуатация возможна.

Задача, поставленная в диссертационной работе, решена. Исследуемое направление имеет перспективы дальнейшего научного развития в области обеспечения мониторинга технического состояния ВИ и их остаточного ресурса после проведения испытаний ВИ с различными типами дефектов, в том числе внутренними; применения разработанного в диссертации метода и системы к мониторингу фарфоровых и полимерных изоляторов, в том числе на подстанциях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и/или Scopus

A1. Ivanov D.A., Galieva T.G., Sadykov M.F., Golenishchev-Kutuzov A.V., Naumov A.A. Method for the diagnosis of high-voltage dielectric elements during operation based on dynamic registration of electromagnetic radiation // E3S Web of Conferences. 2020. V. 216. P. 01061. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601061.

A2. 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. (Q1 по SJR).

A3. Ivanov D.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Galieva T.G. Assessment of the technical condition of high-voltage insulators during operation // Machines. 2022. V. 10 No. 11, P. 1063. DOI: 10.3390/machines10111063. (Q2 по SJR).

A4. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Galieva T.G. System for Monitoring the Acoustic Radiation of Discharge Processes at an Electric Substation to Diagnose the Technical State of Insulators // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. V. 85 No. 11, pp. 1258-1261. DOI: 10.3103/S1062873821110125.

A5. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Golenishchev-Kutuzov A.V., Yaroslavsky D.A., Galieva T.G., Arslanov A.D. The application of the technology of sensor networks for the intellectualization of the overhead power transmission lines // E3S Web of Conferences. 2020. V. 220. P. 01071. DOI: 10.1051/e3sconf/202022001071.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК

А6. 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 (категория К1).

А7. Галиева Т. Г., Иванов Д. А., Садыков М. Ф., Андреев Н. К., Хамидуллин И. Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 4. С. 165-177. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177 (категория К2).

А8. 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: 10.25206/1813-8225-2021-1180-48-55 (категория К1).

Патенты и авторские свидетельства

А9. Патент № 206382 U1 Российская Федерация, МПК H02J 13/00. Устройство оперативного мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи: № 2021113356: заявл. 11.05.2021: опубл. 08.09.2021 / М. Ф. Садыков, М. П. Горячев, Д. А. Ярославский, Д. А. Иванов, Галиева Т.Г., Нгуен В.В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

А10. Патент № 211126 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/00, G01R 31/08. Устройство оперативного онлайн-мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи: № 2020124117: заявл. 21.07.2020: опубл. 23.05.2022 Бюл. № 15 / Иванов Д.А., Горячев М.П., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Галиева Т.Г., Арсланов А.Д.; заявитель ООО «Научно-производственная компания «Фарада».

А11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021668517 Российская Федерация. Программный комплекс записи и обработки сигналов частичных разрядов в процессе мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов: № 2021667722: заявл. 10.11.2021: опубл. 17.11.2021 / Д.А. Иванов, А.В. Голенищев-Кутузов, А.В. Семенников, Галиева Т.Г.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

А12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020666708 Российская Федерация. Программа анализа среднего значения мощности сигналов радиоканалов протокола ZigBee на разных частотах: №2020666027: заявл. 07.12.2020: опубл. 14.12.2020 / Садыков М.Ф., Иванов Д.А., Ярославский Д.А., Горячев М.П., Галиева Т.Г., Арсланов А.Д.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

A13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022666391 Российская Федерация. Программа обработки диагностической информации, регистрируемой электромагнитным датчиком частичных разрядов: №2022662478: заявл. 06.07.2022: опубл. 31.08.2022 / Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Горячев М.П., Мочалов Н.С.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

A14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022664225 Российская Федерация. Программа обработки и визуализации данных для системы автоматического мониторинга состояния ВЛЭП и подстанций: №2022662430: заявл. 06.07.2022: опубл. 26.07.2022 / Иванов Д.А., Ярославский Д.А., Садыков М.Ф., Галиева Т.Г., Горячев М.П., Арсланов А.Д.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях

A15. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., Semennikov A. V., Galieva T. G. Monitoring system of high voltage dielectric equipment // E3S Web of Conferences. 2021. V. 288. P. 01088. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801088.

A16. Ivanov D., Golenishchev-Kutuzov A., Galieva T. Methods of Periodic Complex Remote Measurement of Partial Discharge Characteristics in Highvoltage Insulators // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2022, pp. 159-163. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906650.

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования – Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 370 с.
2. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
3. МЭК (IEC TS) 62478:2016. High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. Дата введения: 29.08.2016.
4. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. Дата введения 01.01.2014.
5. Куценко С.М. Разработка дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта [Текст]: дис...канд. техн. наук: 05.14.12 / Куценко Сергей Михайлович. – Томск, 2006. – 143с.
6. ГОСТ 56735-2015 (IEC/TS 60815-1:2008). Изоляторы высокого напряжения для работы в загрязненных условиях выбор и определение размеров. Стандартиформ. Дата введения 01.08.2016.
7. Устройство оперативного мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи: пат. 166411 РФ / М. Ф. Садыков, Р. Ш. Мисбахов, О. Г. Савельев, Ю. С. Чугунов - 2016112004/28; заявл. 30.03.2016; опубл. 27.11.2016.
8. Palangar M. F., Mirzaie M. Diagnosis of porcelain and glass insulators conditions using phase angle index based on experimental tests // in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 1460-1466.

Подписано к печати 14.12.2022.
Формат 60x841/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.

Усл. печ. 0,93 л. Печ. 1,0 л. Тираж 100 экз. Заказ № 228.
420111, Казань, Дзержинского, 9/1. Тел.: 8–917–264–84–83.
Отпечатано в редакционно–издательском центре «Школа».
E–mail: ric-school@yandex.ru