

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»

*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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
к.т.н., доцент, доцент кафедры  
«Промышленная электроника»  
Иванов Дмитрий Алексеевич

Казань – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. РОЛЬ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ДИАГНОСТИРОВАНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	16
1.1. Понятие термина ЧР и его характеристик.....	15
1.1.1. Возникновение частичных разрядов в высоковольтном изоляцияционном оборудовании.....	20
1.1.2. Статистика аварийных ситуация на ЛЭП.....	27
1.2. Классификация методов обнаружения ЧР.....	30
1.2.1. Электрический метод.....	31
1.2.2. Электромагнитный метод.....	32
1.2.3. Акустический метод.....	35
1.2.4. Оптические методы.....	38
1.3. Возникновение разрядов при поверхностных дефектах и загрязнениях стеклянных изоляторов.....	40
Выводы по главе 1.....	43
2. АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЙ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ СТЕКЛЯННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ.....	45
2.1. Анализ известных теоретических и экспериментальных исследований.....	45
2.1.1. Патентный поиск.....	45
2.1.2. Анализ известных методов локализации источников ЧР.....	50
2.1.3. Применение показателя мощности принятого сигнала как способ регистрации ЧР.....	56
2.2. Разработка нового метода мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов.....	58
2.2.1. Радиочастотные помехи.....	61
2.2.2. Подавление помех, вызванных коронными разрядами.....	65
2.2.3. Метод синхронного накопления.....	67
2.2.4. Разработка лабораторного стенда.....	69

2.2.5. Калибровка измерительной системы.....	77
2.2.6. Верификация разработанного метода.....	80
2.3. Экспериментальное обоснование влияния относительной влажности на среднюю мощность электромагнитного излучения ЧР.....	87
2.4. Критерии оценки трех состояний стеклянных ВИ для разработанной системы мониторинга.....	90
Выводы по главе 2.....	99
<b>3. РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СТЕКЛЯННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СОЗДАННОГО МЕТОДА.....</b>	<b>101</b>
3.1. Описание системы.....	100
3.2. Локализация источника ЧР.....	104
3.3. Опытная эксплуатация системы дистанционного контроля высоковольтных изоляторов.....	108
Выводы по главе 3.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	116
ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	118
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	134

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ВИ – высоковольтные изоляторы

ВЛ – воздушная линия

ВЛЭП – воздушные линии электропередачи

ПК – персональный компьютер

Приемник-1 – разработанное измерительное устройство

Приемник-2 – широкополосный сканирующий приемник AOR AR5000A

Система – система мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов  
стеклянных изоляторов

ЧР – частичные разряды

ЭМ – электромагнитный

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности**

Техническое обслуживание и оценка срока службы высоковольтных энергосистем требуют мониторинга состояния всего действующего оборудования в каждой определенной области. Многие факты показывают, что первопричинами большинства аварий на электрифицированном оборудовании являются дефекты высоковольтной изоляции [1-4]. Высоковольтная изоляция энергосистем подвержена выходу из строя из-за высоких электрических напряжений. Поэтому состояние высоковольтных изоляторов требует постоянного контроля. Процесс старения электрической изоляции в высоковольтном оборудовании может ускориться из-за возникновения частичных разрядов. Каждый разряд оказывает негативное воздействие на диэлектрик за счет образования свободных радикалов, электромагнитного (ЭМ) излучения и повышенной температуры. Из-за этого изоляция с течением времени деградирует, теряет свои диэлектрические свойства и все больше подвергается микропробоям, которые могут привести к полному пробое и выходу из рабочего состояния.

Частичные разряды представляют собой локальные газовые пробои, которые могут возникать в любой системе изоляции при соответствующих условиях электрического напряжения. Частичный разряд (ЧР) – это электрический разряд малой мощности, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами, и не вызывает значительного изменения напряжения между ними [5-7].

Измерение ЧР является общепринятым во всем мире методом диагностики изоляции электрического оборудования [8-10]. Сегодня тенденция заключается в переходе от обычного периодического контроля ВИ к онлайн-мониторингу для своевременного выявления ухудшения текущего состояния и прогнозирования срока службы изоляции [11].

При загрязнении высоковольтных изоляторов (ВИ), как и при поверхностных дефектах, возникают частичные разряды при увлажнении, и при сильном загрязнении может произойти полный пробой изоляции. Анализ

измерений таких ЧР направлен на извлечение информации о дефектах изоляции или загрязнении, которые затем используются для оценки риска повреждения изоляции оборудования.

В настоящее время в электроэнергетике диагностику технического состояния высоковольтных изоляторов (ВИ), как наиболее уязвимых элементов изоляции, проводят посредством периодического осмотра и с применением различных мобильных переносных диагностических устройств (тепловизоров, ультрафиолетовых дефектоскопов, приборов, основанных на ультразвуковых и электромагнитных приемниках). Протяженность одного участка воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) 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 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.

В связи с этим, разработка дистанционного метода «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 ФСК [12] 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 загрязнённым изолятором и возможность дальнейшей эксплуатации оборудования.

На основе разработанного метода в диссертации разработана система мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов «Система». Система состоит из устройств, устанавливаемых по одному на каждый фазный провод ВЛЭП в каждом пролете и запитываемых от линии с помощью трансформаторов тока. Результатом работы Системы мониторинга стеклянных ВИ является определение уровня загрязнения и поверхностных дефектов на изоляторах. На основе определенного напряжения возникновения ЧР (при максимальном уровне относительной влажности) общая оценка технического состояния п 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 «предаварийное» (предельный риск, необходима замена).

При приближении к максимальному уровню относительной 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 один раз в сутки или в случае сдвига фазового угла возникновения ЧР до уровня значительной или критической степени опасности.

В случае регистрации дефекта или сильного загрязнения, Система определяет местоположение дефектной или загрязненной гирлянды изоляторов.

Передача данных между устройствами производится по беспроводному каналу по протоколу Zigbee.

В данной работе рассматривается мониторинг только стеклянных высоковольтных изоляторов ПС70Е, как один из этапов разработки данного направления, так как они занимают первое место по объему рынка изоляторов в России – 42,1% [13].

### **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 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 [14] и ГОСТ Р 55191-2012 [5] 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 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 электросварки 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 международной базе 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, РТ.

#### **Личный вклад автора**

Результаты, представленные в диссертации и отраженные в публикациях, получены при непосредственном участии соискателя. Личный вклад автора состоит в участии 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 – доцентом кафедры «Промышленная электроника» 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 и библиографию из 109 наименований.

Автор выражает глубокую и искреннюю признательность своему научному руководителю доценту Иванову Дмитрию Алексеевичу, профессору Садыкову Марату Фердинантовичу, доценту Ярославскому Данилу Александровичу за их неоценимую помощь при выполнении данной работы.

# 1. РОЛЬ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ДИАГНОСТИРОВАНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

## 1.1. Понятие термина ЧР и его характеристик

Частичный разряд представляет собой очень сложный физический процесс, и для того чтобы научиться его регистрировать, необходимо разобраться с этим понятием. В литературе имеется множество теорий, в которых понятие частичный разряд классифицируют по различным категориям, но в первую очередь, обратимся к нормативным документам, которые имеются в мире, а их два:

1. ГОСТ Р 55191-2012 (перевод международного стандарта МЭК 60270:2000) «Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов» [5];

2. IEC TS 62478:2016. High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods [14] (только на английском языке).

Первый стандарт более обобщенный, базовый так сказать, в котором имеются следующие важные определения:

«Частичный разряд (ЧР) – это электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами (поэтому он и называется частичным), находящимися под разными потенциалами. Частичные разряды сопровождаются излучением звука, света, тепла и химическими реакциями».

«Кажущийся заряд – абсолютное значение такого заряда, мгновенное введение которого между электродами испытуемого объекта, установленного в испытательной схеме, могло бы дать такое же показание на измерительном приборе, как и сам импульс ЧР. Кажущийся заряд обычно выражается в кулонах», т.е. нужно извне внести в изоляцию оборудования некий заряд, чтобы компенсировать внутренний разряд в зоне дефекта. Именно его мы и будем регистрировать в работе, так как невозможно определить реальный частичный разряд. Но для упрощения, далее в работе будем использовать термин «частичный разряд».



Если в первом стандарте описывается электрический (контактный) метод регистрации ЧР, то следующий стандарт уже является следующим этапом - рассматривается бесконтактное определение ЧР, что мы будем рассматривать в в следующем разделе главы.

ЧР в высоковольтной изоляции возникают в газовых включениях или в прослойках жидкого диэлектрика [3]. Так как мы рассматриваем в работе высоковольтные изоляторы (ВИ), то подробно изучим первый случай.

Обычно размеры включений в высоковольтной изоляции в направлении электрического поля не превышают миллиметра и составляют малую часть от всей толщины изоляции, что на первый взгляд кажется не критичным. Но, так как газы имеют меньшую электрическую прочность, чем твердый диэлектрик, газовые включения представляют собой слабые места. К тому же, в связи с различием диэлектрических проницаемостей газа и твердых диэлектриков в изоляторе, напряженность во включениях выше, чем в остальной изоляции.

Рассмотрим схему замещения изоляционного промежутка с газовым включением (рис. 1.1).

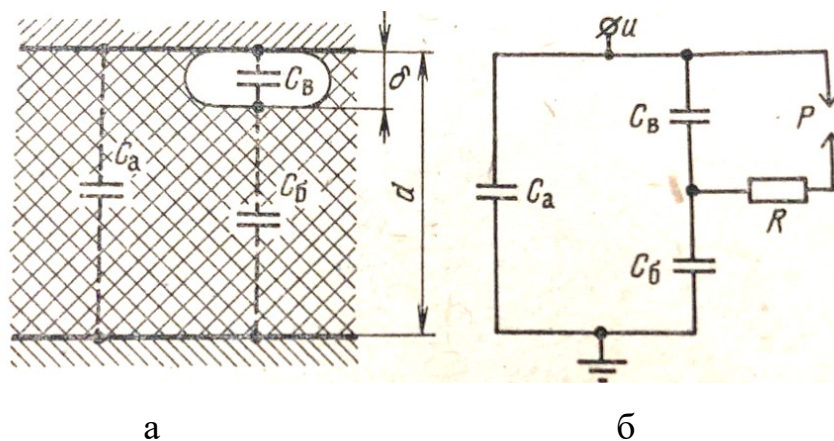


Рис.1.1. Схема изоляции с газовым включением (а)

и схема замещения при ЧР (б):  $C_B$  – емкость газового включения;  $C_б$  – емкость участка изоляции, расположенного последовательно с включением;  $C_a$  – емкость всей остальной изоляции [2]

Срабатывание разрядника  $P$  имитирует пробой газового включения, поэтому пробивное напряжение разрядника равно пробивному напряжению  $U_{пр}$  включения. Сопротивление  $R$  – условно сопротивление канала разряда во включении.

Пусть с момента  $t = 0$  на изоляцию воздействует переменное напряжение  $u = U_m \sin \omega t$ . До появления ЧР напряжение на включении изменяется при этом по закону  $u_{\epsilon} = U_{m\epsilon} \sin \omega t$ , (рис.1.2) где

$$U_{m\epsilon} = U_m \frac{C_{\delta}}{C_{\delta} + C_{\epsilon}} \quad (1.1)$$

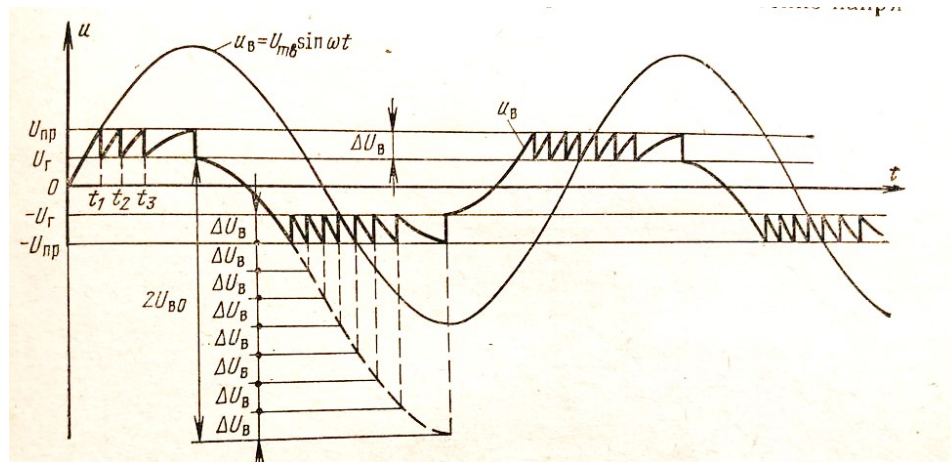


Рис.1.2. Изменение напряжения  $U_B$  на газовом включении при ЧР [2]

В момент  $t_1$  напряжение  $U_B$  достигает значения  $U_{пр}$ , и происходит пробой разрядника  $P$ , т.е. возникает первый ЧР во включении. При этом, так как емкость  $C_{\delta}$  мала и  $1/(\omega C_{\delta}) \gg R$ , напряжение  $U_B$  начинает резко снижаться. Постоянная времени  $RC_{\delta}$  имеет величину примерно  $10^{-9} - 10^{-8}$  с. Поэтому практически мгновенно напряжение на  $C_{\delta}$  снижается до значения напряжения гашения  $U_{г} \neq 0$ , при котором ЧР гаснет. Время существования одного разряда несоизмеримо меньше периода приложенного напряжения, поэтому можно принять его равным 0 и полагать, что скачок напряжения  $\Delta U_{\epsilon} = U_{пр} - U_{г}$  на  $C_{\delta}$  при ЧР происходит мгновенно.

После погасания первого ЧР напряжение на  $C_{\delta}$  вновь начнет нарастать, но теперь уже в соответствии с выражением

$$U_{\epsilon} = U_{m\epsilon} \sin \omega t - \Delta U_{\epsilon} \quad (1.2)$$

В момент времени  $t_2$  напряжение  $U_B$  опять достигнет значения  $U_{np}$ , и произойдет второй ЧР. После его погасания напряжение на  $C_B$  будет изменяться по закону

$$U_{\epsilon} = U_{m\epsilon} \sin \omega t - 2\Delta U_{\epsilon} \quad (1.3)$$

При  $t = t_3$  произойдет третий разряд, и далее ЧР будут следовать так, как это показано на рис. 1.2.

Построения на рис. 1.2. выполнены для частного случая  $U_{m\epsilon} = 2,5U_{np}$ ,  $\eta = U_{\Gamma}/U_{np} = 0,5$  и для симметричного включения, у которого пробивное напряжение и напряжение гашения не зависят от полярности. При принятом допущении о времени существования отдельного разряда число  $n_{T/2}$  ЧР за полпериода не зависит от частоты и в случае симметричного включения, как это следует из рис.1.2, равно:

$$n_{T/2} = \frac{2U_{m\epsilon} - 2U_{\Gamma}}{2U_{\epsilon}} \quad (1.4)$$

Соответственно, число ЧР в единицу времени будет:

$$n_t = 2n_{T/2}f = 4f \frac{U_{m\epsilon} - U_{\Gamma}}{U_{np} - U_{\Gamma}} = 4f \frac{U_{m\epsilon} - \eta U_{np}}{U_{np}(1 - \eta)} \quad (1.5)$$

Умножив числитель и знаменатель правой части выражения на  $(C_B + C_{\delta})/C_{\delta}$  и перейдя от амплитудных значений напряжения к действующим, получим:

$$n_t = 4f \frac{U - \eta U_{чр}}{U_{чр}(1 - \eta)} \quad (1.6)$$

где  $U = \frac{U_{m\epsilon}}{\sqrt{2}} \frac{C_{\epsilon} + C_{\delta}}{C_{\delta}}$  - действующее напряжение, приложенное к изоляции, при котором в газовом включении возникают ЧР. Напряжение  $U_{чр}$  называют напряжением появления ЧР [2].

Известно, что в своем развитии электрический пробой проходит лавинно-стримерную, лидерную, обратного (главного) разряда и финальную (дуговую) стадии [15].

### 1.1.1. Возникновение частичных разрядов в высоковольтном изоляционном оборудовании

Под действием высокой напряжённости электрического поля в изоляторах в местах с пониженной электрической прочностью (например, в дефектах) возникают частичные разряды, представляющие из себя локальный пробой включений газа. Для обнаружения появившегося частичного разряда учитываются конфигурации электрического поля высоковольтной изоляции, электрические характеристики изолятора, химический состав изолятора и его поверхности, геометрические особенности изолятора и так далее.

Рассмотрим процессы, происходящие в газовых включениях. Если в данном включении образуется электрическое поле, и появляется свободный электрон, который при достаточной напряжённости электрического поля, может ионизировать молекулу газа или атом при соприкосновении. В результате удара появляется новый электрон и ион, имеющий положительный заряд. Появившийся электрон, как и первый электрон, начинается производить те же самые действия, образуя новые пары «электрон – положительный ион». Данный процесс имеет название «Лавинное образование электронов» [16].

В данном виде возникновения лавины электронов имеет место соударения электрона об атом или молекулу, то здесь ключевую роль играет ударная ионизация и коэффициент ударной ионизации  $\alpha$ , который равен числу соударений (или ионизаций) производимых электроном на определённом расстоянии по направлению электрического поля.

Во время действия лавинного образования электронов также образуются положительно заряженные ионы, подвижность которых несколько меньше, чем самих электронов. Поэтому за время развития лавины, положительные ионы не успевают преодолеть путь к катоду. Следовательно, при окончании действия лавинного образования электронов, в газовом включении изоляции остаются положительные ионы, которые искажают однородность электрического поля в данном промежутке. На рисунке 1.3 показано распределение напряжённости

электрического поля с отсутствием лавинного образования электронов (т.е. отсутствие газового включения) и с наличием лавинного образования электронов.

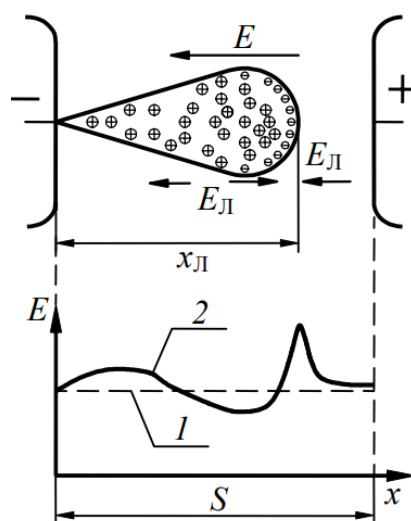


Рис. 1.3. Напряженность электрического поля в рассматриваемом промежутке  $S$ :  
1 – средняя напряженность без лавины; 2 – напряжённость с учётом лавины электронов [2]

На рисунке 1.3 видно, что напряжённость электрического поля в начале лавины возрастает, в последствии уменьшается в середине и в конце незначительно возрастает на определённом участке.

Для описания лавинного процесса обычно прибегают к методике расчёта электронов, участвующих в лавинном образовании. Допускаем, что за счёт внешнего воздействия из катода выпускается  $n_0$  электронов. Так как в данном случае описывается лавинный процесс, то за промежуток  $x$  число электронов увеличивается до значения  $n$ . На рисунке 1.4 показано образование новых электронов.

Приращение числа электронов  $d_n$  к пути  $d_x$  представлено на следующей формуле:

$$\frac{d_n}{n} = \alpha \cdot d_x \quad (1.7)$$

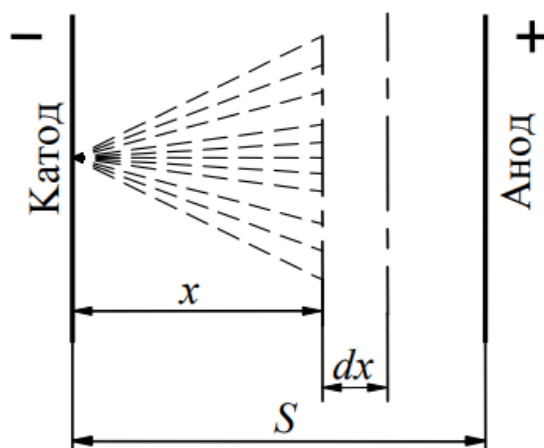


Рис. 1.4. Увеличение количества электронов на определённом промежутке [2]

Интегрируя уравнение (1.7) по  $n$  от 1 до  $n$  и по  $x$  от 0 до  $x$ , получим:

$$\int_1^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha \cdot dx \quad (1.8)$$

Допустим однородность поля газового включения, в котором коэффициент ударной ионизации  $\alpha = \text{const}$ , допускаем что число электронов равно:

$$n = e^{\alpha \cdot x} \quad (1.9)$$

Выражение (1.7) предоставляет значение числа электронов без учёта прилипания к нейтральным атомам или молекулам. В данном случае необходимо учитывать коэффициент прилипания  $\eta$ . С учётом данного коэффициента количество электронов, участвующих в лавине, принимает следующий вид:

$$n = e^{(\alpha - \eta) \cdot x} \quad (1.10)$$

Процесс лавинного образования электронов имеет стохастическую составляющую. После прекращения лавинообразного процесса, данное действие может повториться или затухнуть. Повторное лавинообразование возможно, если имеется вторичный эффективный электрон, способный к ударной ионизации. Существует два механизма появления данного процесса:

– несамостоятельный – электрон получен из-за внешнего воздействия, например, из ионизатора;

– самостоятельный – электрон появился вследствие предыдущего лавинообразного образования электронов.

Самостоятельная форма разряда позволяет лавинному процессу восстановиться и начаться заново. Далее приведены условия возобновления:

- наличие движущихся положительных ионов;
- атомы и молекулы начинают испускать фотоны, которые могут приводить к фотоионизации и к фотоэмиссии электронов.

Количество положительно заряженных ионов равняется количеству электронов (при условии, что лавина окончилась):

$$n_{\text{И}}^+ = e^{(\alpha-\eta) \cdot S} - 1 \quad (1.11)$$

Следует учитывать, что не все образовавшиеся во время первой лавины электроны могут участвовать в образовании вторичных лавин. Необходимо учитывать, что часть электронов рекомбинирует с положительными ионами. Для оценки суммарного количества электронов необходимо учитывать коэффициент вторичной ионизации  $\gamma$ . Тогда количество образовавшихся электронов с учётом коэффициента будет равняться:

$$\gamma \cdot (e^{(\alpha-\eta) \cdot S} - 1) \geq 1 \quad (1.12)$$

Уравнение (1.6) является условием для возникновения самостоятельных разрядов в газовом включении. Следовательно, в процессе лавины наблюдается резкое увеличение электронов и положительно заряженных ионов.

С увеличением числа электронов, которые находятся ближе всего к аноду, возрастает напряжённость в начале лавины, то есть на фронте. В центральной области лавины напряжённость понижена. Электроны, близкие к аноду, могут рекомбинировать с ионами, образуя вторичные лавины. Вторичные лавины, двигаясь вдоль вектора напряжённости электрического поля и имея отрицательный заряд в определённых областях начинают входить в область положительного объемного заряда. Электроны, движущиеся во вторичной лавине и положительно заряженные ионы, оставшиеся с первичной лавины, начинают образовывать стример – область, которая имеет наибольшую плотность тока и приобретает определённые химические и физические свойства.

На рисунке 1.5 представлен процесс образования стримера.

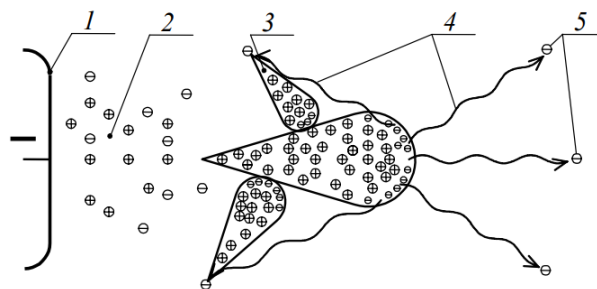


Рис. 1.5. Механизм возникновения стримера вследствие наличия вторичного лавинообразования: 1 – электрод (катод); 2 – канал стримера; 3 – лавины; 4 – движение фотонов; 5 – электроны за счет фотоионизации [2]

Для перехода к стримерному разряду из лавинного есть определённые условия: критическое значение числа электронов и длина прохода лавины. Количество электронов, необходимое для перехода  $n_{кр} \approx 10^7 - 10^9$ . Следовательно, чтобы лавина перешла в стример, необходимо чтобы лавина прошла некоторое расстояние  $x_{кр}$  и только электронов превысило значение  $n_{кр}$ .

Единичные возникновения частичных разрядов не приводят к пробое изоляции. Однако, они приводят к локальному повреждению высоковольтного изолятора, то есть, к увеличению дефектной области. Данные разряды впоследствии приводят к пробое изоляционного оборудования.

Фиксация частичного разряда говорит о возможном появлении пробоя в будущем при тех же условиях эксплуатации. Сам по себе частичный разряд представляется в виде возникающего и быстроразвивающегося плазменного канала, находящегося в газовом включении между двумя электродами. Присутствие частичного разряда сопровождается высокой интенсивностью заряженных частиц – электронов, положительно заряженных ионов.

Частичный разряд может иметь стримерный характер, который распространяется вдоль газового включения с огромной скоростью:  $10^5 - 10^8$  м/с, что превышает скорость распространения электронов в свободном пространстве. Так как скорость распространения стримера имеет широкий диапазон, это приводит к расширению площади потока, приводящему к увеличению значения



заряда, которое создаёт электрическое поле в месте дефекта. Распространение стримера сопровождается излучением импульсов электромагнитных волн, с частотой, равной порядка  $10^7$ - $10^{11}$  Гц. Заряд, возникающий в свободном пространстве полости, можно интерпретировать как преобразование зарядового стримера в частичный разряд. Наличие частичного разряда всегда говорит о неоднородности электрического поля. Таким образом, по частичным разрядам можно судить о наличии дефекта области изолятора [3].

Стримерная составляющая частичных разрядов объясняет появление импульсов акустических колебаний при возникновении частичного разряда. Возникновение колебаний происходит за счёт резкого возрастания площади канала стримера в разрядном промежутке, при котором давление на границах стримера увеличивается с сопровождением резких ударных волн. В данном случае для регистрации частичных разрядов удобно использовать датчик на основе пьезоэлектрика, так как ударная волна будет улавливаться датчиком и преобразовываться в электрический сигнал.

Рассмотрим процесс образования частичного разряда в высоковольтной изоляции с учётом особенности климатических факторов. В условиях эксплуатации, поверхность изолятора чаще всего будет загрязнённой. Сухие загрязнения (пыль, песок) сильно не повлияют на уменьшение пробойного напряжения. Однако, при увлажнении загрязнённой поверхности (например, с помощью дождя, снега тумана и т.д.) уменьшается сопротивление проводящего слоя. В данном случае происходит снижение пробойного напряжения [17].

Под действием напряжения, приложенного к высоковольтному изолятору, по слою загрязнения начинает проходить ток утечки, который повышает температуру поверхности изолятора. Так как загрязнения и влажность неравномерно распределены по поверхности изолятора, следовательно, ток тоже будет неравномерен. Участки с наибольшей плотностью тока будут нагреваться сильнее, происходит испарение влаги и появление высокоомных участков. Меняется распределение напряжения на изоляторе, появляется разряд. Ток утечки будет продолжать расти, увеличивая количество высокоомных областей.

В доказательство, приведем результат исследования в работе [18], где сравнивалась амплитуда ЧР при изменении влажности (рис.1.6), при сильном внешнем загрязнении высоковольтных вводов амплитуда поверхностных ЧР имеет прямую зависимость с влажностью окружающего воздуха.

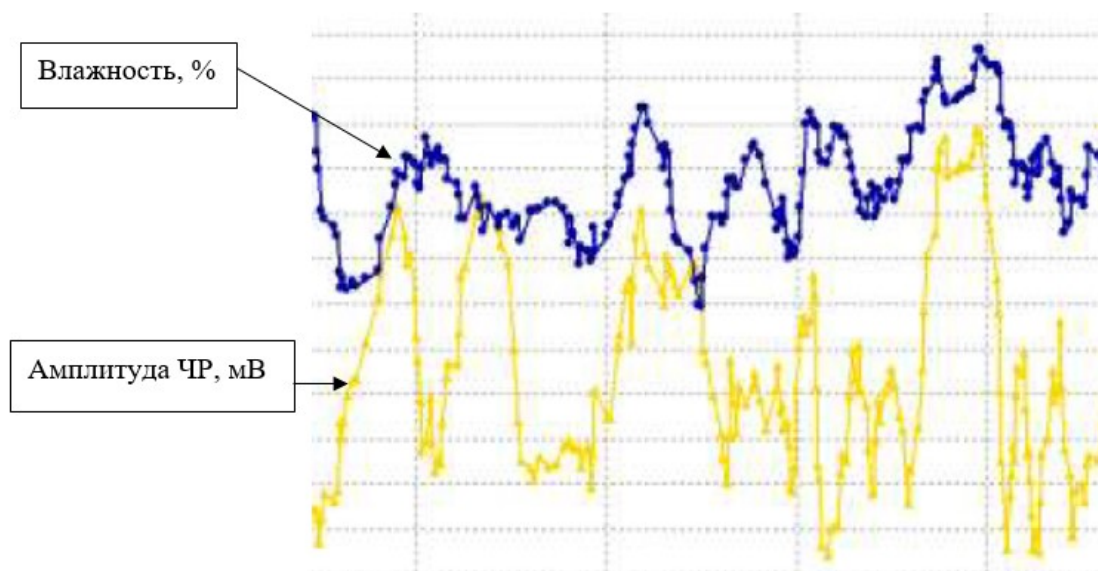


Рис.1.6. Изменение амплитуд ЧР на загрязненных изоляторах при изменении влажности. По оси x отложено время (1 деление -15 суток), по оси y отложено две шкалы – амплитуда ЧР (1 деление 5 мВ) и влажность (1 деление 5%) [18]

В работе [19] по току утечки диагностировались загрязненные изоляторы в трех состояниях: сухой, смоченный водой, загрязненный соляным раствором.

Токи утечки (рис.1.7) после опрыскивания поверхности соляным раствором возрастают примерно на два порядка по сравнению с сухой поверхностью или смоченной обычной водой, что вызвано появлением в результирующем токе значительной активной составляющей.

Исходя из проведенного анализа следует, что диагностику изоляции необходимо проводить при высокой влажности, это чаще всего неблагоприятные периоды для контроля изоляции переносным прибором: дождь, туман или время выпадения росы (раннее утро). Обход сотрудниками ЛЭП чаще производится в сухую погоду, что не дает достоверной картины состояния изоляции. «Онлайн» мониторинг с установкой датчиков на ЛЭП позволит решить данную проблему.

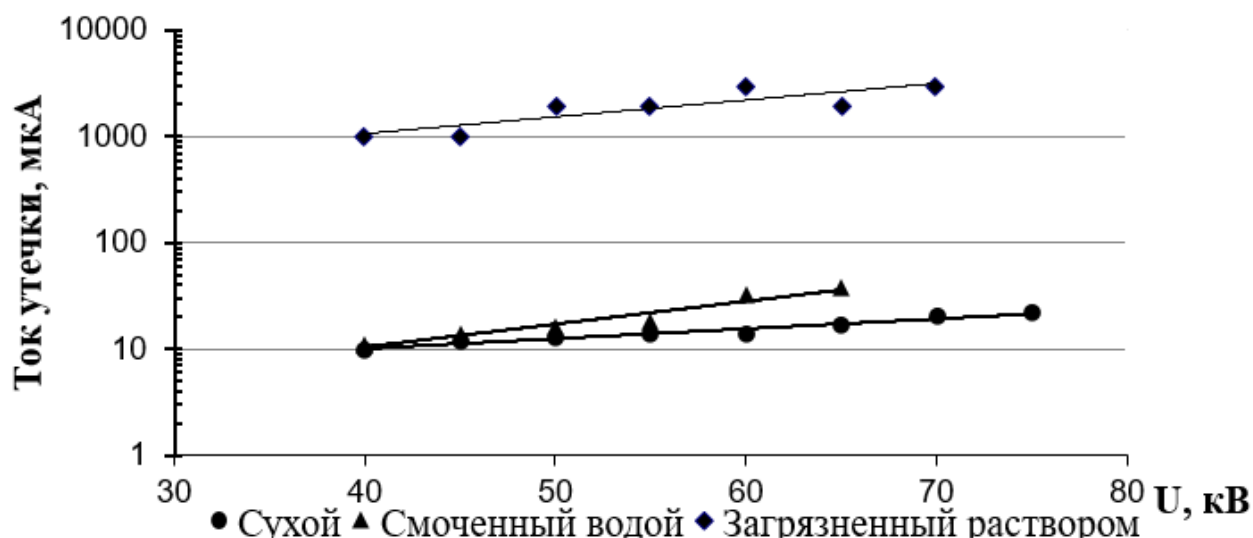


Рис.1.7. Зависимость тока утечки от влажности. По оси x отложено сетевое напряжение, кВ; по оси y – ток утечки в логарифмическом масштабе, мкА [19]

### 1.1.2. Статистика аварийных ситуаций на ЛЭП

В обзоре аварийности и травматизма в электроэнергетических системах государств-участников СНГ за 2020 год было установлено, что наиболее повреждаемым оборудованием подстанций и элементов ЛЭП являются [20]:

- изоляторы ВЛ - 17,3 % от общего количества аварий на ЛЭП;
- провода и грозозащитные троса - 11,1 % от общего количества аварий на ЛЭП;
- выключатели - 16,7 % от общего количества аварий на оборудовании подстанций;
- разъединители - 12,5 % от общего количества аварий на оборудовании подстанций.

Доли сегментов в объеме рынка изоляторов электрических в России в 2020 г., % от стоимостного объема рынка составил: стеклянные – 42,1%; полимерные – 29,0%; керамические – 29,0% [11].

Обобщенные данные о повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи были представлены в работе сотрудников «НТЦ ФСК ЕЭС» [21] (рис. 1.8).

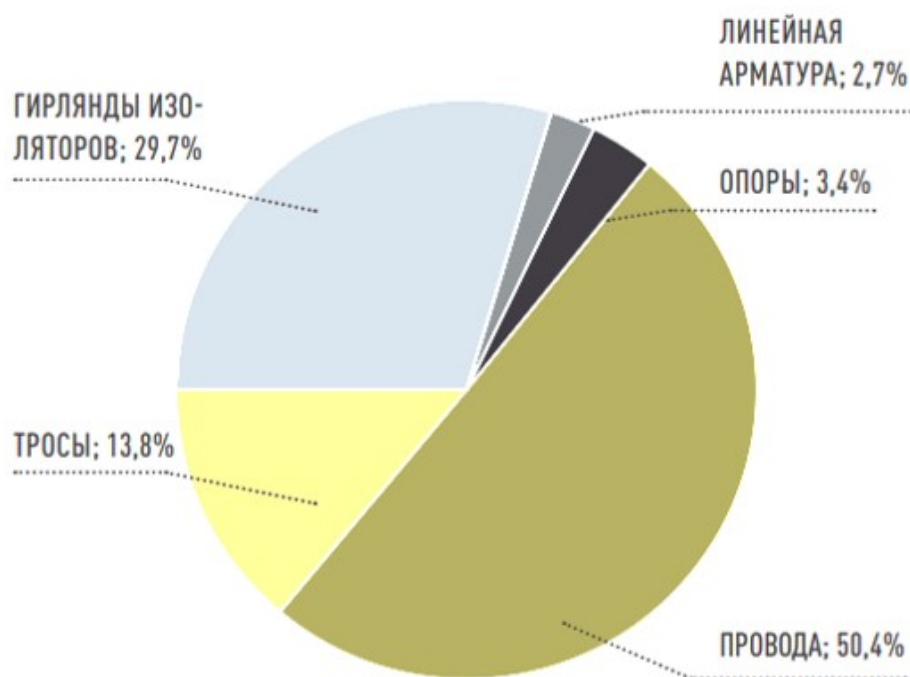


Рис.1.8. Данные о повреждаемости элементов ВЛ [21]

Ими также были установлены следующие основные причины повреждения гирлянд изоляторов:

- атмосферные перенапряжения – 29,3%;
- вандализм – 17,5%;
- дефекты изготовления и монтажа изоляторов – 17,3%;
- старение изоляторов – 7,9%;
- загрязнение изоляции, в том числе птицами – 8,3%;
- посторонние воздействия и недостатки эксплуатации – 7,3%.

Повреждаемость различных типов гирлянд изоляторов представлена на рис. 1.9, где: 1 – старение; 2 – механические разрушения; 3 – вандализм; 4 – дефекты изготовления и монтажа; 5 – атмосферные перенапряжения; 6 – стихийные явления; 7 – загрязнения, птицы; 8 – пляска проводов; 9 – дефекты эксплуатации, посторонние воздействия.

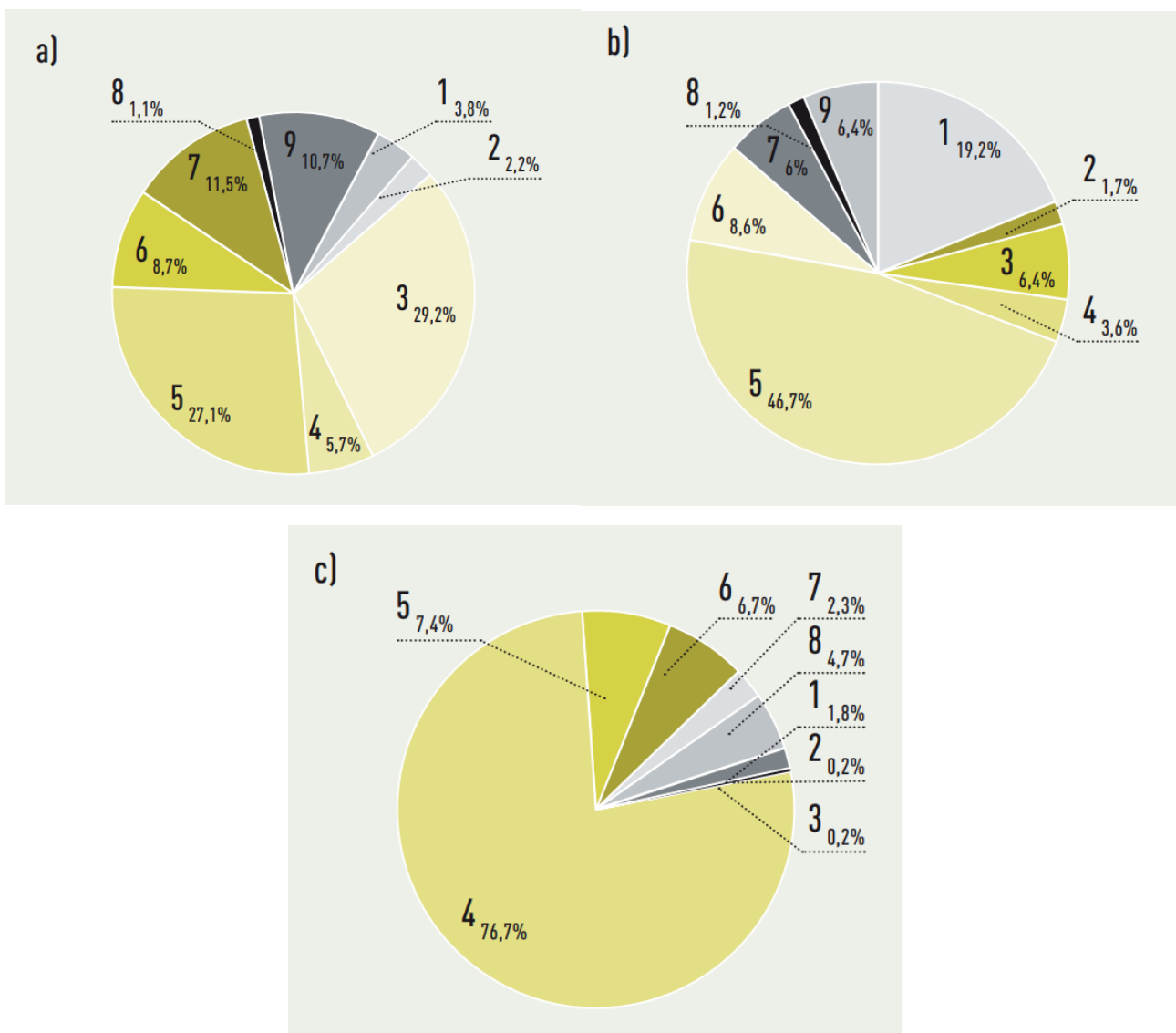


Рис. 1.9. Повреждаемость гирлянд изоляторов: стеклянных (а), фарфоровых (б) и полимерных (с) [21]

Для стеклянных изоляторов выделены причины повреждаемости:

- вандализм 29,2%;
- атмосферные перенапряжения 27,1%;
- загрязнения 11,5%;
- дефекты эксплуатации, посторонние воздействия 10,7%;
- стихийные явления 8,7%;
- дефекты изготовления и монтажа 5,7%;
- старение 3,8%;
- механические разрушения 2,2%;

- пляска проводов 1,1%.

Чаще всего повреждались стеклянные изоляторы типа ПС-70, ПС, ПС-70 Д, ПС-6 А и СБ, а также фарфоровые изоляторы типа ПФ-6, П-6, ПМ-4,5. Повреждения гирлянд изоляторов при атмосферных перенапряжениях вследствие грозových разрядов обычно усугубляются воздействием интенсивного дождя и шквалистого ветра, увеличивающего динамическую нагрузку на элементы ВЛ. При перекрытиях изоляции происходит разрушение шапок стеклянных и фарфоровых изоляторов, повреждение изолирующих элементов (тарелок), нарушение изолирующих покрытий и соединений металлических и изоляционных элементов линейных полимерных изоляторов. Во многих случаях были зафиксированы расцепления гирлянд при перекрытиях и повторных включениях ВЛ.

После 30 лет эксплуатации ВЛ для поддержания их в рабочем состоянии необходимо проводить постоянное обследование линий и ремонтные работы на них [21].

## **1.2. Классификация методов обнаружения ЧР**

Появление ЧР сопровождается следующими физическими явлениями: электромагнитное излучение; световое излучение; тепловое излучение; акустическое излучение; разложение диэлектрика на молекулярные группы; ударные волны; протекание импульсного тока в искусственно создаваемых цепях, где имеются объекты с ЧР [3, 22-25]. На основе этих физических явлений учеными различных стран созданы методы обнаружения ЧР: электромагнитный метод [23, 26-31], ультрафиолетовый, оптический [32], тепловизионный [33], акустический [34, 35], химический метод, электрический метод [5].

### 1.2.1. Электрический метод

Электрический метод заключается в измерении характеристик кажущихся зарядов частичных разрядов с помощью измерительных приборов, подключаемые к входным или выходным шинам оборудования или шинам его заземления через конденсатор связи. Параметры измерительных приборов, калибровка и градуировка измерительных систем, испытания объектов, схемы подключения, требования к точности и чувствительности измерений описаны в ГОСТ55191-2012 [5]. Электрический метод дает возможность получить комплекс характеристик, позволяющих всесторонне оценить свойства ЧР с определением их количественных значений. Высокая чувствительность и точность метода дает возможность верифицировать нетрадиционные разработанные методы на его основе.

На сегодняшний день электрические датчики обычно используют при диагностике ЧР в трансформаторах, например, прибор СКИ-2, разработанный в НПО «Электрум», Санкт-Петербург [36]. Измеритель СКИ-2 представляет собой компьютерную систему сбора и обработки информации, поступающей от датчиков частичных разрядов, подключенных к контролируемому объекту. Измеритель работает в реальном времени и обеспечивает оперативный вывод получаемой информации на экран компьютера, накопление информации и запись ее на жесткие диски. Измеритель содержит от одной до трех групп измерительных каналов. Каждая группа может обслуживать до 12 датчиков, до восьми каналов синхросигналов и управлять внешними устройствами. Но у данного метода имеется недостаток, конденсатор связи имеет большие габариты и вес и практически не может использоваться при испытаниях на ЛЭП. Поэтому электрические датчики обычно подключаются к ПИНам или измерительным выводам высоковольтных вводов (емкость которых используется как конденсатор связи) или к высокочастотным трансформаторам тока, надетым на провода заземления элементов высоковольтного оборудования имеющих емкостную связь с высоковольтной шиной.

### 1.2.2. Электромагнитный метод

Короткое время нарастания импульсных токов ЧР ( $<1$  нс) возбуждает электромагнитные волны в диапазоне от ВЧ до УВЧ (от 3 МГц до 3 ГГц). Скорость распространения результирующих УВЧ-волн зависит от диэлектрической проницаемости вещества ( $\epsilon$ ), где распространяется волна. Например, в масле скорость примерно равна  $2/3 \times c$  или  $2 \times 10^8$  м/с ( $c$  – скорость света в вакууме) [14]. Этот метод обеспечивает дистанционные измерения без подключения к объекту, в отличие от электрического.

Электромагнитные датчики регистрируют электромагнитные сигналы ЧР с помощью антенны. Ранее ученые использовали сравнительно низкочастотный диапазон волн (до нескольких десятков мегагерц), который практически не позволял применять их в полевых условиях из-за высокого уровня электромагнитных помех, и невозможности создания малогабаритных узконаправленных антенн.

В настоящее время метод регистрации электромагнитного излучения на ультравысоких частотах начинает применяться для обнаружения ЧР в энергетическом оборудовании [37-42, А7]. Метод, а также диапазон ультравысоких частот предлагается в международном стандарте IEC TS 62478 [14], а также в стандарте организации ПАО «ФСК ЕЭС» [43].

Обычно используемые датчики в диапазоне частот ВЧ и УВЧ основаны на емкостном, индуктивном и электромагнитном принципе обнаружения. Некоторые примеры датчиков, преимущественно используемых в диапазонах частот от ВЧ до ОВЧ: конденсаторы; трансформаторы тока; катушки Роговского; направленные электромагнитные ответвители; пленочные электроды; ответвители осевого поля; датчики переходного напряжения на земле (ТЭВ); резистивные ответвители.

Одним из лидеров на отечественном рынке по производству приборов контроля ЧР в высоковольтной изоляции является компания «Димрус». В перечне выпускаемых продукции имеется несколько вариантов для диагностики ЧР в изоляции. С применением электромагнитного метода имеется два варианта



устройств: «DIM-Loc» (переносной прибор) [44] и «PD-Мар» (стационарный непрерывный мониторинг подстанций) [45] (рис.1.10).

Основу системы PD-Мар составляют 4 СВЧ антенны, которые устанавливаются на конструктивных элементах подстанции квадратом со стороной не менее 5 метров.

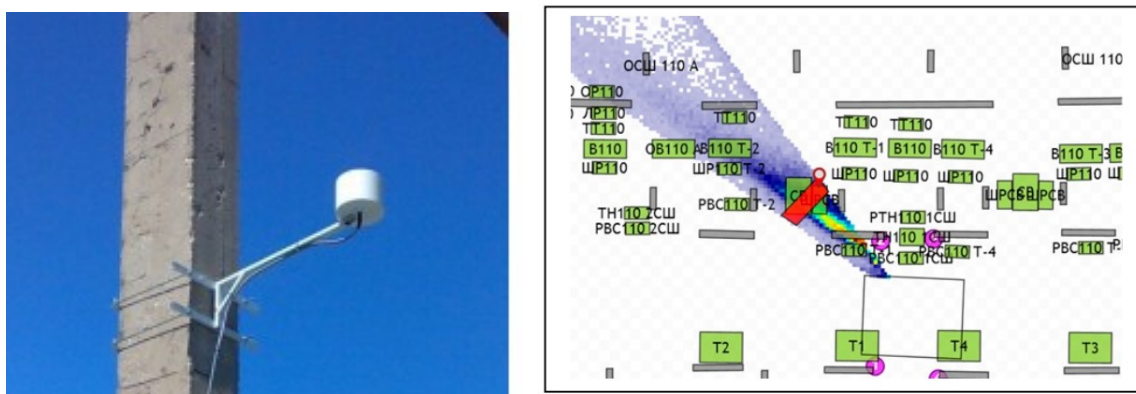


Рис. 1.10. Датчик системы PD-Мар и ее распределение ЧР на подстанции [45]

Таблица 1.1. Чувствительность системы [45]

Расстояние до дефекта, м	Величина импульса ЧР, пК
5	80
10	130
20	200
50	600
100	900
250	3000

Локализация источников ЧР производится с помощью определения разницы во времени прихода каждого сигнала ЧР до антенн. В связи с этим, измеряемое оборудование нуждается в синхронизации времени на уровне наносекунд высокочастотных датчиков и системы обработки, что приводит к высокой стоимости оборудования и сложной обработке данных.

Другая система непрерывного контроля высоковольтных изоляторов уже на линиях электропередач, разработана в ФГБОУ ВО КГЭУ под руководством Зарипова Д.К. [46]. Система состоит из датчиков, концентратора и программы отображения данных на смартфоне (рис. 1.18-1.19).

Датчик состоит электрода, выпрямителя, узла формирования импульсов, микроконтроллера, беспроводного передатчика и узла питания (рис. 1.11).

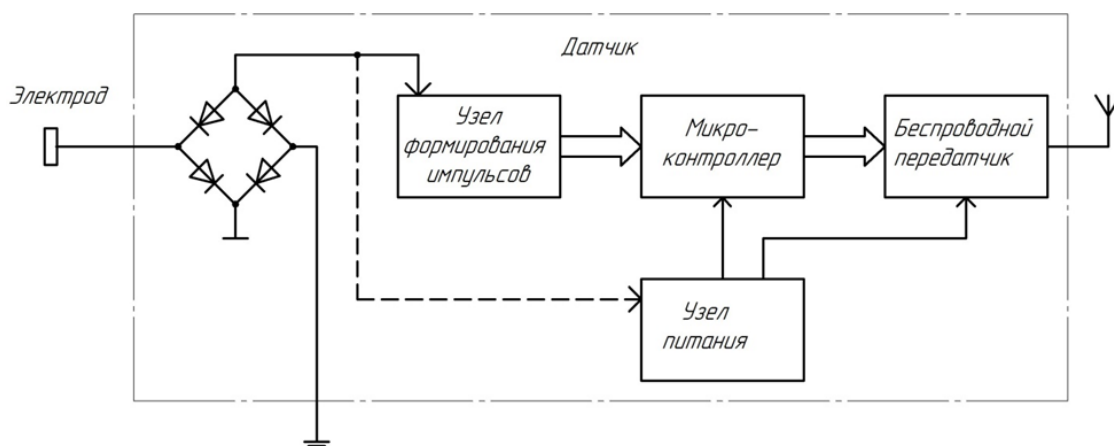


Рис. 1.11. Функциональная схема датчика [46]

Система позволяет фиксировать перекрытия изолирующей конструкции, но не контролирует развитие дефектов.

Рассматривая различные приборы, можно составить таблицу, с выбором частот, на которых измеряют ЭМ излучения для регистрации ЧР.

Таблица 1.2. Некоторые популярные в России фирмы, производители диагностического оборудования и частоты, на которые работают их устройства [12].

Частота	Производители диагностического оборудования и их приборы			
	DIAKS	DIMRUS	EMA	Дизкон
100 кГц		Ultra Test		СКИТ
1 МГц	PDPA (фирма DIAKS)	AR700, AR200		
10 МГц		R2200 R400 TDM TIM-3.9	Корона	
100 МГц				
1 ГГц		UHF-recorder UHF-tester M2010		
Свыше 1 ГГц		PD Map		

Электромагнитный метод по обнаружению ЧР характеризуется высокой стабильностью и возможностью выбора полосы частот измерений. Кроме того, электромагнитные датчики имеют невысокую стоимость, что позволит создать распределенную систему диагностики для всей воздушной линии электропередач. На сегодняшний день имеются системы со сложными системами обработки данных с ЭМ датчиков, из-за чего вся система значительно повышается в цене, что нерентабельно для ЛЭП. Поэтому задача разработки упрощенной системы обработки является актуальной на сегодняшний день.

### 1.2.3. Акустический метод

Обнаружение акустического излучения от ЧР основано на том факте, что ЧР является точечным источником акустических волн. Эти акустические волны распространяются по внутренней структуре высоковольтного оборудования до тех пор, пока не достигнут внешней поверхности. Появляются различные типы волн с различными скоростями распространения, а также отражения и преломления на границах, приводящие к эффектам затухания, поглощения и рассеяния. Как правило, акустические волны регистрируются, преобразуются в электрические сигналы, и регистрируется чаще всего с помощью пьезоэлектрических датчиков, датчиков звукового резонанса, акселерометров, конденсаторных микрофонов или оптоакустических датчиков.

Для обнаружения ЧР обычно используется диапазон ультразвуковых частот (приблизительно от 20 кГц до 250 кГц), а также диапазон слышимости (приблизительно от 100 Гц до 20 кГц). Частотные диапазоны, используемые для акустического обнаружения, выбираются в зависимости от системы изоляции, к которой применяется метод (твердая, жидкая и газообразная).

Рассмотрим, для примера, ультразвуковой детектор Distran Ultra Pro [47] (Швейцария). Ultra Pro использует 124 встроенных датчика для визуализации местонахождения ультразвука, излучаемого источником ультразвука (например, ЧР). Местоположение источника звука отображается в режиме реального времени.

Аналогичная камера имеется, например, SonaVu [48] и NL Камера [49]. Причем NL Камера отличается возможностью распределения сигналов ЧР по фазе сетевого напряжения (рис. 1.12).

Акустический датчик частичных разрядов марки «AR-Sensor» [50] (компания Димрус) предназначен для проведения оперативных измерений, используется с переносными приборами для поиска дефектов в изоляции. Датчик основан на пьезокристалле и дополнительной электронной плате. Датчик «AR-Sensor» может применяться в стационарных системах мониторинга и диагностики для проведения дистанционного контроля наличия частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Датчик работает на частоте 40 кГц.

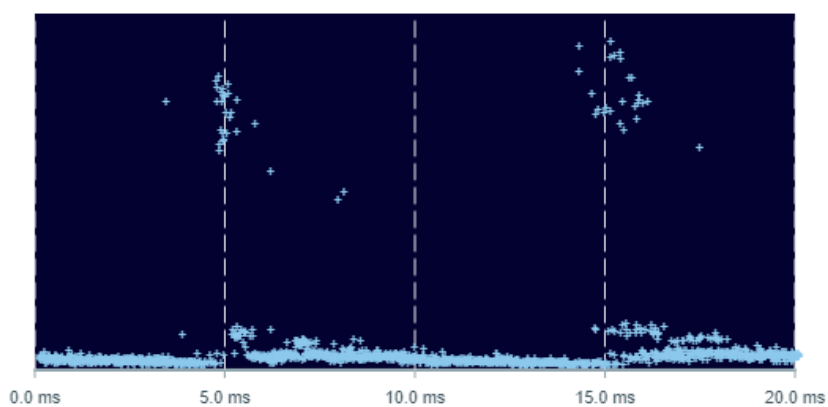
По принципу своей работы акустические датчики для измерения частичных разрядов бывают двух типов – нерезонансные и резонансные. Разница между этими датчиками определена в их названии:

- нерезонансные акустические датчики позволяют регистрировать сигналы на частотах, превышающих частоту собственного (механического) резонанса пьезокристалла, являющегося частью общей конструкции датчика. Для надежной регистрации импульсов частичных разрядов частота собственного резонанса датчика должна быть не больше 15 – 20 кГц, тогда при помощи этого датчика можно регистрировать импульсы с частотой от 30 кГц и выше. Чтобы полностью исключить влияние резонансных колебаний пьезокристалла на выходе датчика, внутрь его обязательно встраивается электронный фильтр, подавляющий колебания на резонансной частоте, и все более низкие частоты. Выходной сигнал зарезонансного датчика обычно имеет ту же частоту, что и регистрируемые колебания конструкции оборудования.

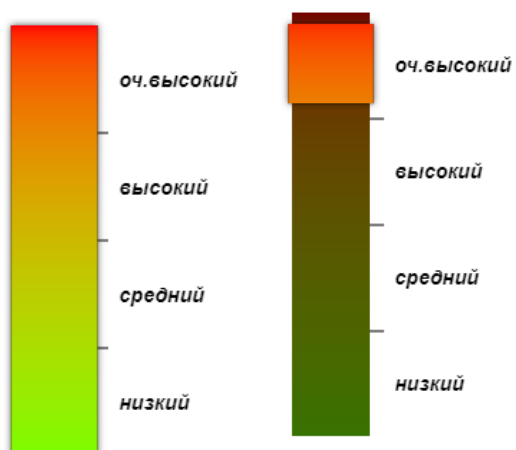
- резонансные акустические датчики для регистрации импульсов частичных разрядов работают на частоте собственного установочного резонанса пьезокристалла, оптимальное значение которого для таких датчиков обычно составляет 40 кГц. Вне зависимости от частоты регистрируемого акустического сигнала выходной сигнал резонансного датчика всегда имеет эту частоту 40 кГц,



а



б



в

Рис. 1.12. Данные, полученные автором с акустического прибора NL Камера:  
 а) наложение полученных данных на видеоизображение; б) амплитудно-фазовое  
 распределение, в) уровни опасности дефекта

то есть пьезокристалл импульсно возбуждается от внешнего акустического воздействия и регистрирует на собственной частоте.

У акустических систем есть свои недостатки. Так, дальность действия акустических приборов ограничена в силу недостаточной пространственной разрешающей способности, низкой помехозащищенности и чувствительности. Методы определения местоположения точны только при наличии одного источника разряда и имеют очень большие погрешности при наличии двух или более источников разряда в различных местоположениях ЧР.

Имеются также приборы, объединяющие в себе электромагнитный и акустические методы, например, в работах Куценко С.М. [51, 52], Голенищева-Кутузова А.В. [53].

#### 1.2.4. Оптические методы

Наибольшая чувствительность и помехозащищенность обеспечивается в ультрафиолетовом диапазоне. Диагностирование изоляторов по ультрафиолетовому (УФ) излучению основано на выявлении поверхностных частичных разрядов и короны, возникающих на изоляторах в месте появления дефекта. Для этого используется зависимость силы света ПЧР в УФ диапазоне спектра от приложенного напряжения [33, 54].

Ультрафиолетовая камера (дефектоскоп). Один из вариантов ультрафиолетовой камеры разработан фирмой CoroCAM. Характеристики представлены в таблице 1.3. Дефектоскоп позволяет получить выходные видеосигналы высокого разрешения нескольких стандартов.

При мониторинге изоляции используют тепловизионный измерительный прибор. Принцип его работы основан том, что все физические тела нагреты неравномерно, вследствие чего складывается картина распределения ИК-излучения.

Оптические методы имеют свои преимущества, но и недостатки. Например, ультрафиолетовые методы являются дорогостоящими, так как одна лишь

ультрафиолетовая камера стоит порядка 100 000 евро и создание системы для непрерывной диагностики высоковольтных изоляторов на их основе, устанавливаемых на каждом пролете ЛЭП, экономически нецелесообразно.

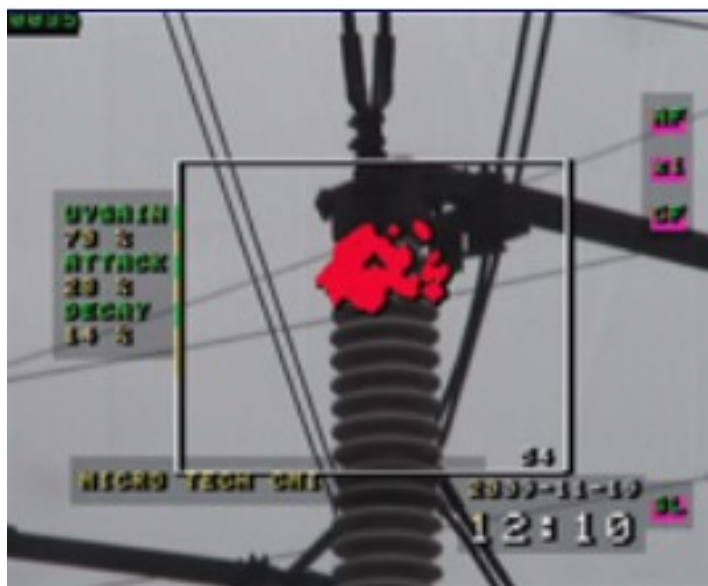


Рис. 1.13. Изображение дефекта опорно-стержневого изолятора, полученное с ультрафиолетовой камеры [54]

Таблица 1.3. Основные технические характеристики тепловизионной камеры [54]

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измеряемых температур, °С	от – 40 до +1000
Чувствительность (при +30 °С), °С	0,1
Точность измерения температуры, %	±2
Спектральный диапазон, мкм	8 – 14

При контроле, основанном на измерении температур (тепловизором), серьезные трудности возникают в связи с тем, что перепад температур между исправными и дефектными изоляторами, а также между изоляторами и окружающим воздухом типично составляет десятые доли градуса, что близко к пределу чувствительности тепловизоров. Существуют и практические трудности проведения инфракрасной диагностики многоэлементной изоляции, связанные с

экранировкой «нагретых» металлических частей «холодными» тарелками, бликами от солнца и другими сторонними источниками инфракрасного излучения.

Создание системы из акустических и электромагнитных датчиков экономически выгодно, по сравнению с оптическими методами. Кроме того, оба метода предлагаются при бесконтактной диагностике международным стандартом ИЕС 62478:2016 [14].

### **1.3. Возникновение разрядов при поверхностных дефектах и загрязнениях стеклянных изоляторов**

В данной диссертации рассматривается мониторинг только стеклянных высоковольтных изоляторов ПС70Е, как один из этапов разработки данного направления. Выбор стеклянных изоляторов обоснован тем, что они занимают первое место по объему рынка изоляторов в России – 42,1% [11]. Например, на территории Вятскополянского участка ЛЭП УВС филиала ПАО «Россети Центр и Приволжье»-«Кировэнерго» стеклянные изоляторы установлены на воздушных линиях различных уровней, например: на линиях 110кВ «Вятские Поляны - МСЗ 1», «Вятские Поляны - МСЗ 2» и Лазарево (типы стеклянных изоляторов – ПС6А и ПС70Е); на ВЛЭП 220 кВ Кутлу Букаш – Центральная (ПС120 и ПСВ 160А); на ВЛЭП 35 кВ «Лебяжье – Байса» (тип – ПС70Е).

Дефекты можно разделить на внутренние и поверхностные. В ГОСТ [55] перечислены следующие виды дефектов:

- открытые пузыри: углубления на поверхности от выходящих газовых включений;

- инородные включения: кристаллы различных соединений, вкрапленные в стекло и представляющие собой огнеупорные включения, продукты кристаллизации стекломассы и посторонние загрязнения;

- неразрушающие инородные включения: непрозрачные частицы, имеющие близкий к стеклу коэффициент термического расширения и не вызывающие разрушения изоляторов при термических испытаниях;



- посечка: трещина, которая проходит не через всю толщину изделия;
- кованость: неровная шероховатая поверхность локального характера;
- складка: нарушение поверхности в виде ярко выраженных волнистых линейных углублений;
- окалина: включения нерастворившихся в стекле металлов и их окислов;
- заусенцы: выступы стекла в местах соединения формирующего кольца с пресс-формой, полуформ и поддона с полуформами;
- формовочная рифленость: нарушение поверхности в виде волнистых линейных углублений;
- следы от отреза ножниц: рубец, образовавшийся при отрезе капли стекломассы;
- сколы: местные механические разрушения элементов изоляционных деталей;
- нарушение резьбы: сколы, вмятины и неровности поверхности витков резьбы, превышающие допустимые геометрические размеры;
- недопрессовка: впадины на поверхности, образующиеся от недостатка стекломассы;
- свиля: стекловидные включения в стекло;
- пузырь: газовые включения шарообразной или неправильной формы с диаметром или наибольшим линейным размером, равным или превышающим 0,8 мм;
- следы от сетки: отпечатки на нижней выступающей поверхности изоляционной детали от сетки печи выравнивания;
- мошка: газовые включения (закрытые полости).

В диссертации рассматриваются поверхностные частичные разряды (ПЧР), как одно из направлений исследований. В соответствии с методическими указаниями ФСК ЕЭС ФСК [12] отсутствие ПЧР на внешней изоляции является необходимым, а иногда и достаточным признаком нормальной работы.

Если изоляторы успешно прошли приемо-сдаточные испытания, то обнаруженные дефекты изоляции не приводят к полному пробое изоляции в

нормальных рабочих условиях, но в дальнейшем они развиваются и растут. Это связано с образованием небольших электрических разрядов в зоне повышенной напряженности поля вблизи дефекта – частичными разрядами.

Уменьшение напряжения перекрытия изолятора при наличии микрозазора между диэлектриком и электродом или микротрещин на поверхности диэлектрика связано с увеличением в них напряженности поля вследствие различия диэлектрических проницаемостей воздуха и твердого диэлектрика (диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика в 2...10 раз больше, чем воздуха). Увеличение напряженности поля в микрозазорах приводит к ионизации и усилению поля в основном промежутке и уменьшению напряжения перекрытия.

Таким образом, появление частичных разрядов свидетельствует о наличии дефекта изоляции, причем ЧР достигают обнаружимого уровня уже на самой ранней стадии развития дефекта.

Загрязнения также являются причиной появления ПЧР, но, в основном при увлажнении поверхности. Сухие загрязнения, имеют высокое сопротивление и не влияют на распределение напряжения по поверхности изолятора, не снижают заметно его разрядного напряжения. Увлажнение слоя загрязнения приводит к уменьшению его сопротивления, и, в связи с тем, что слой загрязнения распределен по поверхности изолятора не равномерно и плотность тока утечки не одинакова на разных участках из-за сложной поверхности изолятора, то и нагревание слоя загрязнения происходит тоже по-разному. В местах, где плотность тока высокая, из-за испарения образуются подсушенные участки и почти все напряжение, воздействующее на изоляцию, оказывается приложенным к этим участкам. В результате чего образуются частичные разряды.

Отсюда следует, что даже при равномерном загрязнении и увлажнении изоляторов выделяемая мощность неравномерно распределена по поверхности: чем меньше диаметр, тем больше выделяемая мощность.

Вероятность перекрытия изолятора повышается с увеличением воздействующего напряжения, так как при этом возрастает ток утечки, что

благоприятствует удлинению частичных дуг до полного перекрытия изолятора [56]:

$$I_y = \frac{U_y}{R_y} \quad (1.13)$$

где  $R_y$  – сопротивление утечки по поверхности изолятора.

Разрядное напряжение изолятора будет возрастать с увеличением длины пути утечки и уменьшением диаметра изолятора [56]:

$$U = \frac{I_y(\rho L_y)}{\pi \Delta D} \quad (1.14)$$

где  $L_y$  – длина пути утечки,  $\Delta$  - толщина слоя загрязнения,  $\rho$  - удельное объемное сопротивление слоя загрязнения.

Броски тока разрядов могут в 20-30 раз превышать ток утечки, обусловленный поверхностным сопротивлением, что связано с частичной шунтировкой поверхностного слоя дугой. Существование частичных дуг на поверхности изолятора представляет опасность, так как вполне вероятно, что дальнейшее развитие процесса может привести к перекрытию всей поверхности.

## Выводы по главе 1

В первой главе рассмотрены: понятие термина ЧР и его характеристики, возникновение ЧР в высоковольтном оборудовании, влияние внешних факторов, таких как влажность на амплитуду ЧР. Из проведенного анализа следует, что диагностику изоляции необходимо проводить при высокой относительной влажности, а это, чаще всего, неблагоприятные периоды для контроля изоляции переносным прибором: дождь, туман или время выпадения росы (раннее утро). Плановый осмотр сотрудниками ЛЭП чаще производится в сухую погоду, что не дает достоверной картины состояния изоляции. Поэтому поставлена задача создать контроль диагностики ВИ.

Рассмотрены различные методы и приборы диагностики высоковольтной изоляции, включая электрический метод, основанный на ГОСТ Р 55191-2012, и другие нетрадиционные методы для достижения удовлетворительного уровня мониторинга. Нетрадиционные методы основаны на физических явлениях, сопровождающих ЧР, таких как электромагнитные волны, акустические волны (оба метода предлагаются в стандарте IEC TS 62478), тепловизионный, ультрафиолетовый, оптический.

Многие методы имеют существенные недостатки, например, акустический сильно подвержен влиянию помех, телевизионный и ультрафиолетовый являются дорогостоящими, и создание прибора для непрерывной диагностики изоляторов на ЛЭП на их основе экономически невыгодно. Электромагнитный метод по обнаружению ЧР характеризуется высокой стабильностью и возможностью выбора полосы частот измерений.

Разработка дистанционного метода «онлайн» мониторинга высоковольтных изоляторов, позволяющего выявлять загрязнения и поверхностные дефекты в изоляционном оборудовании и оценивать уровень его технического состояния, является актуальной задачей на сегодняшний день. Отсутствие поверхностных частичных разрядов 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.

## **2. АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЙ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ СТЕКЛЯННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ**

*(Материалы главы опубликованы в работах автора:*

*A1-A3, A5-A7, A10, A11, A12, A14-A16)*

### **2.1. Анализ известных теоретических и экспериментальных исследований**

#### **2.1.1. Патентный поиск**

Целью патентного поиска является поиск в отечественных и зарубежных базах данных в области использования приборов, методов диагностики высоковольтных изоляторов на основе электромагнитного метода.

Задача патентных исследований: исследование уровня техники и тенденций развития приборов, методов диагностики высоковольтных изоляторов.

Объектом исследования являются приборы и методы непрерывной диагностики высоковольтных изоляторов, находящихся в процессе эксплуатации.

Патентный поиск проводился по информационно-поисковой системе «ФГБУ ФИПС» [57] и «Google Patents» [58].

Систематический вид поиска проводился по следующим классам МПК, указанным в таблице 2.1. При выполнении поиска ограничивающим признаком являлось наличие в тексте охранного документа ключевых слов, перечисленных в таблице 2.2.

Эвристический отбор охранных документов производился исходя из цели патентного поиска по критериям, включая (но не ограничиваясь): функциональную принадлежность объекта патентного права, суть технического эффекта, метод достижения технического эффекта, материалы, использованные при достижении технического эффекта.

Отобранные патенты представлены списке литературы [46, 59-69].

Таблица 2.1 – Соответствие отобранного патентного документа рубрике МПК

№ п/п	Код рубрики	Состав рубрики
1	2	3
1.	G01R 31/00	Устройства для определения электрических свойств; устройства для определения местоположения электрических повреждений; устройства для электрических испытаний, характеризующихся объектом, подлежащим испытанию, не предусмотренным в других подклассах
2.	G01R 31/12	Тестирование диэлектрической прочности или напряжения пробы
3.	G01R 31/08	Локализация неисправностей в кабелях, линиях передач или сетях
4.	G01R 31/02	Бесконтактные испытания

Таблица 2.2. Ключевые слова-ограничения при информационном поиске

Ключевое слово	Общее число документов в базе ИПС ФГБУ ФИПС для принятой ретроспективности	Отобрано исходя из цели патентного поиска
1	2	3
Диагностика (мониторинг) изоляции (изоляторов)	255	7
Диагностика изоляции электромагнитным методом	38	3
Непрерывный мониторинг высоковольтных изоляторов	6	1
Непрерывный мониторинг изоляции	39	1
ИТОГО	375	43

Некоторые, наиболее близкие патенты к данной работе рассмотрим ниже.

Патент №2 679 759 «Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов». Изобретение, реализующие способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов [63], в которых осуществляется пассивный бесконтактный прием

электромагнитного излучения частичных разрядов в ультракоротковолновом диапазоне направленной антенной.

Предложенное изобретение определяет наличие опасного дефекта, его вида и места расположения. Осуществляются бесконтактный прием электромагнитным приемником импульсных сигналов частичных разрядов, их индикация и компьютерная обработка с целью определения в каждом из дискретных интервалов фазового напряжения средних значений количества и интенсивности импульсов частичного заряда, которые превышают допустимый порог для возникновения дефектов или их развития по сравнению с эталонным изолятором. Дополнительно определяют распределение числа частичных разрядов по интенсивности для положительного и отрицательного полупериодов высокого напряжения. О наличии и виде наиболее опасных дефектов судят по расширению фазовых интервалов излучения частичных разрядов и резкому увеличению количества частичных разрядов в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами.

Известно устройство, реализующее способ бесконтактного и дистанционного контроля электропрочности гирлянд изоляторов воздушных высоковольтных линий электропередачи [64], работа которого сводится к тому, что сначала сигналом устройства индикации, прошедшим через антенну метрового диапазона, первый усилитель, полосовой фильтр и детектор, определяют опору линии электропередачи, содержащую гирлянду, потерявшую прочность. Затем формируют приемопередатчиком СВЧ-излучение в диапазоне 3-30 ГГц и через антенну с узкой диаграммой направленности облучают последовательно гирлянды изоляторов, принимают отраженный сигнал, при этом о неисправной гирлянде судят (показания индикатора) по появляющейся взаимосвязи между характеристиками СВЧ-сигналов, отраженных от гирлянды, сигналов ВЧ-излучения метрового диапазона волн и сигналов высокого напряжения промышленной частоты (антенна, принимающая сигнал промышленной частоты) приложенного к гирляндам изоляторов.

Недостатком данных способов является то, что измерения необходимо проводить периодически, устанавливая блоки приема и обработки сигналов стационарно на земле на некотором расстоянии от изоляторов на земле. В случае протяженной воздушной линии электропередач (ВЛЭП), специалист должен пройти десятки километров для проверки всех объектов исследования. Кроме того, диагностика проводится только в сухую погоду, при низкой влажности и в отсутствие тумана, хотя известно, что относительная влажность прямо пропорционально влияет на амплитуду разрядных процессов и более того, разряды на загрязненном изоляторе в сухую погоду могут вовсе отсутствовать [70].

Известны устройства, реализующие способы бесконтактной диагностики высоковольтных изоляторов, использующих несколько методов диагностики. Рассмотрим эти устройства.

Устройство, реализующее способ синхронизации акустического и электромагнитного излучения от ЧР и фазного напряжения [65]. В данном устройстве при помощи электромагнитной и акустической антенн регистрируют электромагнитные и акустические сигналы излучения от частичных разрядов, синхронизированные с фазой высокого напряжения, накапливают их по узким фазовым интервалам в блоке памяти (персональном компьютере). После этого это фазовое распределение числа импульсов и интенсивности (заряда) сравнивают с ранее записанным распределением аналогичных сигналов для эталонного изолятора. Выделяют по определенной компьютерной программе сигналы, превышающие безопасный для нормального функционирования уровень, выявляют изоляторы с дефектами и определяют возможность их дальнейшего функционирования.

Устройство, реализующее способ синхронизации электромагнитного, инфракрасного излучения частичных разрядов с синхронизацией по фазе [67]. Сущность изобретения заключается в следующем: одновременно с пассивным приемом электромагнитным приемником электромагнитного излучения от частичных разрядов осуществляют пассивный прием инфракрасным приемником ИК излучений от частичных разрядов, индикацию и совместную компьютерную



обработку электромагнитных и ИК сигналов, синхронизацию электромагнитных и ИК сигналов с фазой высокого напряжения, накопление их по узким фазовым интервалам.

Устройство, реализующее способ бесконтактного дистанционного контроля технического состояния высоковольтных линейных изоляторов воздушных линий электропередач [68]. Сущность изобретения заключается в одновременной узконаправленной регистрации ИК и УКВ-излучений частичных разрядов, акустического излучения частичных разрядов, сигналы которых синхронизируются с фазой высокого напряжения промышленной сети. Дополнительно регистрируется фотовидеоизображение исследуемого линейного изолятора. Регистрация излучений частичных разрядов фазы высокого напряжения промышленной сети, фотовидеоизображений изолятора осуществляется датчиками регистрации, установленными на БПЛА. Периодические измерения излучений частичных разрядов для однотипных по классу напряжения изоляторов проводятся с одинакового расстояния. Регистрация излучений частичных разрядов проводится на таком расстоянии, что в апертуре датчиков регистрации сигналов частичных разрядов находится преимущественно поверхность исследуемого линейного изолятора. Информация, полученная датчиками регистрации излучений, датчиком фазы, а также информация с датчика расстояния и датчика фотовидеофиксации передаются по каналу радиосвязи на наземный мобильный блок управления и обработки данных, располагающийся на безопасном расстоянии от ВЛЭП.

Недостатками устройств, реализующих эти изобретения, является сложность процедуры синхронизации с нескольких физических каналов различных сигналов разной природы и с наложением на фазу высокого напряжения. В данных способах измерения проводятся периодически, с обходом специалистов (RU 2483315 C1, 27.05.2013), что при протяженных линиях занимает весьма длительное время, либо посредством летательных аппаратов (RU 2753811 C1 23.08.2021), что возможно только в сухую и безветренную погоду. Обходы и облеты проводятся в дневное время, возможно при низкой относительной влажности и в отсутствие тумана, хотя известно, что относительная влажность прямо пропорционально влияет на

амплитуду разрядных процессов и более того, разряды на загрязненном изоляторе в сухую погоду могут вовсе отсутствовать.

### 2.1.2. Анализ известных методов локализации источников ЧР

Точная локализация источника ЧР является важной задачей для мониторинга неисправностей изоляции высоковольтного оборудования, особенно, если речь идет о подстанциях. При работе с электромагнитным методом необходимо использовать минимум три электромагнитных датчика для локализации дефекта. Поэтому в этом пункте мы рассмотрим различные способы локализации, разработанные в мире.

Хотя в последние годы метод обнаружения ЧР получил широкую популярность, по-прежнему ученые разрабатывают новые методики обработки результатов, так как до сих пор имеется высокая частота ложных срабатываний, либо приборы имеют большую стоимость в связи с высокими вычислительными мощностями. За исключением конструктивных недостатков самого измерительного оборудования, еще одна основная причина вышеупомянутой проблемы кроется в методах анализа данных. Например, когда разработанный алгоритм не может устранить сложный шум, содержащийся в полученных данных, может быть вызвана ложная тревога. Следовательно, подходящий и эффективный метод анализа данных имеет существенное значение для повышения производительности системы обнаружения ЧР.

ЧР диагностируют в различных видах высоковольтного оборудования: в трансформаторах, вводах, высоковольтных изоляторах, кабелях, в оборудовании на подстанции и т.д. У каждой группы есть свои особенности, так, например, распространение электромагнитного излучения от ЧР в масле бака трансформатора имеет меньшую скорость, чем в воздухе, интерференцию от стен бака, что обязательно необходимо учитывать при анализе данных. Тем не менее, принципы работы различных методов локализации применимы к диагностике разнообразного высоковольтного оборудования. Да, в данной работе рассматриваются ВИ на

ВЛЭП, но при положительных результатах разработки метода и прибора, эту систему уже легко масштабировать и создать систему диагностики подстанции. Поэтому мы постараемся рассмотреть всевозможные имеющиеся в мире варианты локализации источников ЧР.

Акустическое и электромагнитное излучения подчиняются одним и тем же законам распространения. Поэтому методы, которые мы будем рассматривать ниже, основанные на измерении времени распространения сигналов, применимы к обоим методам. Разница будет только в скорости распространения сигналов.

Локализацию источников ЧР можно регистрировать двумя методами, известными при анализе работ других ученых, такими как:

- определение разницы во времени прибытия;
- сравнение импульсов по амплитуде.

Поскольку скорость распространения электромагнитных волн в среде постоянна, когда положения датчиков УВЧ относительно источника ЧР различны, время, в течение которого электромагнитная волна от ЧР достигает каждого датчика, также различно. Соответственно, местоположение ЧР можно определить по времени прибытия сигнала от источника до датчика (time of arrival (TOA)) [71, 72] и по разнице во времени прибытия (time difference of arrival (TDOA)) [73, 74] сигнала от источника до датчика.

Если известны координаты датчиков и разность во времени сигналов ЧР, поступающих на разные датчики, местоположение источника ЧР может быть получено путем решения уравнений соотношения расстояния и разницы во времени прибытия. Это основной принцип метода локализации на основе разницы во времени прибытия, который более интуитивно показан на рис. 2.1.

Как видно из этого рисунка, метод на основе разницы во времени прибытия состоит из двух основных этапов:

- а) оценка разницы во времени прибытия;
- б) решение нелинейных уравнений.

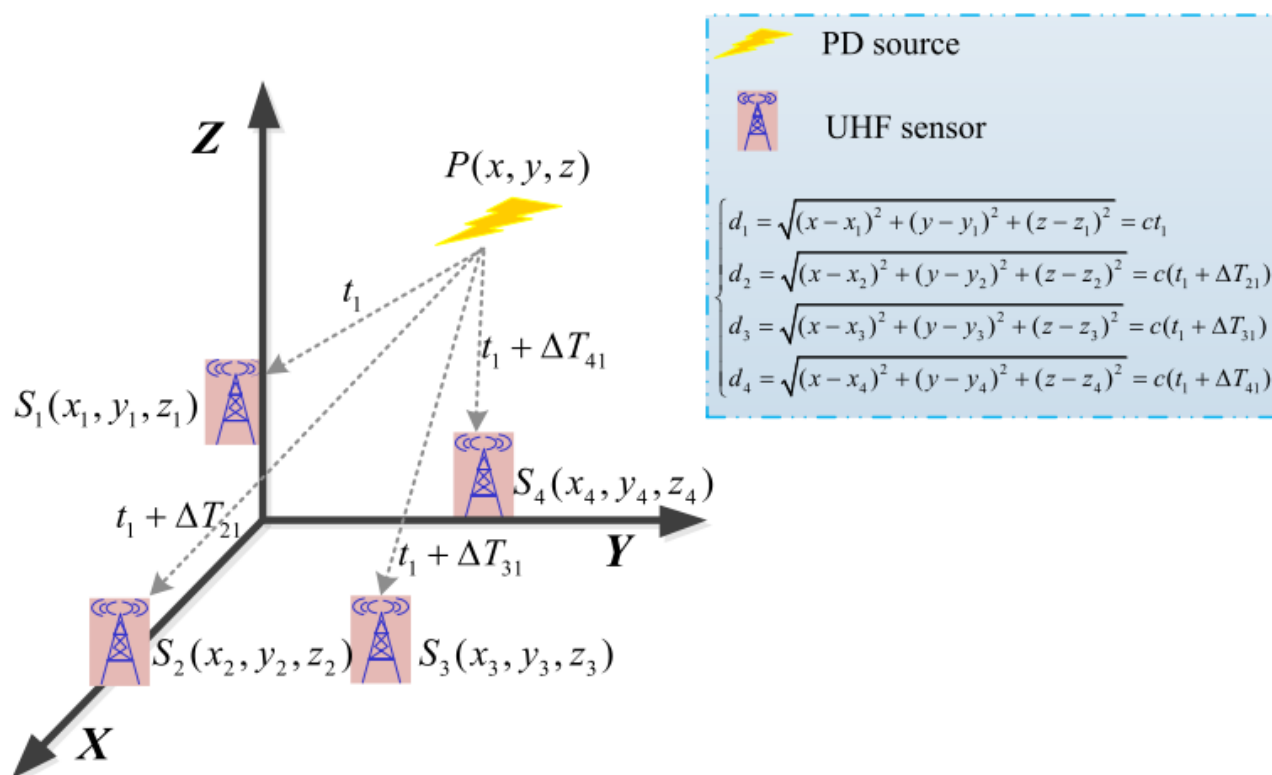


Рис. 2.1. Принцип работы методики по определению разницы во времени прибытия [73]

Система *PD-map* компании *Dimrus*, описанная ранее, применяет данный метод в своей системе диагностики подстанции, а также в других видах высоковольтного оборудования.

Наглядный пример полученных данных с четырех датчиков, автора *Sourav Dhara* и др. (Индия) [75], где один и тот же сигнал пришел на некоторые датчики с отставанием, приведен на рис. 2.2.

Описанная методика применяется учеными со всего мира [76-81]. Для получения удовлетворительной оценки местоположения источника ЧР на основе метода, одной из основных задач является точный расчет разницы во времени прибытия между различными приемными датчиками.

Мы, в свою очередь, тоже совершили успешную попытку в применении данного метода, но используя ультразвуковые датчики, получив такое распределение на временной диаграмме (рис.2.3) [А4, А8] и собрав переносную установку с наложением данных на видеоизображение.

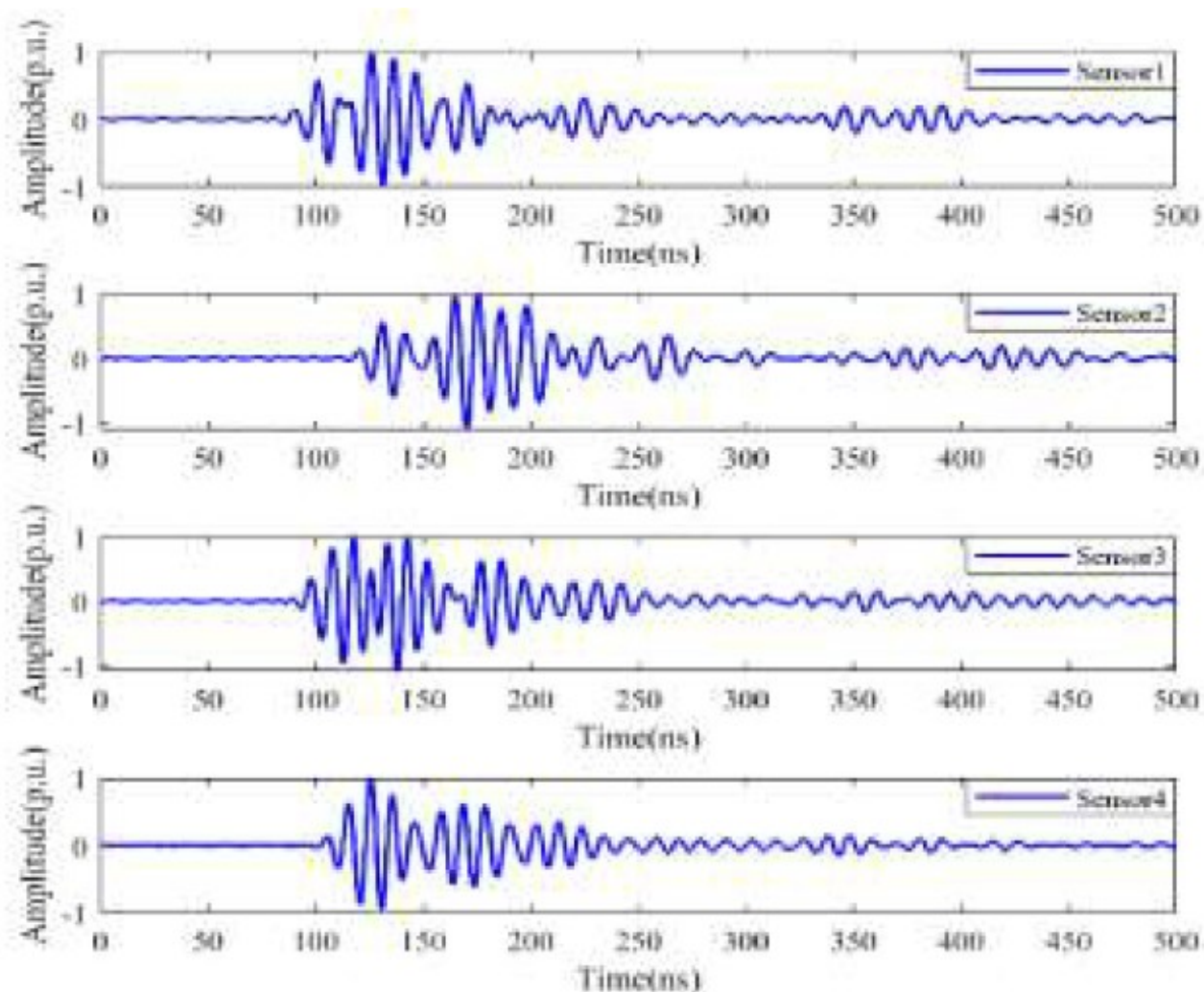
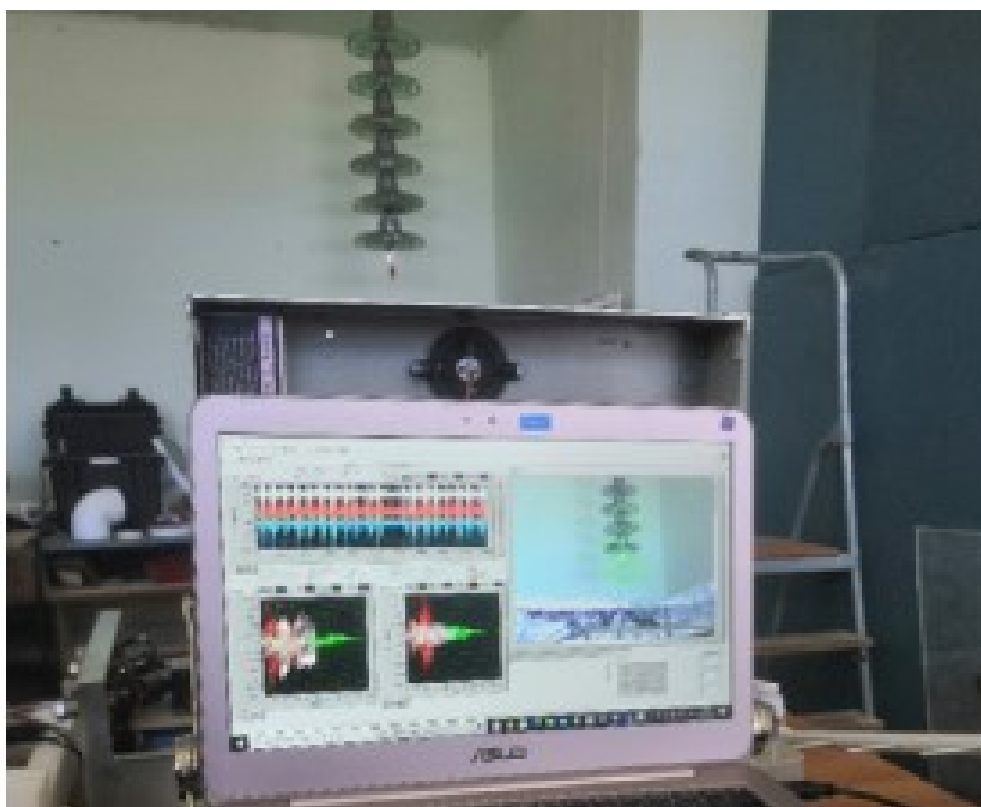


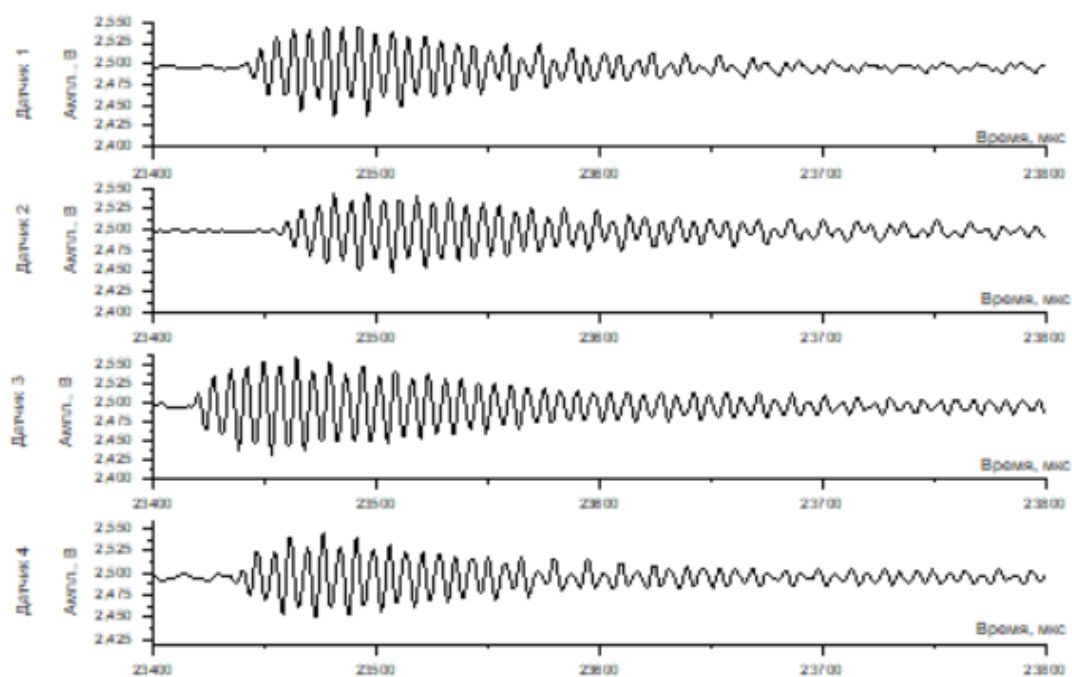
Рис. 2.2 Данные с четырех датчиков, зафиксировавших один ЧР, на основании которых по методике определения разницы во времени прибытия определяется местоположение ЧР [76]

Схожий по принципу работы, но для другого предназначения выпускается прибор швейцарской фирмы Distran. Прибор для визуализации утечек газов, сжатого воздуха и вакуума.

Определение местоположения источника ЧР с помощью данной методики является очень точным, примерно с точностью до 0,5 м, в зависимости от приемников и шумов и на отдаленном расстоянии от источника, так как скорость распространения ЭМ излучения высокая ( $3 \cdot 10^8$  м/с). Однако, эта методика имеет свои недостатки.



а



б

Рис. 2.3. Результаты применения методики определения источника ЧР по разнице во времени прибытия с помощью акустических датчиков: а) внешний вид устройства, б) полученные осциллограммы ЧР с различных датчиков [А4, А8]

При проведении анализа литературы в различных источниках были озвучены такие значения времени импульса ЧР: в работе Вдовико В.П. [3] говорится, что в твердой изоляции импульсные токи ЧР имеют длительность  $10^{-9}$  -  $10^{-6}$  с, а у токов поверхностных ЧР длительность составляет  $10^{-7}$ , но при исследованиях твердой изоляции наблюдались импульсы  $10^{-11}$  с.

На рис. 2.4 отображен импульс единичного разряда, полученный нами в научно-исследовательской лаборатории КГЭУ с помощью высокоточного осциллографа Rohde Schwarz с частотой дискретизации 2,5 ГГц. Время импульса составило  $10^{-11}$  с. В связи с этим, измеряемое оборудование нуждается в синхронизации времени на уровне наносекунд высокочастотных датчиков и системы обработки, что приводит к высокой стоимости оборудования и сложной обработке данных.

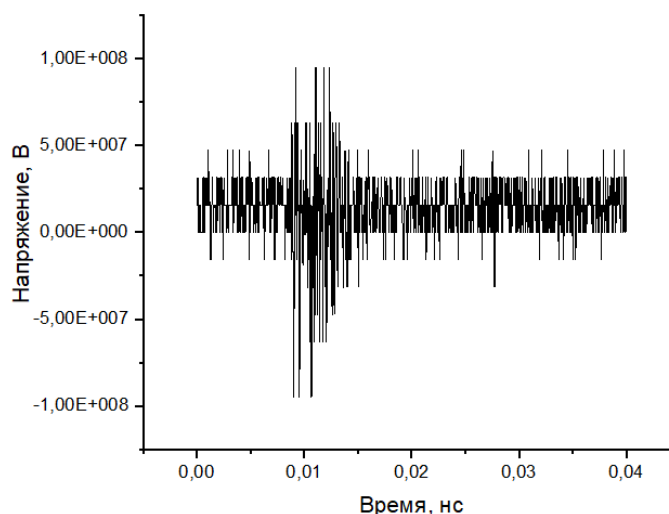


Рис. 2.4. Импульс единичного ЧР

Локализация источника разряда возможна по амплитуде. Один и тот же импульс от частичного разряда, возникшего внутри контролируемого оборудования, может быть зарегистрирован несколькими датчиками, установленными в разных точках объекта. Соотношение амплитуд от одного частичного разряда, но зарегистрированных в нескольких точках контролируемого оборудования, несет в себе много полезной диагностической информации. Чем меньше амплитуда, тем дальше находится источник ЧР [12].

### 2.1.3. Применение показателя мощности принятого сигнала как способ регистрации ЧР

Ранее мы рассмотрели способы и приборы измерения ЧР электромагнитным методом, описанные в стандартах и по принципу регистрации каждого отдельного разряда, и с дальнейшим распределением сигналов каждого разряда по фазе приложенного напряжения или по времени. Чтобы зарегистрировать каждый ЧР, длительность которого может составлять наносекунды, иногда и пикосекунды, необходимо иметь очень высокую производительность и вычислительную мощность оборудования, чтобы зарегистрировать, а потом еще и обработать такой массив данных. В стандарте ПАО «ФСК ЕЭС» [82] указано, что измеритель ЧР для маслобарьерной изоляции должен иметь минимальную разрешающую способность 12 бит. За период напряжения промышленной частоты частота дискретизации ЧР должна быть порядка 600.

С точки зрения периодического контроля, например, 1 раз в месяц или еще реже, когда для осмотра линии требуется только один прибор, такая разрешающая способность оправдана. Но при разработке круглосуточной «онлайн» системы контроля ВИ необходимо использовать упрощенную и недорогую систему измерения, которая не требует высоких вычислительных мощностей, имеет малые габариты и малое энергопотребление, чтобы была возможность питаться от самой линии, например, с помощью трансформатора тока или от солнечной батареи.

Поэтому в диссертации рассматривается новый подход к регистрации ЧР в изоляции - применение показателя мощности принятого сигнала. Этот термин употребляется в разделе телекоммуникаций. Обратимся, для начала, к источнику [83]: показатель уровня принимаемого сигнала, *RSSI* (англ. *received signal strength indicator*) – мощность принимаемого приёмником сигнала.

У термина *RSSI* есть несколько синонимов, которые мы будем далее применять: индикатор (показатель) мощности принятого сигнала, мощность электромагнитного излучения.



Индикатор мощности принимаемого сигнала запатентован в 1991 году компанией MOTOROLA, INC. (США) [69].

Интенсивность  $RSSI$  указывает мощность принятого сигнала. Соответственно мощность (или сила) принятого сигнала может быть указана напряжением постоянного тока, имеющим уровень, который изменяется линейно по отношению к нему. В технике хорошо известно, что мощность принятого сигнала, выраженная в дБм, логарифмически пропорциональна уровню принятого сигнала, индуцированного антенной приемника, обычно выражаемому в мкВ (микровольтах). Соответственно, чтобы обеспечить линейную зависимость между мощностью принимаемого сигнала и сигналом  $RSSI$ , должна существовать логарифмическая зависимость между сигналом  $RSSI$  и уровнем принятого сигнала. Обычно сигнал  $RSSI$  генерируется на промежуточной частоте приемника [69].

Показатель уровня принимаемого сигнала обычно представляется в логарифмических единицах – дБм (децибел относительно 1 милливатта). Из области электронной техники дБм – это значение, представляющее абсолютное значение мощности, соотношение, основанное на мощности 1 мВт:

$$P_1 = 10 \lg \frac{P_{изм}}{P_0} \quad (2.1)$$

где  $P_0$  – это опорная мощность, взятая за эталон, и равна в нашем случае 1 мВт;  $P_{изм}$  – измеренная приемником мощность принимаемого сигнала.

$$P_1 = 10 \lg \frac{P_{изм}}{1 мВт} \quad (2.2)$$

В связи с тем, что функция является логарифмической, а 1 мВт – это показатель «эталонного» сигнала, то зачастую значения  $P_1$  будут отрицательными.

Такой функцией измерения уровня принимаемого сигнала обладает большинство современных телекоммуникационных приемников, в том числе практически все современные модемы.

Значение  $RSSI$  является результатом усреднения принятой мощности за восемь символьных периодов (128 мкс), как указано в IEEE 802.15.4 [84, 85].

В мире имеются попытки внедрения метода измерения среднего уровня мощности электромагнитного излучения как способа регистрации частичных разрядов, например, в работах [86, 29]. В работах локализация производится на основе заранее составленной базы возможных вариантов расположения дефектов. Недостатком данных систем является необходимость создавать базу данных с единицами оборудования при каждой установке на новые энергетические объекты. Также в системах отсутствует синхронизация по фазе сетевого напряжения, что не позволяет отстроиться от помех и коронных разрядов. Нет классификации изоляторов по уровню технического состояния, что является ключевым моментом при мониторинге.

В работе предлагается метод определения загрязнения и поверхностных дефектов и локализации на основе определения мощности ЭМ излучения. Метод не требует тактовой синхронизации по времени, что значительно уменьшает объем данных, и упрощает обработку.

## **2.2. Разработка нового метода мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов**

Суть предлагаемых метода и системы мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов ВИ заключается в выполнении следующих операций [A1-A3, A7, A15, A16]:

1. Измерение относительной влажности окружающего воздуха;
2. Измерение средней мощности электромагнитного излучения;
3. Накопление и усреднение полученных данных по фазе сетевого напряжения;
4. Определение степени аварийности: малозначительная, значительная и критическая;
5. Локализация гирлянды изоляторов с критической степенью аварийности;
6. Передача данных на диспетчерский пункт.

Для выполнения перечисленных выше операций необходимо было решить следующие задачи:

1. Выбор полосы частот для измерений, подавление высокочастотных помех;
2. Разработка лабораторного стенда, в состав которого лабораторный образец измерительного устройства;
3. Калибровка измерительной системы стенда;
4. Проведение экспериментов по проверке эффективности разработанного метода, применяя известные методы и сертифицированные приборы;
5. Разработка методики определения поверхностных загрязнений и дефектов высоковольтных стеклянных изоляторов;
6. Разработка методики локализации гирлянды с ухудшенным и предаварийным состоянием;
7. Разработка опытного образца системы мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов.

Понятие средней мощности основано на оценке напряженности ЭМ поля, измеренного с помощью приемника бесконтактно и пропорционального среднему току  $i$  через ЧР [51, 87].

$$E_D = \frac{k^2 i l}{4\pi\omega\epsilon_a r} \quad (2.3)$$

где  $E_D$  – действующее значение напряженности поля радиоволны;  $i$  – ток ЧР,  $l$  – длина пробойного промежутка,  $\omega$  – круговая частота колебаний,  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды,  $r$  – расстояние от источника ЧР,  $\lambda$  – длина волны,  $k$  – волновое число.

Таким образом, выражение (2.3) позволяет связать характеристики ЧР со средним током  $i_{cp}$ , а последний с мощностью ЧР, поскольку  $i_{cp}$  в соответствии с приведенными стандартами определяется как [5]:

$$I = (|q_0| + |q_1| + |q_2| + \dots + |q_{\max}|) / t_{1Ц} \quad (2.4)$$

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

А мощность определяется как [5]:

$$P = (q_0 U_0 + q_1 U_1 + q_2 U_2 + \dots + q_{\text{макс}} U_{\text{макс}}) / t_{1Ц}, \quad (2.5)$$

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

С целью регистрации ЭМ излучения разработана измерительная ячейка, состоящая из следующих элементов (рис. 2.5):

- ЭМ сканирующего приемника, определяющего среднюю мощность электромагнитного излучения;
- аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- штыревой УВЧ антенны;
- датчика фазы;
- датчика температуры и относительной влажности;
- программного обеспечения [А11] на ПК.

На рис. 2.5 представлена схема проведения лабораторных исследований разработанным измерительным устройством.

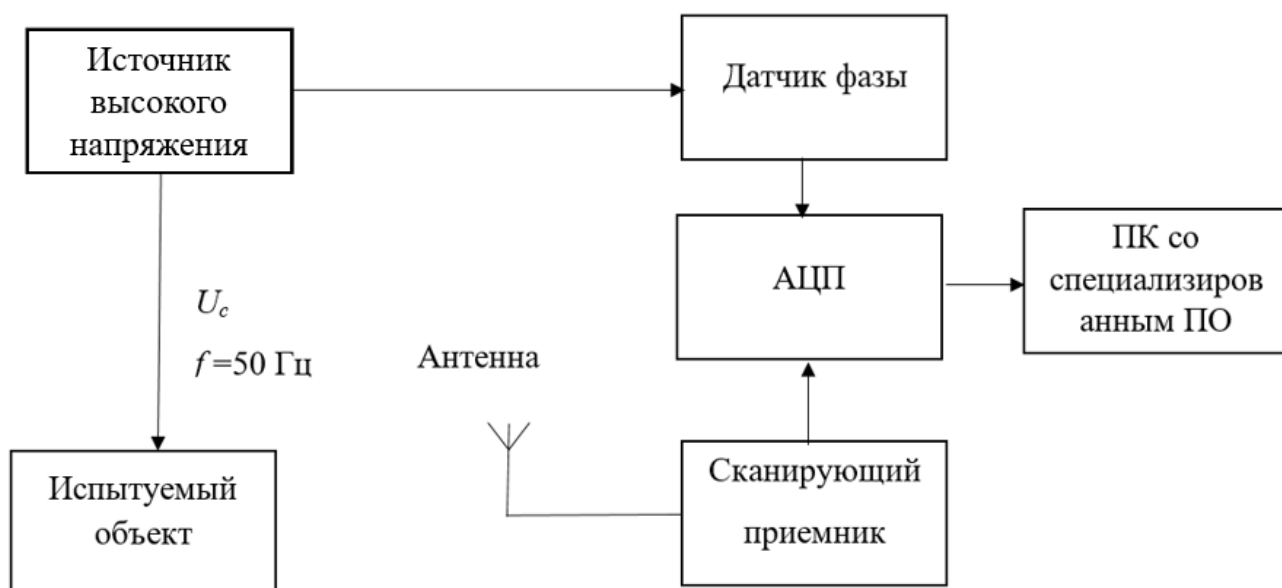


Рис. 2.5. Схема разработанного измерительного устройства [А7]

В методе с частотой дискретизации 2,5 кГц измеряется средний уровень мощности ЭМ излучения ЧР и в реальном времени производится синхронное накопление и усреднение данных по фазе сетевого напряжения.

Значением средней мощности ЭМ сканирующего приемника является результатом усреднения принятой мощности за восемь символьных периодов (128 мкс), как указано в международных стандартах *IEEE* 802.15.4 [84, 85].

### 2.2.1. Радиочастотные помехи

На основе данных работ [88, 89] ЧР влекут за собой электромагнитное излучение в диапазоне частот порядка 30-3000 МГц, то есть от высокочастотного (ВЧ) диапазона до сверхвысокочастотного (СВЧ).

Выбор полосы частот для измерений электромагнитных сигналов имеет ключевое значение для качественного получения данных, так как существует безграничное множество ВЧ сигналов, возникающих в оборудовании или наведенных в него извне, не связанных с наличием дефектов или загрязнений в изоляторах. В указанном диапазоне (30-3000 МГц) наблюдаются и сигналы помех и функционируют FM-радио, GSM-связь, Wi-Fi, цифровое телевидение и др. (рис. 2.6).

Существует большое количество классификаций помех, остановимся на обобщенной классификации:

1. помехи постоянного действия (FM-радио, GSM, телевидение);
2. помехи периодического возникновения (коронные разряды, разряды молний);
3. случайные помехи (радиолобительские изделия, аварийные ситуации).

Подавление помех в нашей работе производится двумя способами:

1. Правильный выбор частотного диапазона, в котором отношение сигнал/помеха является максимальным. Частотный диапазон определяется исходя

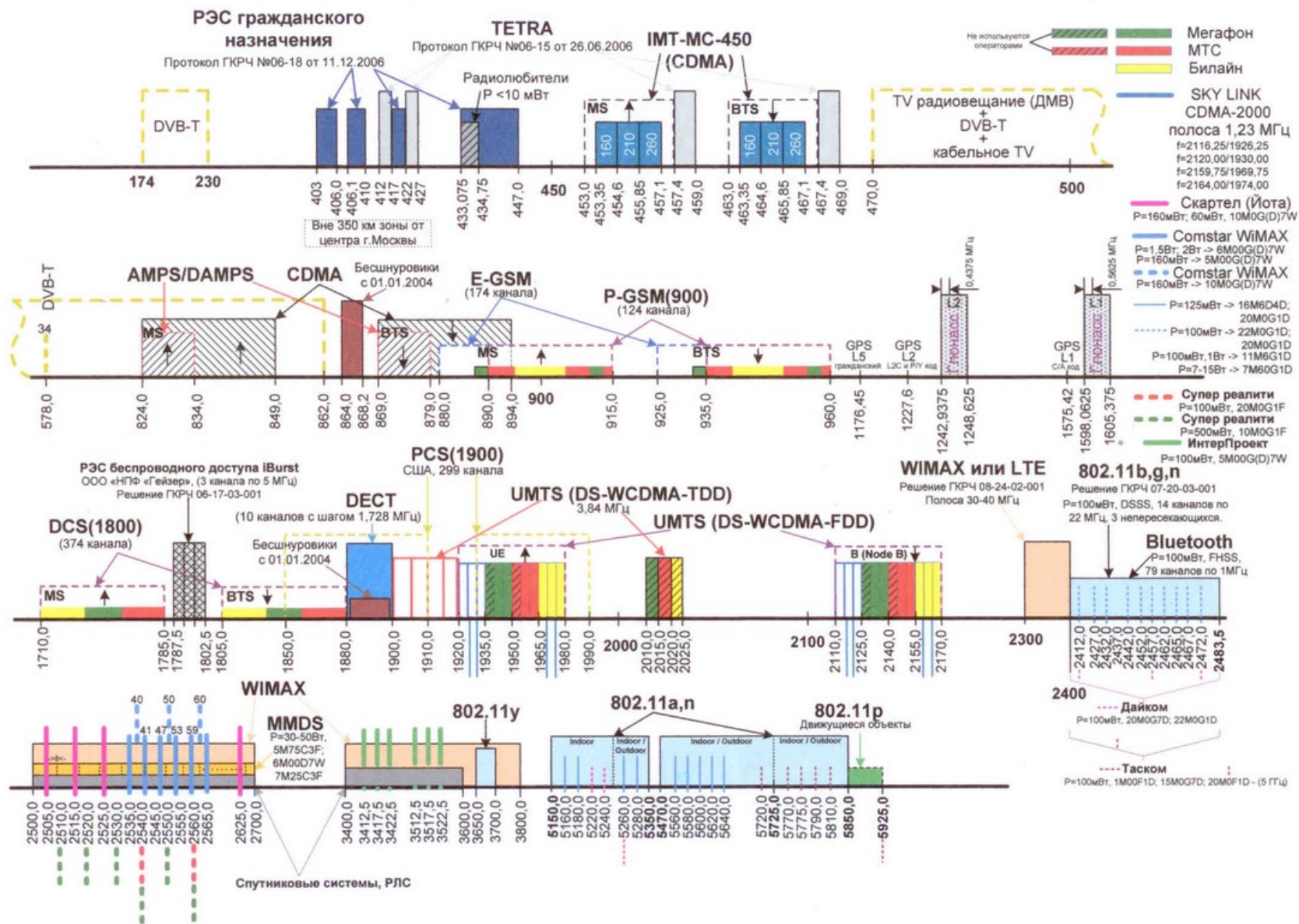


Рис. 2.6. Занятость частот в РФ

из соображений максимального подавления помех при достаточно хорошей регистрации сигналов ЧР.

2. Привязка к фазе приложенного напряжения, позволяющая отфильтровать сигналы, не привязанные к фазе.

С целью выбора рабочего диапазона частот был просканирован спектр частот от 30 МГц до 1,7 ГГц (рис. 2.7) с помощью широкополосного устройства RTL2832 SDR [90] и с различными типами антенн (рамочная антенна на низких частотах, разработанная логопериодическая антенна на 800 МГц, штыревая широкополосная антенна и в двух случаях: с частичными разрядами и без них.

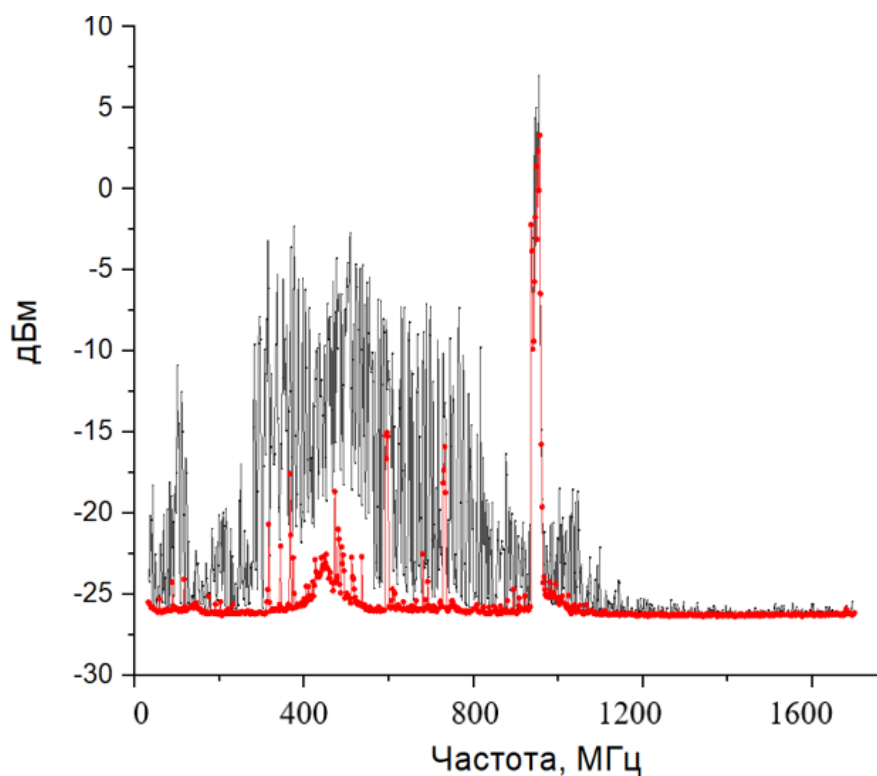


Рис. 2.7. Спектр частот (от 30 МГц до 1,7 ГГц) электромагнитного фона (красная линия с круглыми маркерами) и спектр, полученный при наличии ЧР в изоляции (черная линия без маркеров)

Использовалась разработанная программа [A12]. Для примера, на рис.2.7 представлен график, полученный с помощью широкополосной штыревой антенны, где при сканировании были обнаружены постоянные помехи (красная линия с круглыми маркерами), в частности GSM на 940 МГц, телевидение в диапазоне 370-

600 МГц. Черной линией без маркеров представлен спектр, полученный с наличием ЧР. Полосы частот 200-300 и 790-890 МГц имеют минимальные помехи.

При анализе трудов ученых, занимающихся диагностикой трансформаторов на основе регистрации электромагнитного спектра, было выявлено, что спектр электромагнитного излучения от трансформатора с дефектом содержит пики до 400 МГц. Так, например, в работе [91] при сканировании спектра дефектного силового трансформатора (рис. 2.8) зафиксированы пики на частотах до 350 МГц.

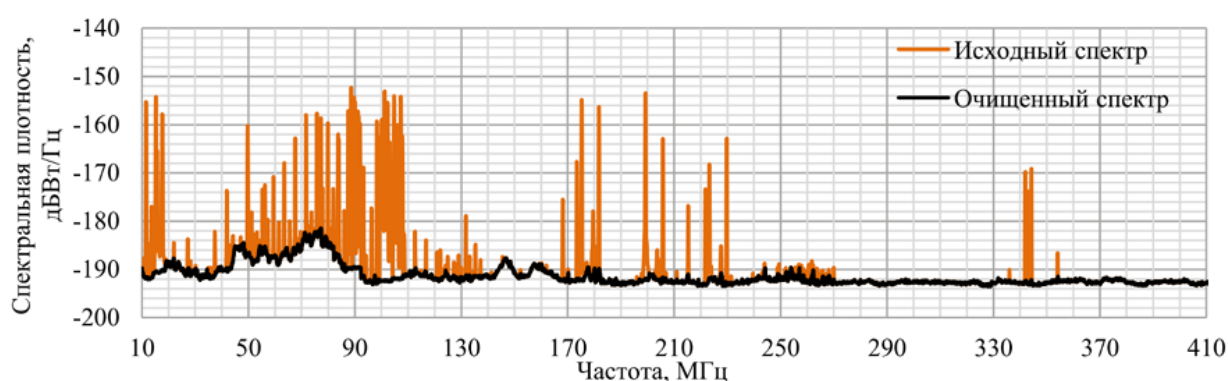


Рис. 2.8. Сканирование спектра ЭМ излучения вблизи дефектного трансформатора [91]

Обзор частот, на которых производят измерения некоторые фирмы в России представлен в таблице 1.3 первой главы диссертации. Большинство ученых, занимающихся регистрацией ЧР в высоковольтных изоляторах электромагнитным методом используют диапазон частот до 200 МГц [3, 92]. При использовании переносных приборов для диагностики ВИ используется узконаправленная антенна, и сам процесс контролируется человеком, что позволяет отстроиться от помех на подстанциях.

Анализ литературы показал, что регистрация ЧР также возможна и на более высоких частотах: 700-800 МГц [27, 89] и выше [27, 45]. При разработке автоматического метода контроля, который будет функционировать независимо от человека, необходимо выбрать диапазон частот, имеющий минимальные помехи и достаточно высокое отношение сигнал/шум для регистрации ЧР.



В результате проведенных исследований, на основе анализа публикаций других ученых, а также обзора имеющихся на рынке датчиков, регистрирующих уровень электромагнитного излучения, в диссертации выбран диапазон частот с отсутствием сильных помех, с достаточным отношением сигнал/шум и для которого имеются ЭМ датчики на частотах 861-876 МГц. В связи с этим, дальнейшие испытания проводятся в узкой полосе частот 861-876 МГц.

### 2.2.2. Подавление помех, вызванных коронными разрядами

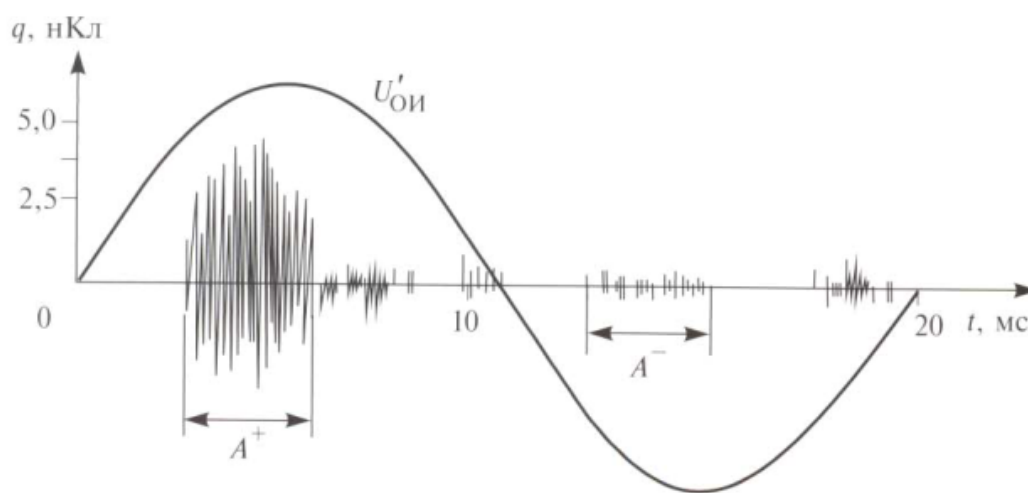
Основные мощные электромагнитные помехи могут вызывать коронные разряды. Они относятся к классу постоянных помех и так же, как и частичные разряды, накапливаются синхронизировано с фазой сетевого напряжения, что может существенно повлиять на результаты исследований. Но, есть одно существенное отличие, причину которого мы сейчас разберем.

У коронных разрядов амплитуда в положительном полупериоде приложенного напряжения на порядок больше, чем в отрицательном. Это подтверждено в работах двух российских ученых Вдовико В.П. [3] и Русова В.А. [12].

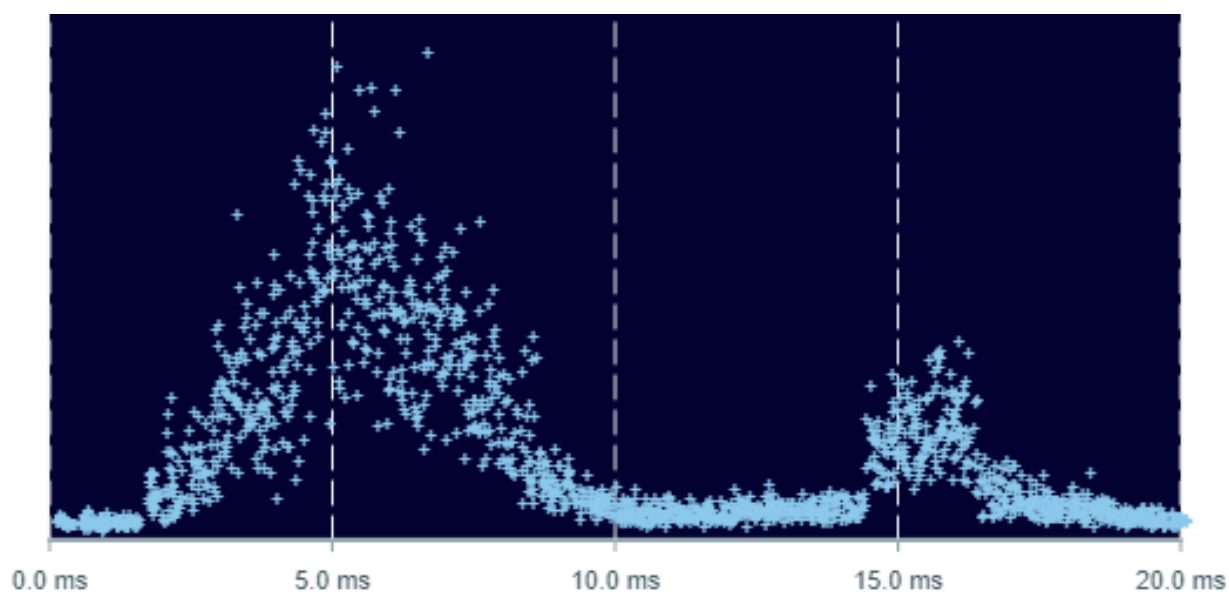
Внешний вид сигналов помех от коронных сигналов разрядов, зарегистрированных измерительной системой Вдовико В.П. представлен на рис. 2.9. Импульсные сигналы коронных разрядов на переменном напряжении всегда наблюдаются в фазовом окне около  $0 \dots 100$  электрических градусов, т.е. в первой четверти полупериода.

Сигналы на отрицательной полувольтне имеют амплитуду, на один-два порядка меньшую, чем на положительной полувольтне. Образование интенсивных коронных разрядов на положительной полувольтне обосновано следующим: в случае возникновения ионизационных процессов в воздухе у острых кромок высокопотенциальных частей (экраны, шины, соединители и т.д.) при положительной полярности напряжения образующийся объемный заряд формирует на некотором удалении от электродов повышенную напряженность

поля. Благодаря этому создаются условия для образования стримерной короны, которая характеризуется большим током. При отрицательной полярности электродов оставшийся у электрода объемный заряд снижает напряженность поля (при том же напряжении) и условия для образования интенсивной стримерной короны отсутствуют (рис. 2.10) [3, 93, 94].



а



б

Рис. 2.9. Внешний вид импульсных сигналов коронных разрядов:

а) зарегистрированных измерительной системой ЧР в блочном однофазном трансформаторе [3], б) зарегистрированных на ВИ акустическим дефектоскопом

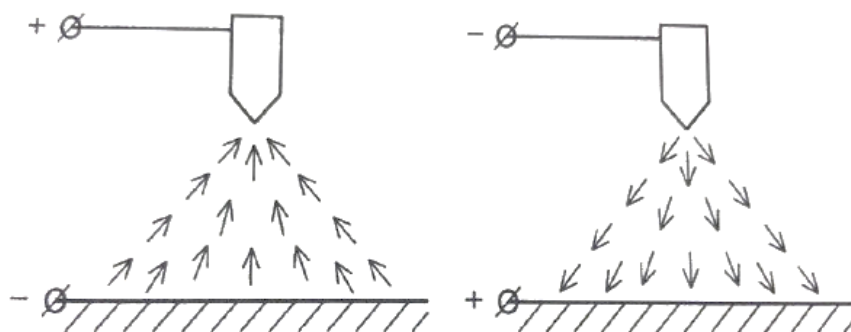


Рис. 2.10. Пояснение причин возникновения коронных разрядов при различной полярности приложенного напряжения [12]

Так как ЧР происходят в обоих полупериодах, а коронные разряды только в одном, это позволяет нам исключить коронные разряды, используя только один полупериод для обработки результатов.

### 2.2.3. Метод синхронного накопления

Отстроившись от постоянных и высоких по амплитуде помех, рассмотрим случайные периодические помехи. Здесь поможет второй способ подавления помех – это привязка к фазе сетевого напряжения, так как все случайные помехи не связаны с фазой, и могут быть отфильтрованы. В диссертации предлагается метод синхронного накопления [95] данных среднего уровня мощности ЭМ излучения и фазы сетевого напряжения (минимум в течение 10 тысяч периодов сетевого напряжения).

Метод применим в том случае, когда полезный сигнал в течение времени приема постоянен или является периодической функцией. Метод состоит в многократном повторении сигнала и суммировании отдельных его реализаций в устройстве обработки. Данный метод относится к группе точечных алгоритмов обработки сигналов.

Пусть полезный сигнал представлен двумя уровнями (рис. 2.11).

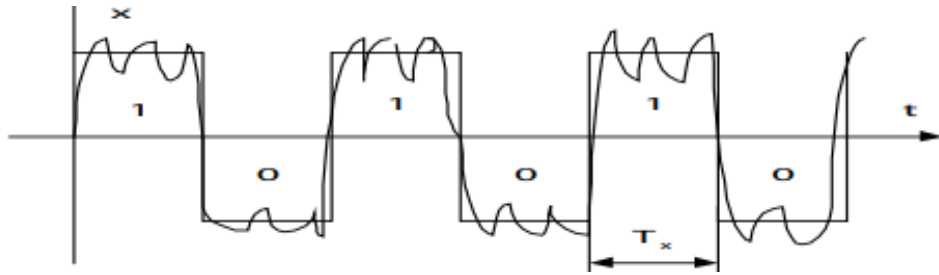


Рис. 2.11. Входной двухуровневый периодический зашумленный сигнал [95]

В интервале  $T_x$  сигнал постоянен. На интервале наблюдения  $T_x$  накапливается выборка значений принятого сигнала

$$\begin{aligned} y_1 &= x + n_1 \\ y_2 &= x + n_2 \\ &\dots\dots\dots \\ y_m &= x + n_m \end{aligned}$$

И эти значения суммируются:

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i = nx + \sum_{i=1}^n r_i$$

Введем два допущения:

1. отсчеты помехи  $n_i$  не зависят друг от друга;
2. помеха стационарна (ее характеристики не зависят от времени) и

определим  $\left(\frac{P_x}{P_r}\right)_{\text{вблх}}$  на выходе этого накопителя:

$$\left(\frac{P_x}{P_r}\right)_{\text{вблх}} = \frac{(nx)^2}{\left(\sum_{i=1}^n r_i\right)^2} = \frac{(nx)^2}{nD_r} = \frac{n^2 x^2}{nP_r} = \frac{nP_x}{P_r}$$

Таким образом, при перечисленных выше условиях, в результате  $n$ -кратного отсчета и их суммирования, отношение мощностей сигнала и помехи увеличивается в  $n$  раз.

С частотой дискретизации 2,5 кГц измеряется средний уровень мощности ЭМ излучения ЧР и в реальном времени производится синхронное накопление и усреднение данных и регистрация фазы (времени отсчета) сетевого напряжения. На

рис. 2.12. представлен алгоритм работы метода синхронного накопления по фазе сетевого напряжения. Блок-диаграмма программы (язык программирования LabView) представлена в Приложении В. Имеется свидетельство регистрации ПО [A13]. Синхронное накопление по фазе позволит отстроиться от помех, а также определять один из главных диагностических признаков – напряжение возникновения ЧР.

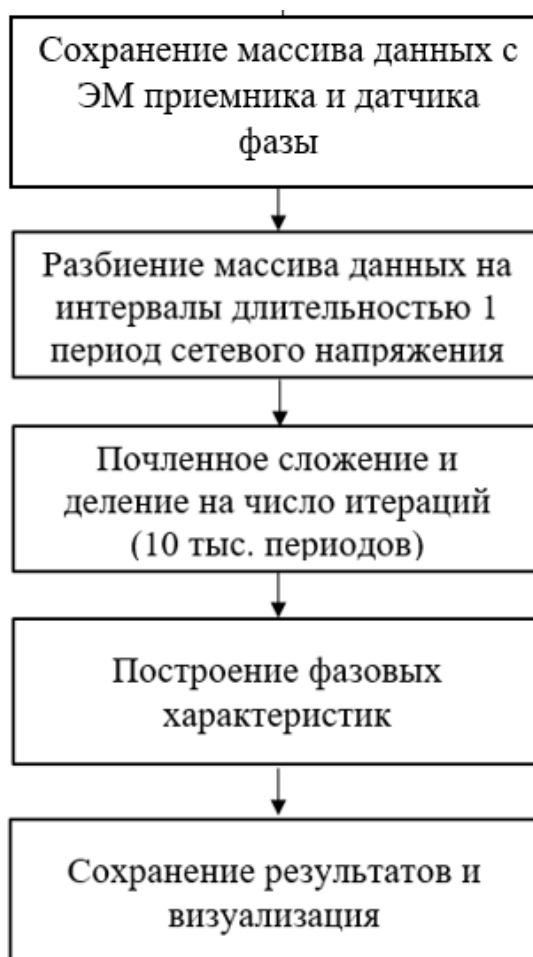


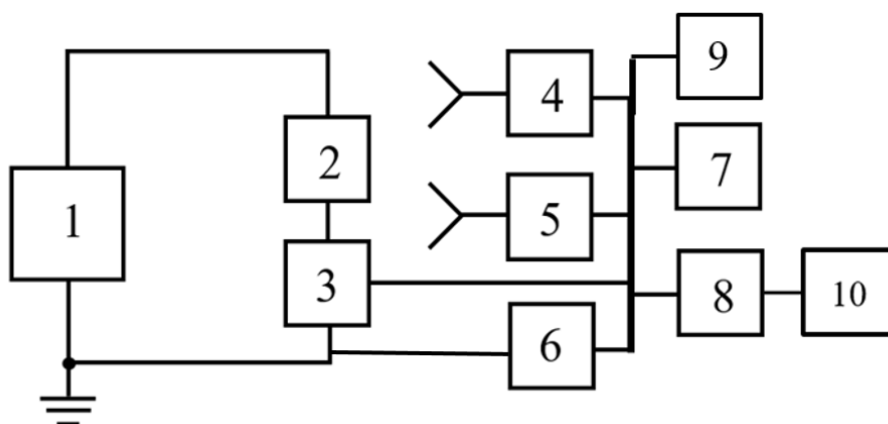
Рис. 2.12. Алгоритм работы метода синхронного накопления [A13]

#### 2.2.4. Разработка лабораторного стенда

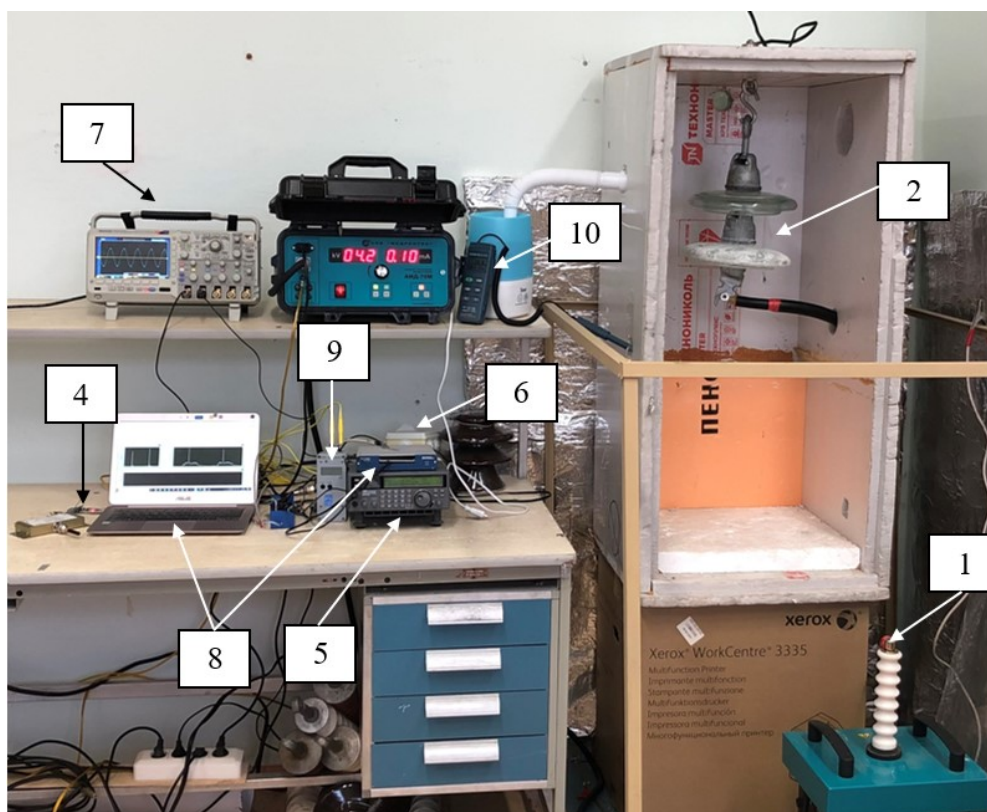
Для реализации метода и проведения экспериментов был разработан лабораторный стенд, который состоит из следующих основных элементов (рис. 2.13) [A6]:

- источника высокого напряжения АИД-70М (максимальное переменное напряжение 50 кВ) (поз. 1) [96];

- испытуемого стеклянного ВИ (ПС70Е) (поз. 2);
- контактного датчика для измерения кажущегося заряда электрическим методом (поз. 3);



а



б

Рис. 2.13. Схема лабораторного стенда: а) схема, б) фото [А6]

- ЭМ приемника микросхемного исполнения, измеряющего средний уровень мощности ЭМ излучения (модуль E70-868T14S2 [10], диапазон частот 861-876 МГц) (поз. 4);

- сканирующего широкополосного приемника стационарного типа AOR AR5001D (супергетеродинный радиоприёмник) (поз. 5);
- датчика фазы сетевого 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).

### Электромагнитный приемник

ЭМ сканирующий приемник микросхемного исполнения, определяющий среднюю мощность электромагнитного излучения ЧР, связан с 32-разрядным микроконтроллером SimpleLink™ Arm Cortex-M3 (АЦП на рис. 2.5) с частотой до 1 ГГц и флэш-памятью 128 КБ [97], одной из функций которого является измерение среднего уровня мощности ЭМ излучения (RSSI) по стандарту IEEE 802.15.4 [98].

После добавления радиоприемника, датчика фазы, антенны и персонального компьютера (ПК) со специализированным программным обеспечением (ПО) мы получили измерительное устройство, позволяющее регистрировать ЧР.

Таблица 2.3. Основные технические характеристики микроконтроллера [97]

Протоколы	IEEE 802.15.4, Wireless M-Bus (режимы T, S, C), 6LoWPAN, MIOTY
Диапазоны частот (МГц)	287-351, 359-439, 431-527, 718-878, 861-1054
Мощность передачи (макс.) (дБм)	15
Чувствительность (наилучшая) (дБм)	-124
Скорость передачи данных (макс.) (кбит/с)	4000

Ключевым показателем при выборе данного типа контроллера является возможность регистрации ЭМ излучения в выбранном нами в ходе исследования в п.2.1. диапазоне частот.

### Датчик фазы сетевого напряжения

Датчик фазы представляет собой детектор нуля синусоиды приложенного напряжения (рис. 2.14 – 2.15).

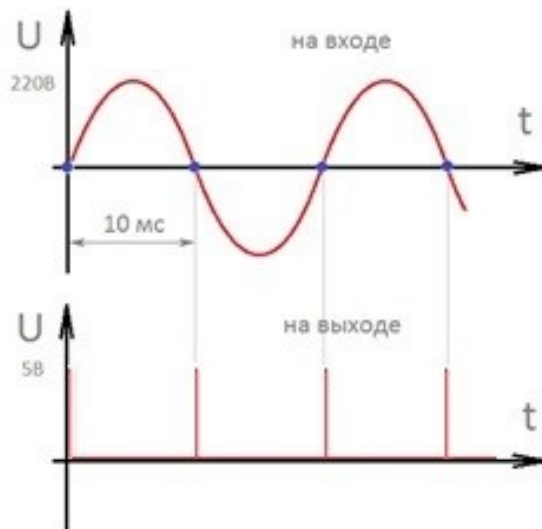


Рис. 2.14. Принцип работы детектора пересечения нуля синусоиды сетевого напряжения

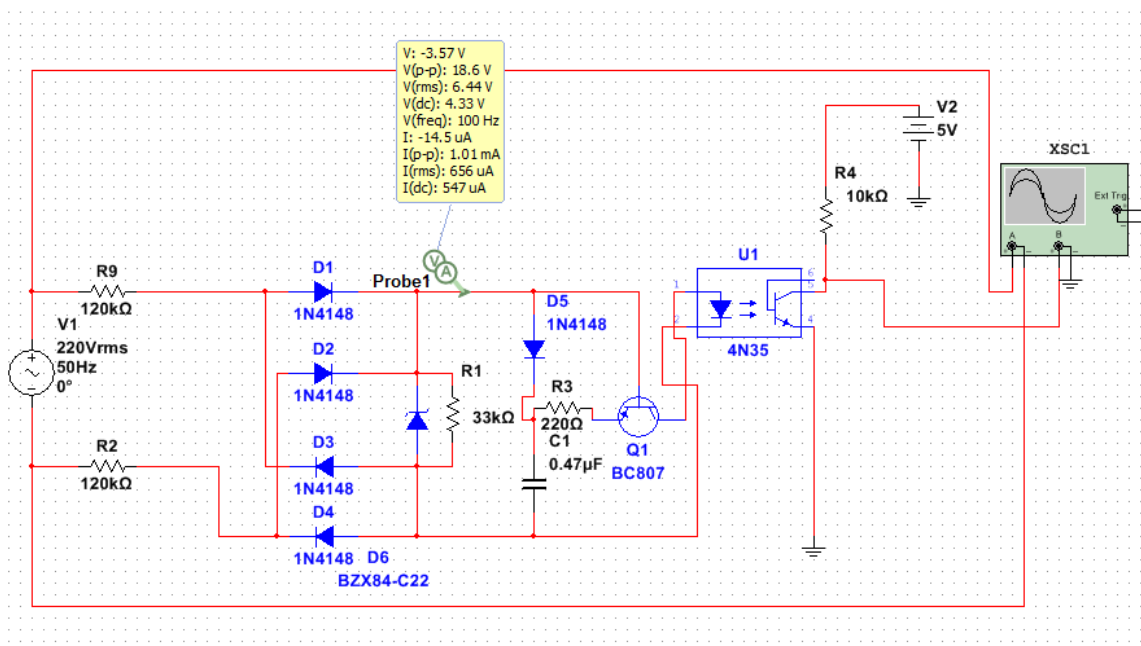


Рис. 2.15. Схема детектора пересечения нуля синусоиды, реализованная в *Multisim*



Определена погрешность детектора пересечения нуля синусоиды – 4 градуса фазы сетевого напряжения.

### Выбор антенны

Выбор штыревой широкополосной антенны обоснован следующими показателями:

1. Малогабаритный размер (50 мм), так как устанавливать габаритные антенны на каждом пролете не представляется возможным;
2. Широконаправленная диаграмма направленности, что позволяет не настраивать антенну при установке (рис. 2.18-2.20);
3. Выбранный диапазон частот входит в диапазон антенны;
4. Невысокая стоимость.

Таблица 2.4. Основные характеристики антенны

Параметр	Значения
Частотный диапазон	824-894 МГц / 1710-2170 МГц
Поляризация	Линейная
Усиление	2 дБи
Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН)*	< 2,5
Импеданс	50 Ом
Разъем	SMA
Рабочий диапазон температур	от -40°C до +85°C

В режиме рефлектометра антенна была протестирована с помощью анализатора спектра АКПП 4205/2. Для этого в сочетании с анализаторами спектра использовался мостовой направленный ответвитель (частотный диапазон 1 МГц - 3000 МГц; тип соединителя N; импеданс 50 Ом; вносимые потери 5 дБ; направленность 20 дБ). Использовались 2 адаптера N (M)-N (M) для подключения выходного терминала генератора слежения и входного радиочастотного терминала

анализатора спектра к входному терминалу и выходному терминалу отражательного моста, соответственно.

На рис. 2.16-2.17 представлены графики зависимости коэффициента поглощения антенны на различных частотах.

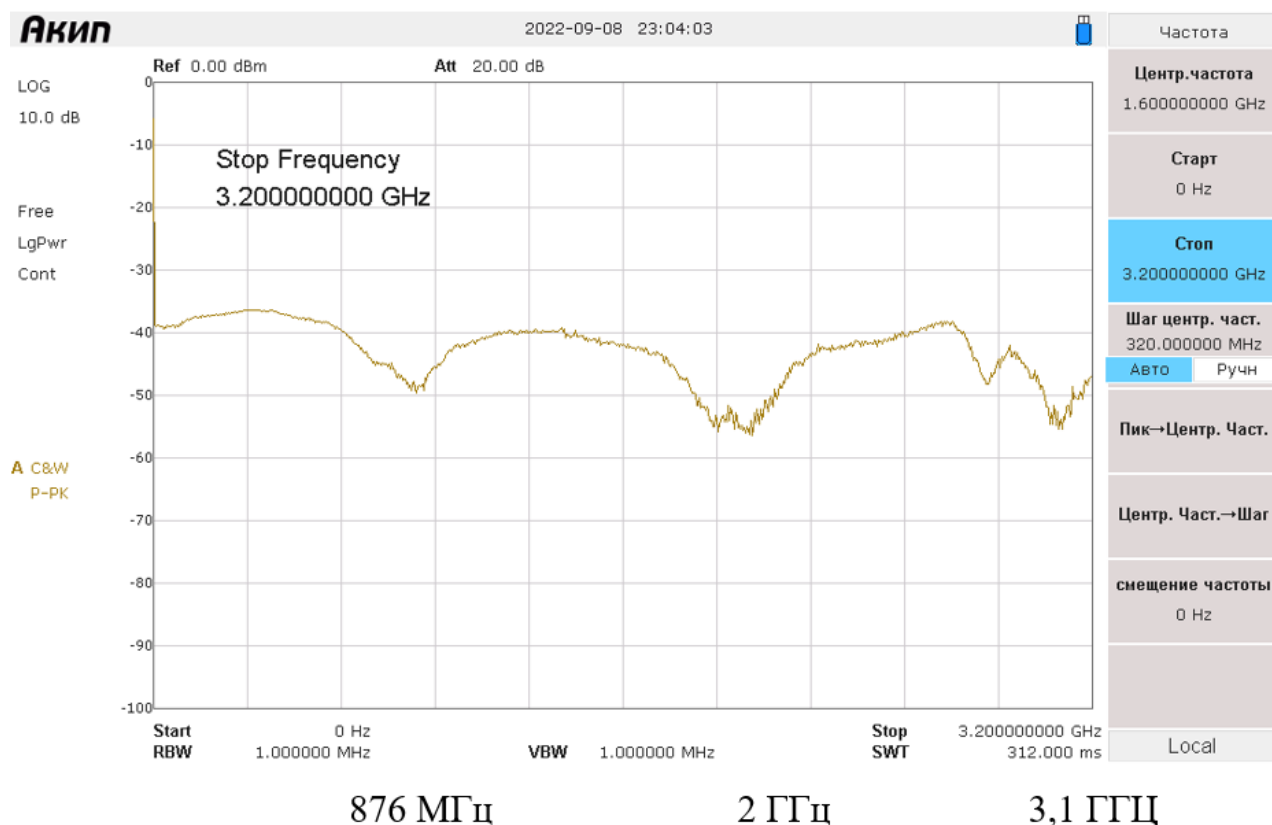


Рис. 2.16. Поглощение антенны в диапазоне частот от 0 до 3,2 ГГц (максимальное поглощение на частотах 876 МГц; 2 ГГц; 3,1 ГГц)

Проведены исследования формы излучаемого сигнала при использовании штыревой антенны. По результатам испытаний были построены диаграммы направленности излучения антенны.

Для измерений используется анализатор спектра USB-SA44B, обладающий встроенной функцией измерения радиочастотного электромагнитного излучения, трекинг генератор, установленный на поворотном столике (рис. 2.18-2.20). Измерения проводились в изолированном от посторонних излучателей помещении для различных поляризаций антенны.

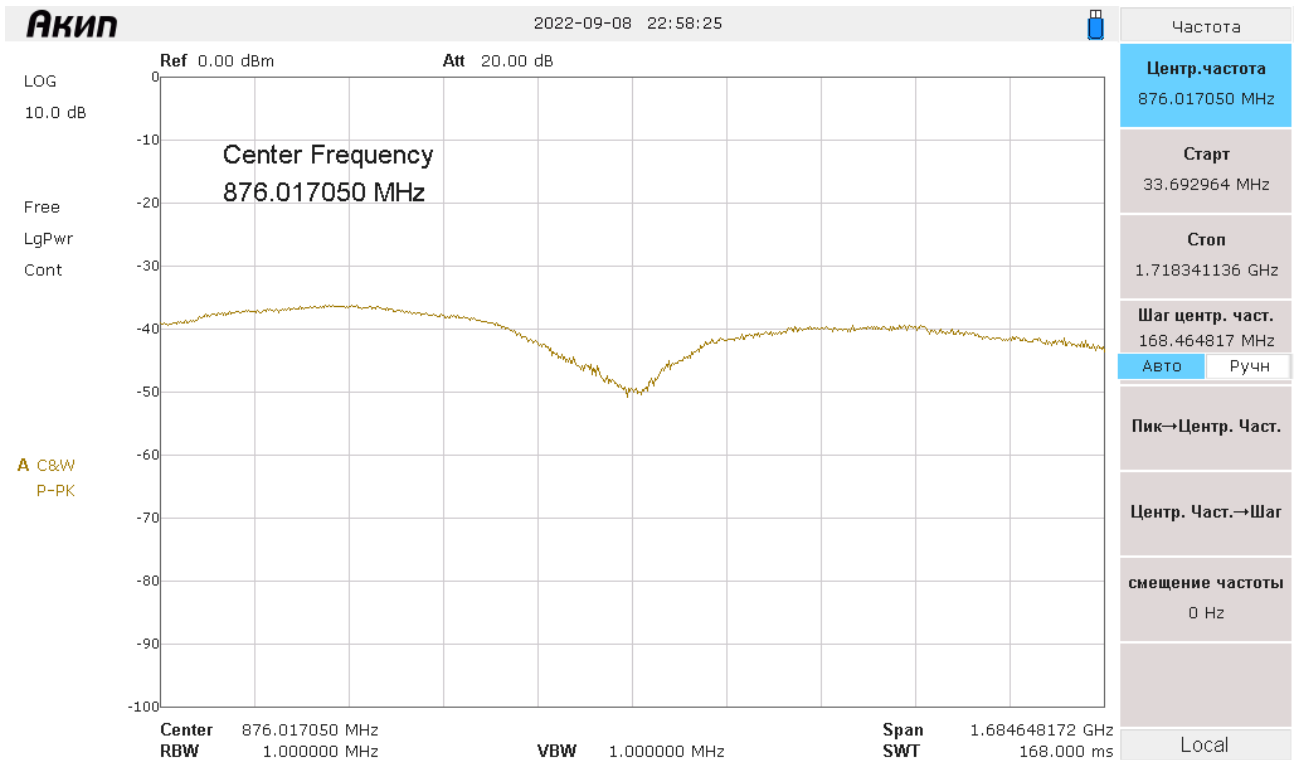


Рис. 2.17. Максимальное поглощение на частоте 876 МГц

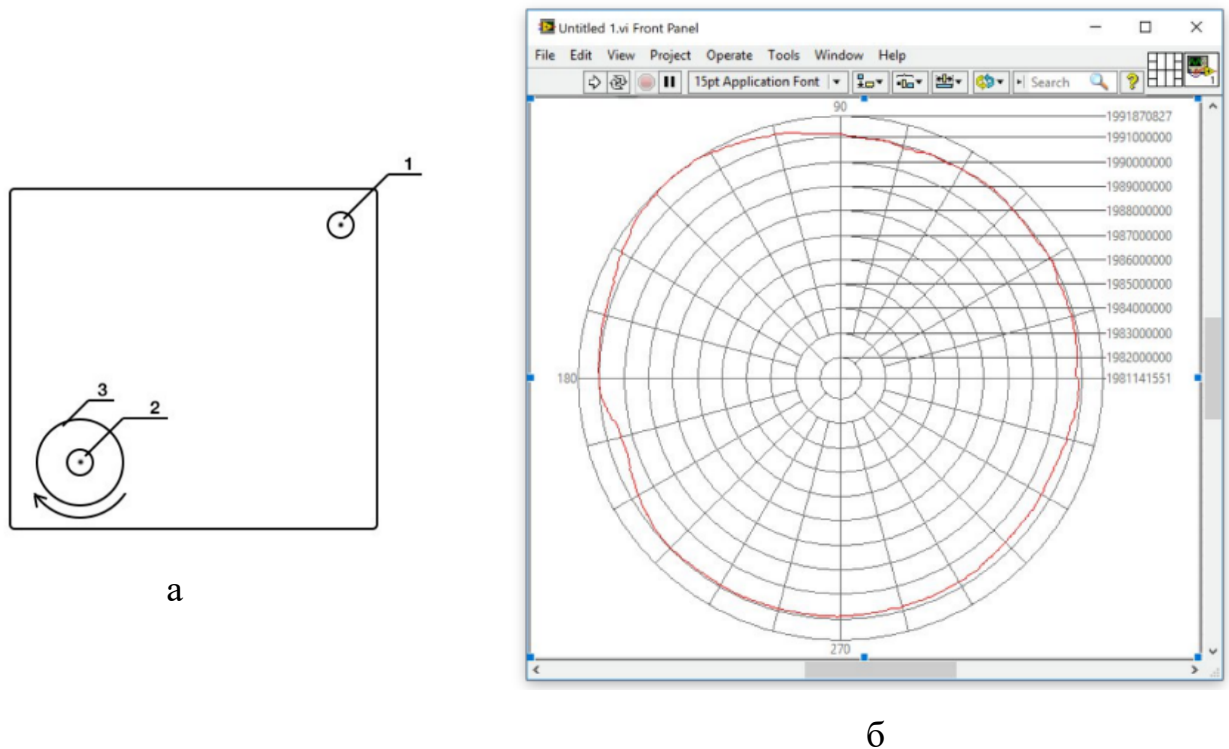
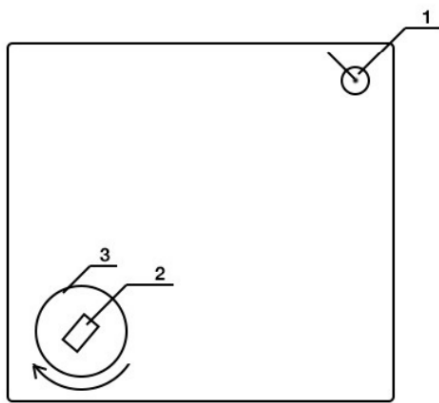
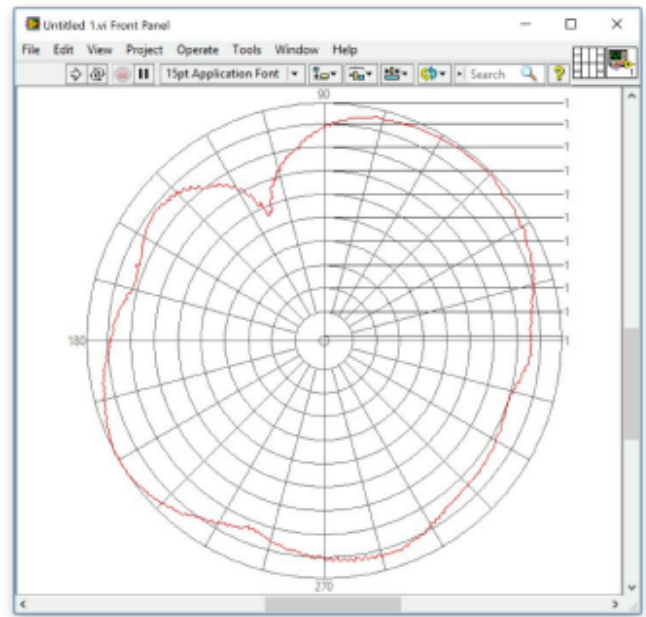


Рис. 2.18. Схема эксперимента по снятию диаграммы направленности, антенна анализатора спектра и трекинг генератора направлены вертикально (вид сверху) (а) и полученная диаграмма направленности антенны (б): 1 – антенна анализатора спектра, 2 – антенна трекинг генератора, 3 – поворотный столик

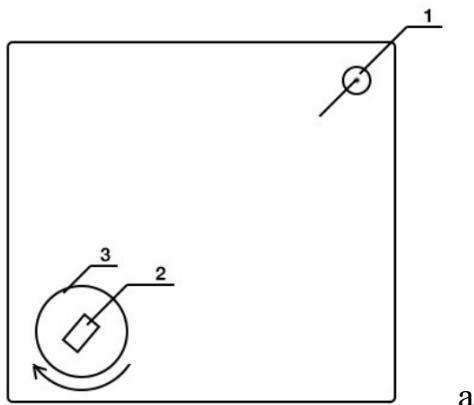


а

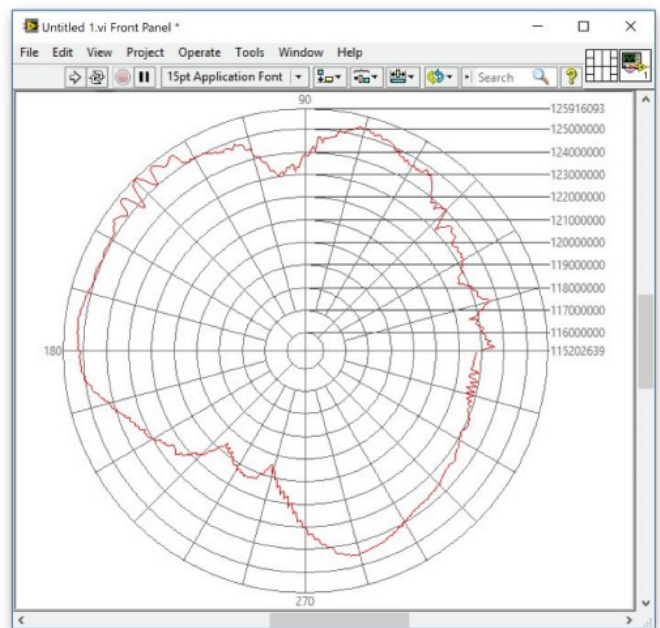


б

Рис. 2.19. Схема эксперимента, антенна анализатора спектра направлена вертикально, антенна трекинг генератора направлена горизонтально (а); полученная диаграмма направленности антенны (б)



а



б

Рис. 2.20. а) Схема эксперимента, антенна анализатора спектра расположена горизонтально в направлении антенны трекинг генератора, антенна трекинг генератора расположена горизонтально (а); полученная диаграмма направленности антенны (б)

## Испытуемый объект

В качестве испытуемого объекта в диссертации рассматриваются стеклянные изоляторы марки ПС70Е (рис.2.19).

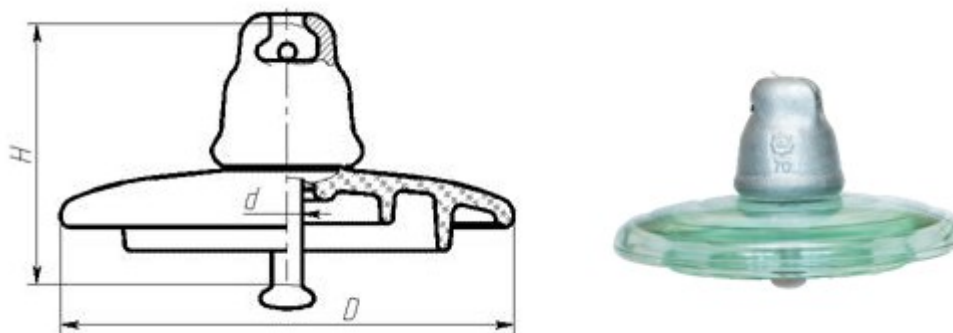


Рис. 2.19. Стеклянные изоляторы марки ПС70Е, размеры H, d, D представлены в таблице 2.5

Выбор стеклянных изоляторов обоснован тем, что они занимают первое место по объему рынка изоляторов в России, на примере Вятскополянского участка ЛЭП УВС филиала ПАО «Россети Центр и Приволжье»-«Кировэнерго» стеклянные изоляторы марки ПС70Е установлены на воздушных линиях различных уровней, например: 6(10) кВ, 35 кВ, 110 кВ.

Таблица 2.5. Характеристики ВИ ПС70Е

Тип	ГОСТ, ТУ	Диаметр	Строительная высота	Длина пути утечки	Выдерживаемое импульсное напряжение, 1,2/50+/-	Номинальное напряжение	Масса
		D	H				
		мм	мм	мм	кВ	кВ	кг
ПС 70 Е	ТУ 34-27-91-93	255	127	303	100	10	3,4

### 2.2.5. Калибровка измерительной системы

Калибровка измерительной системы производится с целью проверки ее функционирования и установления зависимости амплитуд регистрируемых

сигналов от значения кажущегося заряда имитируемых ЧР и определения чувствительности каждого канала регистрации ЧР. Калибровка проводится на полностью собранной схеме измерений согласно требованиям ГОСТ 55191-2012 [5].

Калибровка измерительной системы в составе собранной схемы измерений выполняется при отключении контролируемого объекта от напряжения.

Калибровка выполнялась при одном значении кажущегося заряда, имитирующего ЧР в диапазоне ожидаемых величин кажущегося заряда  $q$ . Требуемые величины кажущегося заряда составлялись от 1 пКл до 10 нКл.

Калибровка всей схемы измерений проводилась путем инъекции нормированного заряда с калибратора кажущегося заряда CAL1B [99]. Калибратор CAL1B формирует импульсы положительной и отрицательной полярности с крутым фронтом и экспоненциальным спадом.

Калибровка проводилась по схеме на рис.2.20 для 1, 2 и 3 изоляторов в схеме [5].

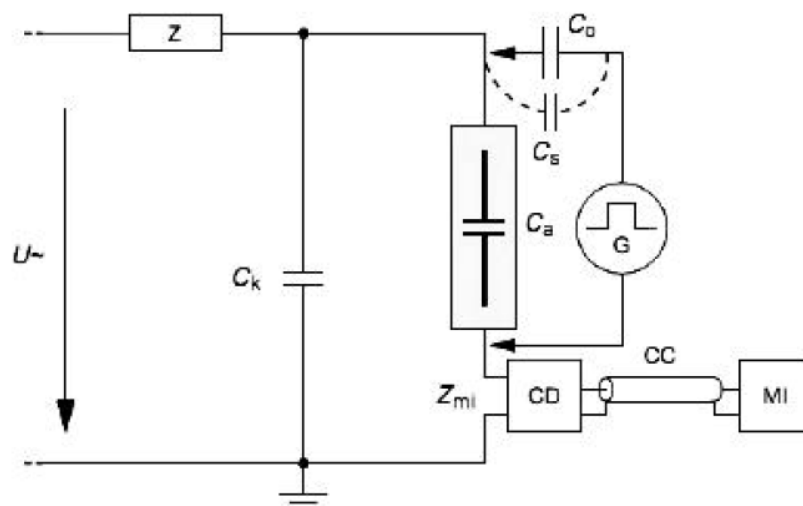


Рис. 2.20. Схема Калибровки лабораторного стенда, где  $U\sim$  - источник высокого напряжения; G - калибратор (генератор со ступенчатым выходным напряжением);

$C_0$  - градуировочный конденсатор;  $Z_{mi}$  - входной импеданс измерительного элемента (датчика); CC - соединительный кабель;  $C_a$  - испытуемый объект;  $C_k$  - конденсатор связи; CD - измерительный элемент (датчик);  $C_s$  - паразитная емкость; MI - измерительный прибор; Z - фильтр [5]

На рис. 2.21 представлена осциллограмма одного импульса, полученного с калибратора и приравненного к 100 пКл, в схеме с одним изолятором.

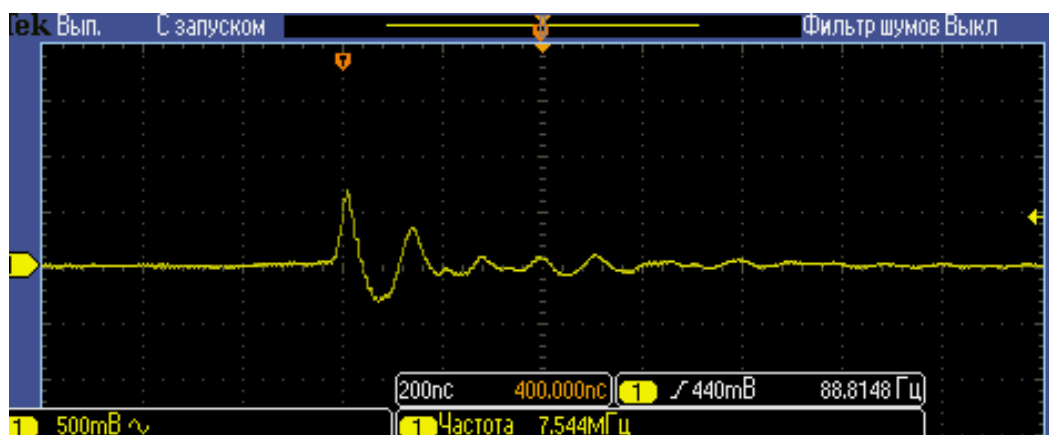


Рис. 2.21. Импульс, зафиксированный осциллографом с калибратора CAL1B, подключенного по схеме на рис.2.20

Калибровка измерительного устройства заключается, по существу, в определении его чувствительности ( $K_y$ ), представляющей собой отношение кажущегося заряда  $q_r$  имитируемого сигнала ЧР к напряжению на выходе устройства  $U_y$  (Кл/В):

$$K_y = q_r / U_y$$

$K_y$  определяется в том диапазоне значений  $q_r$  которое может регистрироваться при испытаниях. Для измерительной установки, с одним стеклянным изолятором ПС70Е:

$$K_y = 1,7 * 10^{-10}$$

Для измерительной установки, с двумя стеклянными изоляторами ПС70Е:

$$K_y = 2 * 10^{-10}$$

Для измерительной установки, с тремя стеклянными изоляторами ПС70Е:

$$K_y = 2,5 * 10^{-10}$$

Погрешность измерения не превышает 5%.

### 2.2.6. Верификация разработанного метода

На лабораторном стенде измерения проводились под рабочим напряжением одновременно тремя методами и приборами: акустическим методом [А5, А8] с помощью сертифицированного ультразвукового дефектоскопа (NL-камера) [49], электрическим методом в соответствии с ГОСТ Р 55191-2012 [3], разработанным в диссертации методом с помощью разработанного лабораторного измерительного устройства. В качестве испытуемого объекта использовалась гирлянда из двух стеклянных высоковольтных изоляторов (марки ПС-70Е), один из которых имел дефект.

Ультразвуковой дефектоскоп с помощью 124 сфазированных параболических микрофонов оценивает уровень звука с последующим наложением на изображение (рис. 2.22) и распределением разрядов по фазе сетевого напряжения (рис.2.23). Ранее о приборе упоминалось в п.1.2.1 диссертации.

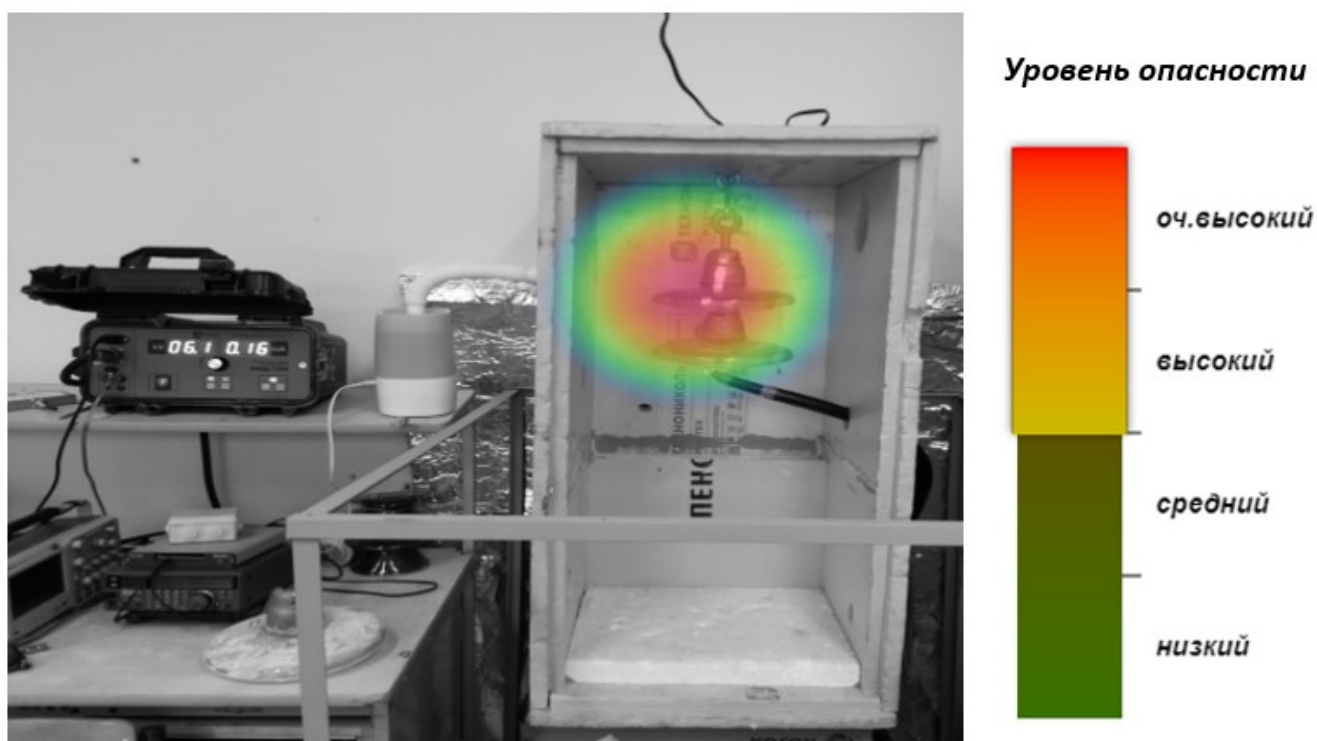


Рис. 2.22. Регистрация ЧР ультразвуковым дефектоскопом



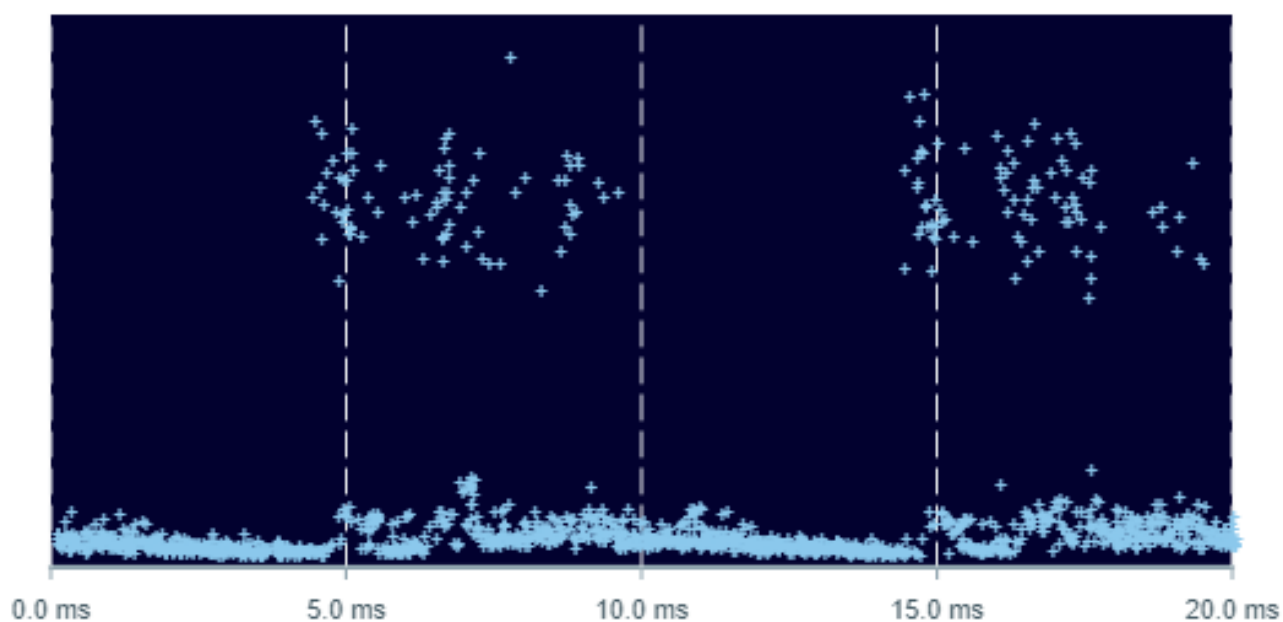


Рис. 2.23. Фазовое распределение ЧР, по оси x – время, мс; по оси y – амплитуда в усл. ед.

Ультразвуковой дефектоскоп в режиме реального времени анализирует зарегистрированные ЧР. Прибор имеет возможность определять тип ЧР (коронный разряд, плавающий разряд, поверхностный или внутренний разряд) и определять по степени аварийности для дальнейшей работы (очень высокий, высокий, средний, низкий).

С помощью ультразвукового прибора было получено следующее описание: «Зарегистрированный разряд является поверхностным разрядом. Наиболее опасными являются частичные разряды, которые возникают на поверхности изоляционных материалов или внутри них. Если вовремя не устранить причину их возникновения, их интенсивность будет нарастать и со временем они могут привести к полному разрушению изоляции. Распределение PRPD поверхностных и внутренних разрядов имеет схожую картину, поэтому они классифицируются как принадлежащие к одной и той же категории. Зачастую для определения того, где возникает разряд, — на поверхности изоляционного материала или внутри него, — требуется более тщательный осмотр. Частичные разряды, обнаруженные на подвесных изоляторах и на изоляции опор, с большой долей вероятности

возникают на поверхности, тогда как разряды в проходных изоляторах и кабельных выводах могут возникать как внутри изоляционных материалов, так и на их поверхности.

Причиной частичных разрядов по поверхности изолятора могут служить загрязнения, повреждения или дефекты поверхности изолятора. Также могут возникать дуговые разряды, когда одни области изолятора влажные, а другие сухие. Поверхностные разряды приводят к повреждению главным образом органических изоляционных материалов. В конечном итоге они могут привести к воспламенению всего изолятора. На возникновение поверхностных разрядов в основном влияют условия окружающей среды, такие как относительная влажность и температура, поэтому их следует учитывать при планировании осмотров оборудования. Когда речь заходит о поверхностных разрядах, также может применяться периодическое отслеживание таких разрядов. Данный вид ЧР может привести к разрушению изоляторов и прекращению подачи электроэнергии».

Электрическим методом с помощью осциллографа (рис. 2.13, поз.7) измерялась амплитуда кажущегося заряда на контактном датчике (поз. 3) и фаза сетевого напряжения с помощью датчика фазы (поз.6).

Схема проведения измерений посредством электрического метода представлена на рис. 2.24. Измерительный элемент (датчик) в цепи расположен со стороны заземления испытуемого объекта. В этом случае низковольтная сторона испытуемого объекта имеет возможность быть изолированной от земли.

Контактным методом проводилось измерение следующих характеристик:

- определения отсутствия ЧР в изоляции при нормированном напряжении, интенсивность которых равна или выше нормированного значения;
- определения характеристик ЧР при нормированном напряжении;
- определения напряжения возникновения и напряжения затухания ЧР в изоляции,
- определение наличия ЧР, относительно фазы переменного напряжения.

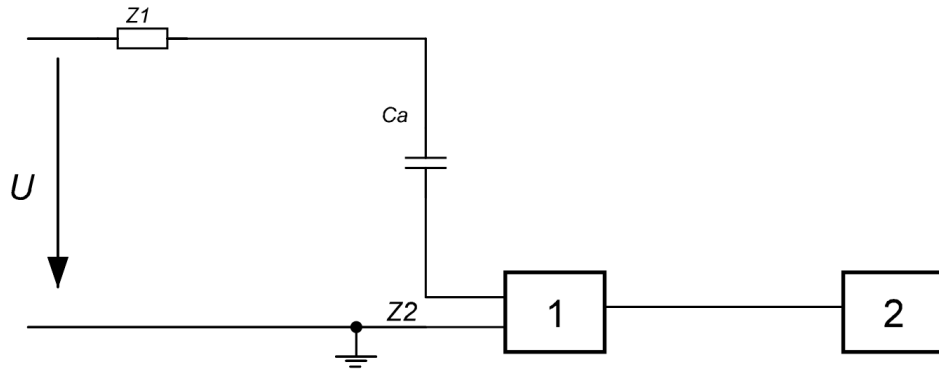


Рис. 2.24. Схема электрического метода измерений

( $U_{\sim}$  – источник высокого напряжения;  $Z_2$  – входной импеданс измерительной системы;  $C_a$  - испытуемый объект; 1 – измерительный элемент; 2 - измерительный прибор;  $Z_1$  – фильтр) [6]

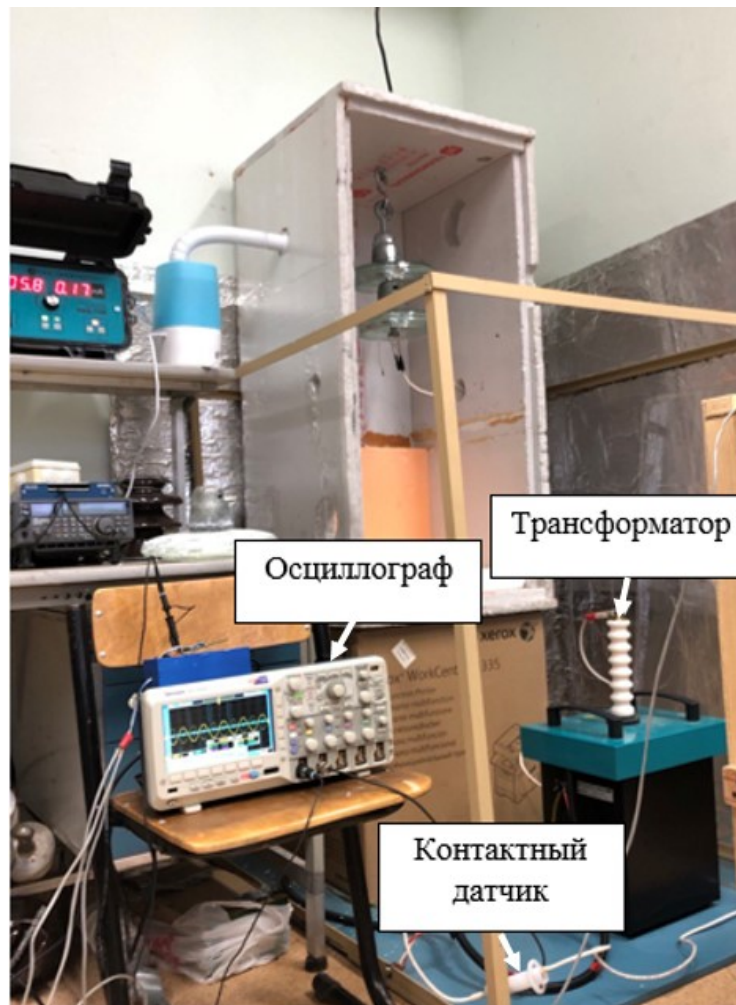


Рис. 2.25. Изображение лабораторной установки для проведения измерений электрическим (контактным) методом

На рис. 2.26 представлено амплитудное распределение ЧР, полученное за 1 период сетевого напряжения.

В результате экспериментов в положительном полупериоде было установлено начало возникновения ЧР  $\varphi_1$  при  $40 (\pm 10)$  градусов фазы сетевого напряжения, в отрицательном начало возникновения ЧР  $\varphi_2$  при  $195 (\pm 10)$  град. При калибровке системы было установлено, что кажущийся заряд приравнялся 100 пКл.

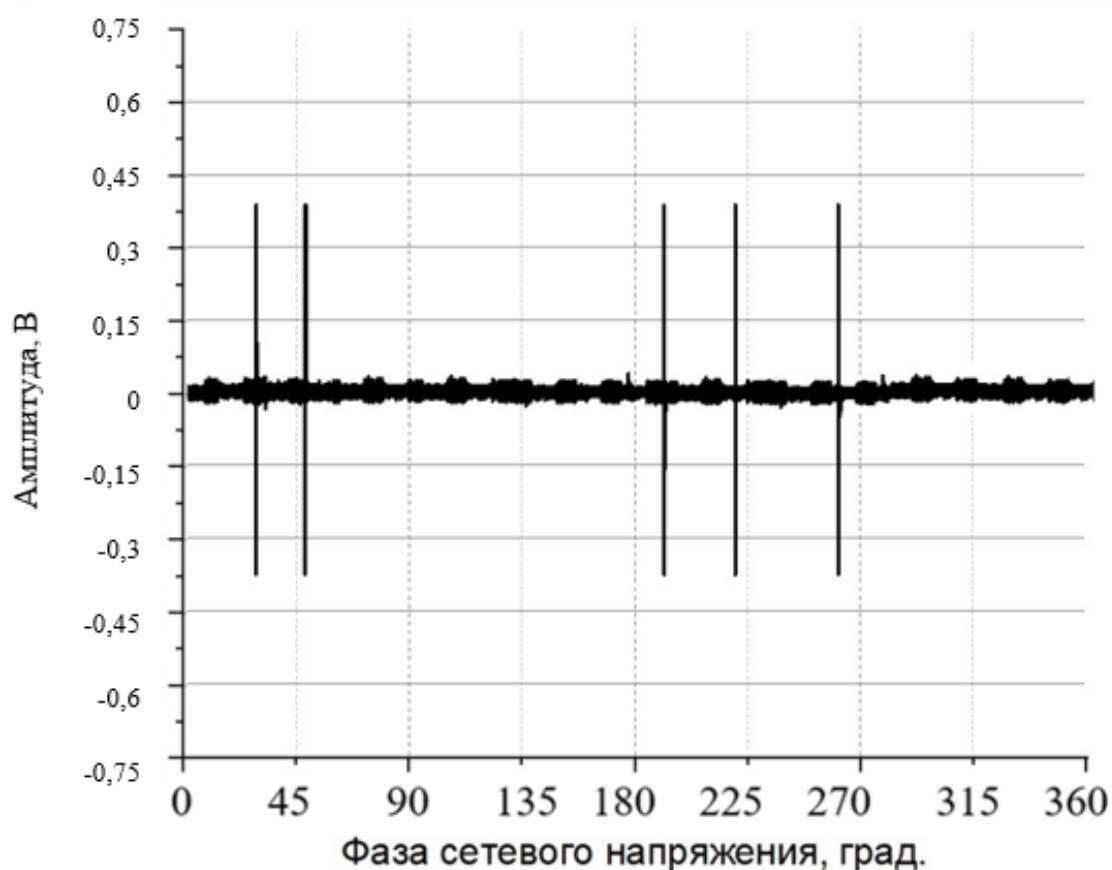
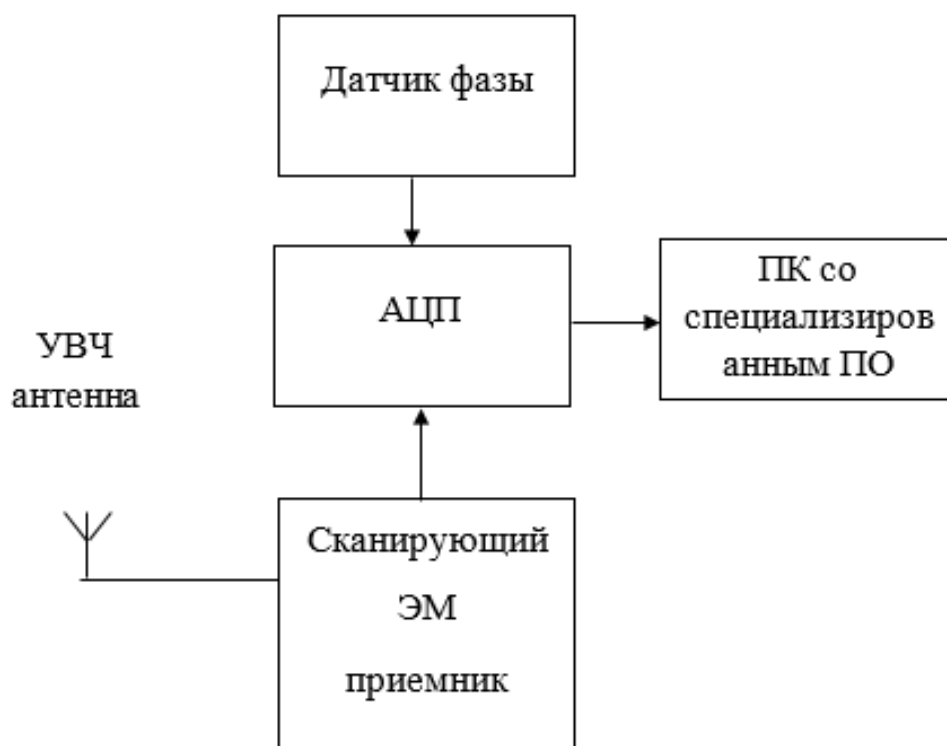
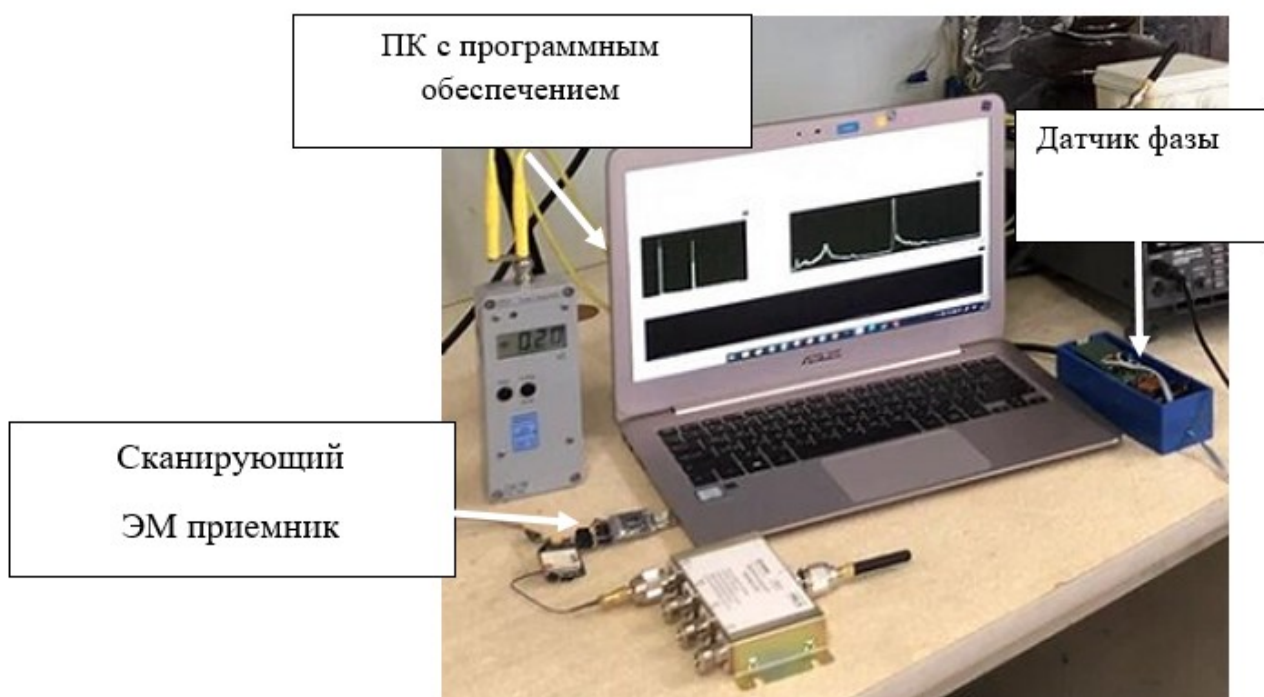


Рис. 2.26. Распределение ЧР относительно одного периода сетевого напряжения

Одновременно с контактным методом проводились измерения с помощью метода измерения электромагнитного излучения, вызванного ЧР. Схема проведения эксперимента по разработанному методу представлена на рис. 2.5. Для регистрации ЭМ излучения ЧР использовалось разработанное измерительное устройство (рис.2.27). Принципиальная схема представлена в Приложении Б.



а



б

Рис. 2.27. Измерительное устройство - лабораторный образец:

а) схема б) внешний вид

На рис.2.28 представлено фазовое распределение ЧР, полученное методом определения средней мощности ЭМ излучения с синхронным накоплением по фазе

сетевого напряжения [А7]. Данные получены с помощью измерительного устройства (рис.2.27) и по алгоритму, описанного на рис.2.12. методом. По оси «у» – напряженность поля в зоне измерения ЧР, В/м.

В положительном полупериоде фаза начала возникновения ЧР в среднем равнялась  $\varphi_1 = 30-40$  градусам, в отрицательном  $\varphi_2 = 195-205$  град.

Была проведена серия экспериментов, где сравнивались два метода: электрический и разработанный. Приведенная погрешность разработанного в диссертации метода в сравнении с электрическим методом по началу возникновения ЧР составила 5,3%.

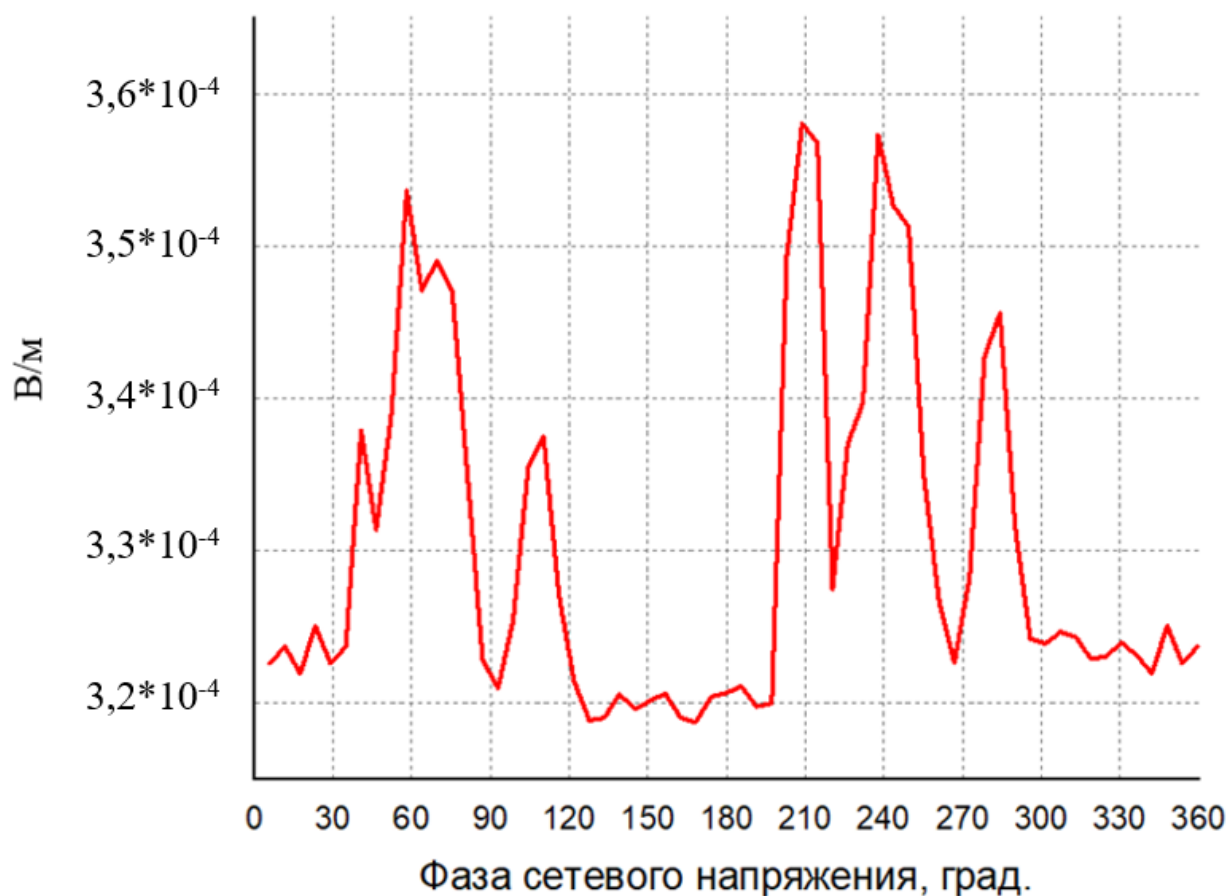


Рис. 2.28. Фазовое распределение ЧР, полученное разработанным методом (ось x – фаза сетевого напряжения в градусах, ось y – напряженность поля в зоне измерения ЧР, В/м)

### **2.3. Экспериментальное обоснование влияния относительной влажности на среднюю мощность электромагнитного излучения ЧР**

Как описано в первой главе диссертации в п.1.3, поверхностные и внутренние дефекты в ВИ, а также загрязнения при подаче высоковольтного напряжения вызывают ЧР. Внутренние дефекты в ВИ сложнее зарегистрировать с помощью электромагнитного излучения в связи с отсутствием контакта дефекта с внешней средой. Но они и развиваются обычно намного медленнее поверхностных [100]. ПЧР могут образовывать полный пробой изолятора. Поэтому в данной диссертации рассматриваются поверхностные дефекты и загрязнения, как более распространенные случаи создания аварийных ситуаций на ВЛЭП.

С целью проведения исследований поверхностные дефекты в ВИ и загрязнения ВИ были объединены в одну группу, в соответствии с п. 1.3 диссертации.

Нами были проведены исследования влияния относительной влажности окружающего воздуха на среднюю мощность ЭМ излучения ЧР. В климатической камере установлена гирлянда из двух стеклянных изоляторов, загрязненных в соответствии с ГОСТ 10390-86 [101] (рис.2.31).

Эксперименты проводились при одном и том же напряжении, для относительной влажности 64% и 99% в течение 30 минут.

В результате эксперимента было обнаружено увеличение напряженности электромагнитного излучения минимум в 2 раза (рис. 2.30), что позволяет сделать вывод о необходимости проведения измерений при максимальной относительной влажности для определения степени аварийности в зависимости от загрязнений и наличия дефектов.

Экспериментально обосновано, что средняя мощность ЭМ излучения ЧР при загрязнении и поверхностных дефектах стеклянных изоляторов увеличивается при увеличении относительной влажности. Поэтому целесообразно уровень состояния ВИ определять при 100% относительной влажности, так как при более низких значениях влажности однозначно интерпретировать результаты контроля нельзя.



Рис. 2.29. Экспериментальная установка

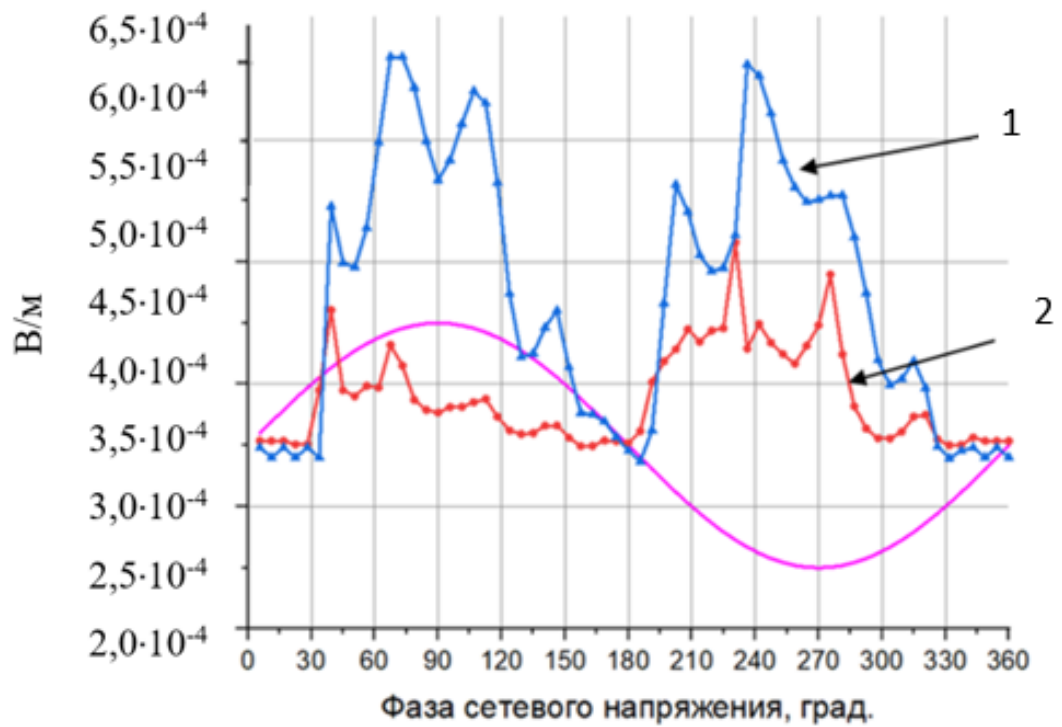


Рис. 2.30. Результаты испытания ВИ при различных уровнях относительной влажности: 1 – данные полученные при влажности 99%, 2 – при влажности 64%. Синей линией с треугольными маркерами представлена кривая, полученная при влажности 99%, красной с круглыми маркерами – 64%



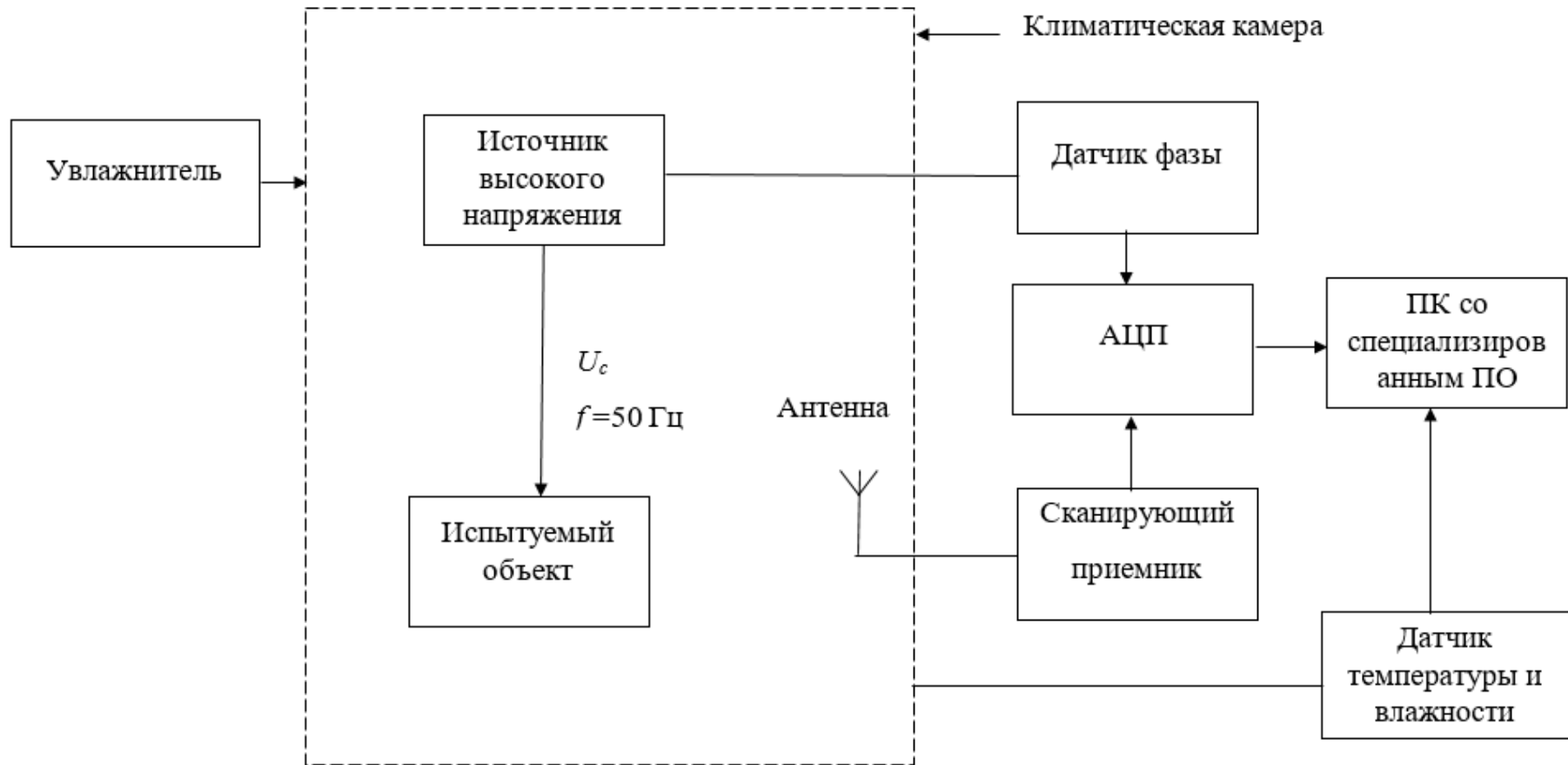


Рис. 2.31. Схема лабораторной установки эксперимента по определению влияния относительной влажности на ЧР

## 2.4. Критерии оценки трех состояний стеклянных ВИ для разработанной системы мониторинга

На основании ГОСТов [101-102], научных работ [103-106], на основании результатов сертифицированного ультразвукового дефектоскопа NL Camera (который классифицирует техническое состояние изоляции по степеням опасности дефектов), а также на основании собственных экспериментов [А3] были установлены критерии для трех уровней состояний стеклянных изоляторов: «нормальное», «ухудшенное» (есть риск пробоя) и «предаварийное» (предельный риск, необходима замена или очистка от загрязнений). Три состояния изоляторов имитировались с помощью различного уровня загрязнения с различной плотностью солевых отложений на поверхности изолятора в соответствии с ГОСТ [101, 102].

Критерием для каждой степени установлено напряжение возникновения частичных разрядов или фазовый угол начала возникновения ЧР.

Согласно ГОСТ 10390-2015 испытания загрязненных изоляторов должны проводиться в камере тумана для увлажнения загрязненной поверхности до насыщения. После этого к изоляторам прикладывается рабочее переменное напряжение, значение которого остается неизменным в течение экспериментов.

По результатам измерения определяется разрядное напряжение. С помощью разработанного метода и измерительного устройства регистрируется среднее значение мощности протекающих разрядных процессов. Результаты определения разрядного напряжения и среднего уровня мощности сравниваются для определения уровня аварийности вследствие естественного загрязнения и дефектов изоляции. Согласно ГОСТ 1516.2-97 [90], ГОСТ 10390-2015 [89] для определения степени аварийности можно использовать 50%-ное разрядное напряжение ( $U_{50\%}$ ), определяемое при максимальной относительной влажности.

Были проведены экспериментальные исследования стеклянных высоковольтных изоляторов ПС70Е с различными степенями загрязнения и искусственных дефектов. Все измерения проводились при относительной

влажности  $97\% \pm 3\%$ .

Измерения проводились следующими приборами: разработанным измерительным устройством, электрическим методом с помощью осциллографа, ультразвуковым дефектоскопом NL Camera и сканирующим приемником AOR AR5001D.

В качестве загрязняющих веществ применялись: суспензия, содержащая в своем составе инертное связующее вещество (каолин) в количестве 40 грамм, воду (1000 мл) и поваренную соль (NaCl) в различных количествах, в зависимости от уровня загрязнения [100, 101].



Рис.2.31. Искусственно загрязненные изоляторы и разбитый изолятор:

1. «нормальное» состояние изолятора (плотность покрытия  $0,06 \text{ мг/см}^2$ );
2. «ухудшенное» состояние изолятора (плотность покрытия  $0,2 \text{ мг/см}^2$ );
3. «предаварийное» состояние изолятора (плотность покрытия  $0,4 \text{ мг/см}^2$ );
4. разбитый изолятор

Определение работоспособности проводилось с помощью ультразвукового дефектоскопа «NL Камера». Данный сертифицированный прибор классифицирует полученные данные о ЧР по 4 категориям: Очень высокий и высокий уровень опасности (в нашем случае, это предаварийное состояние, требующее замены ВИ или срочного очищения от загрязнения, дальнейшая эксплуатация опасна); средний уровень опасности (в нашем случае, это ухудшенное состояние, не требующее замены или очищения) и низкий уровень (в нашем случае, нормальное состояние).

С целью верификации в одинаковых условиях по одинаковому алгоритму с синхронными накоплением и регистрацией фазы сетевого напряжения (рис. 2.12) измерения проводились двумя различными приемниками (схема представлена на рис.2.32):

1. с помощью разработанного измерительного устройства (рис.2.27) «Приемник-1» (частота дискретизации 2,5 кГц).

2. с помощью сертифицированного широкополосного сканирующего приемника AOR AR5000A «Приемник-2» (супергетеродинный приемник; диапазон частот: 40 кГц – 3,15 ГГц; квадратурная модуляция, чувствительность 2,0 мкВ [107]). Измерения проводились на такой же частоте, как и у Приемника-1 – 868 МГц, полоса измерения 220 кГц. Амплитудная модуляция.

Приемник AOR AR5001D является супергетеродинным радиоприёмником – это один из типов радиоприёмников, основанный на принципе преобразования принимаемого сигнала в сигнал фиксированной промежуточной частоты (ПЧ) с последующим её усилением. Основное преимущество супергетеродина перед радиоприёмником прямого усиления в том, что наиболее критичные для качества приёма части приёмного тракта (узкополосный фильтр, усилитель ПЧ и демодулятор) не должны перестраиваться по частоте, что позволяет выполнить их со значительно лучшими характеристиками.

Оба устройства работали по алгоритму метода синхронного накопления сигналов ЧР и регистрации фазы сетевого напряжения. Для обработки данных было разработано программное обеспечение [A11, A13]: «Программный комплекс записи и обработки сигналов частичных разрядов в процессе мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов»; «Программа обработки диагностической информации, регистрируемой электромагнитным датчиком частичных разрядов».

При испытании имитировалась ВЛЭП 35 кВ, поэтому в гирлянде было установлено 3 изолятора. На гирлянду подавалось фазное напряжение 20,6 кВ. Длительность измерений составляла 30 минут, это 90 000 периодов сетевого напряжения накопленных данных.

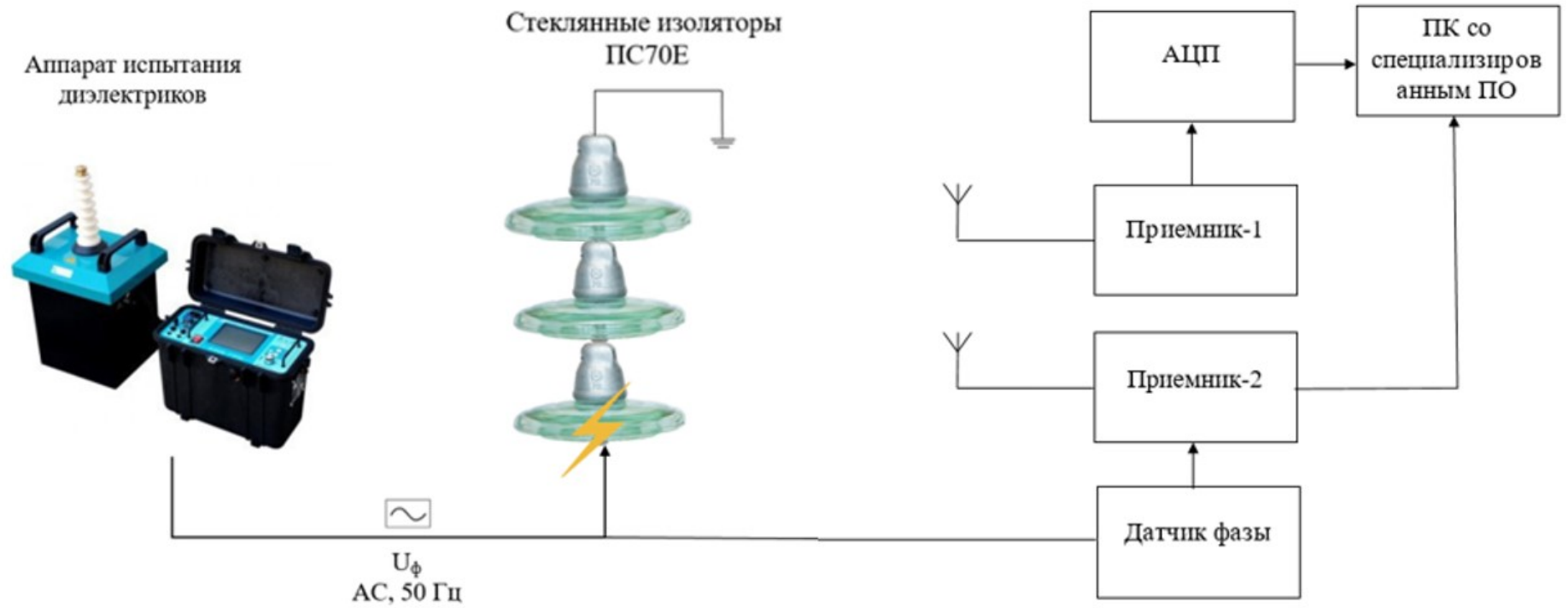


Рис.2.32. Схема проведения эксперимента

Исследование группы высоковольтных изоляторов с нормальным техническим состоянием представлено на рис. 2.33. Красная линия с квадратными маркерами (№1) – данные по среднему уровню мощности ЭМ излучения, полученные с помощью Приемника-1, черная линия (№2) – с Приемника-2.

Имеются ЧР невысокой амплитуды, с помощью электрического метода осциллографом было установлено, что разряды имели амплитуду порядка 1 пКл. Ультразвуковой дефектоскоп NL-Camera определил степень опасности как низкую (рис.2.34). Напряженность в поле измерения электромагнитным методом равна  $2,5 \cdot 10^{-4}$  В/м, напряжение возникновения разрядов 20 кВ, фазовый угол начала возникновения ЧР в 80-90 градусов и 260-270.

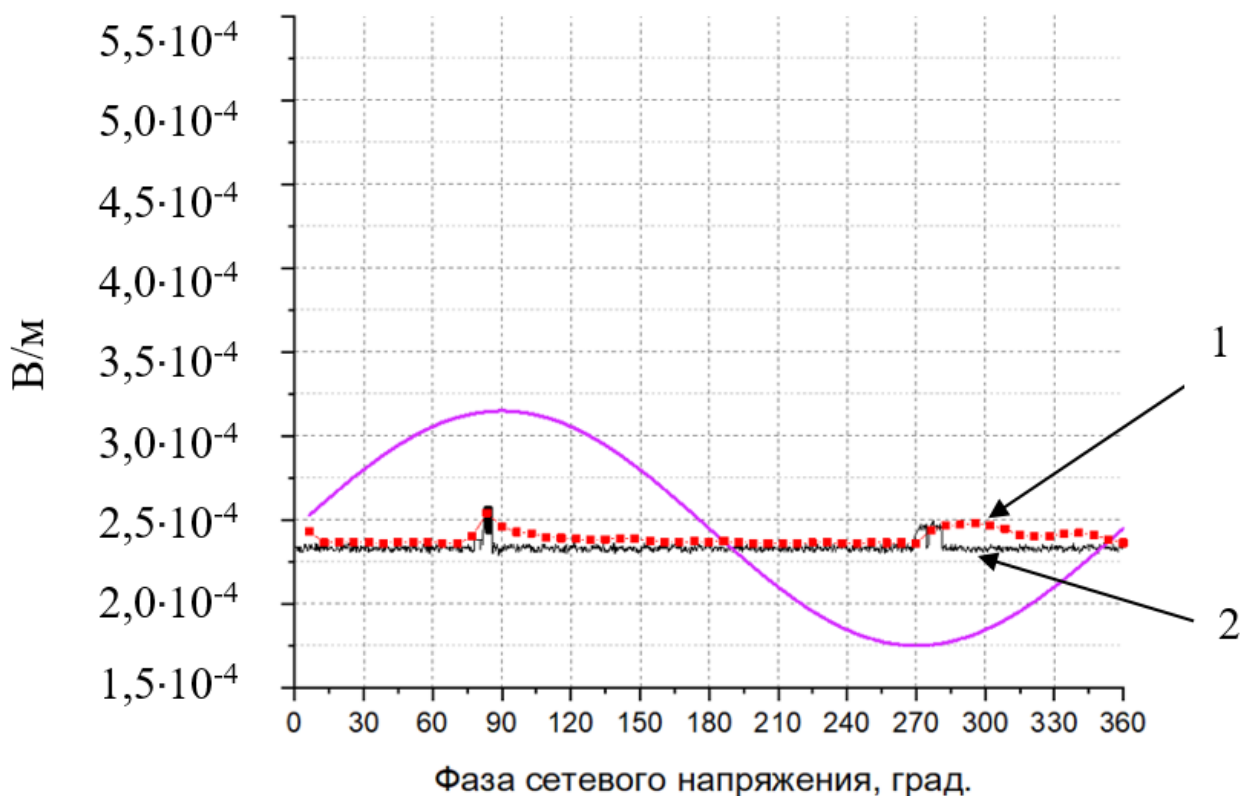


Рис. 2.33. Амплитудно-фазовое распределение ЧР изоляторов с нормальным состоянием, получено с помощью: 1 – Приемника-1; 2 – Приемника-2; напряжение возникновения разрядов 20 кВ, фазовый угол начала возникновения ЧР: 80-90 градусов и 260-270

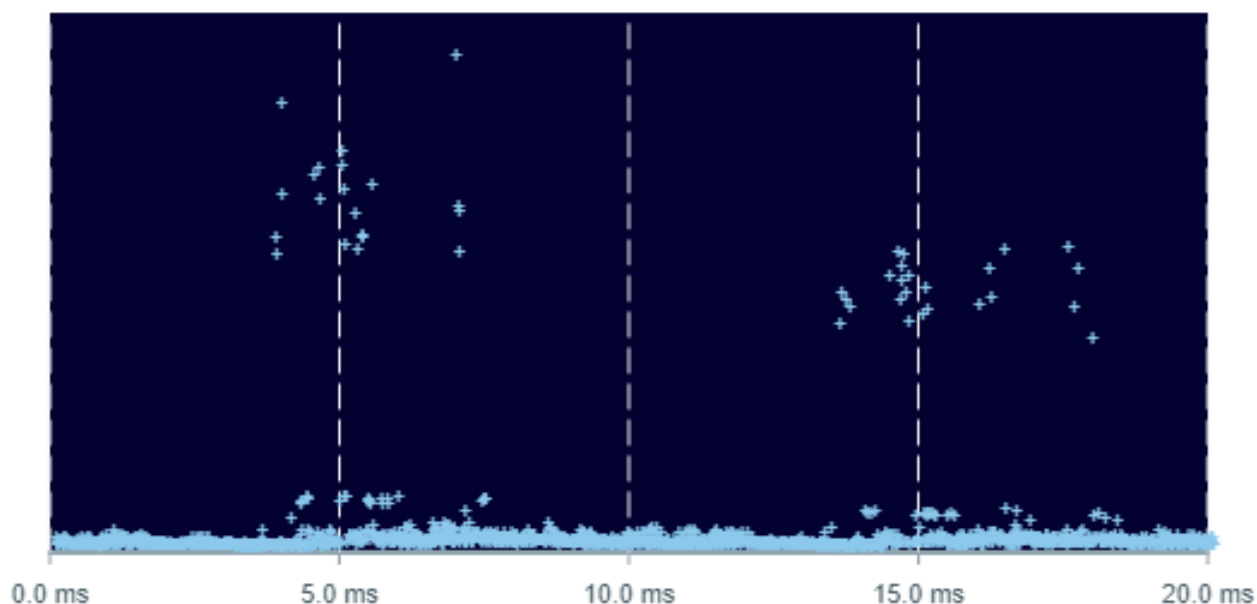


Рис. 2.34. Фазовое распределение в режиме накопления сигналов ЧР, получено с дефектоскопа NL-камера для изолятора с нормальным состоянием, ЧР были определены прибором как поверхностные

Результаты исследования группы высоковольтных изоляторов ухудшенным состоянием, представлено на рис. 2.35. Красная линия с квадратными маркерами (№1) – данные по среднему уровню мощности ЭМ излучения, полученные с помощью Приемника-1, черная линия (№2) – с Приемника-2.

Имеются ЧР порядка 50 пКл. Ультразвуковой дефектоскоп определил степень опасности как среднюю. Напряженность в поле измерения электромагнитным методом равна  $3,7 \cdot 10^{-4}$  В/м, напряжение возникновения разрядов 16 кВ, фазовый угол начала возникновения ЧР в среднем 45 и 225 градусов.

Результаты исследования группы высоковольтных изоляторов с предаварийным состоянием представлены на рис. 2.37. Красная линия с квадратными маркерами (№1) – фазовое распределение ЧР, полученные с помощью Приемника-1, черная линия (№2) – с Приемника-2.

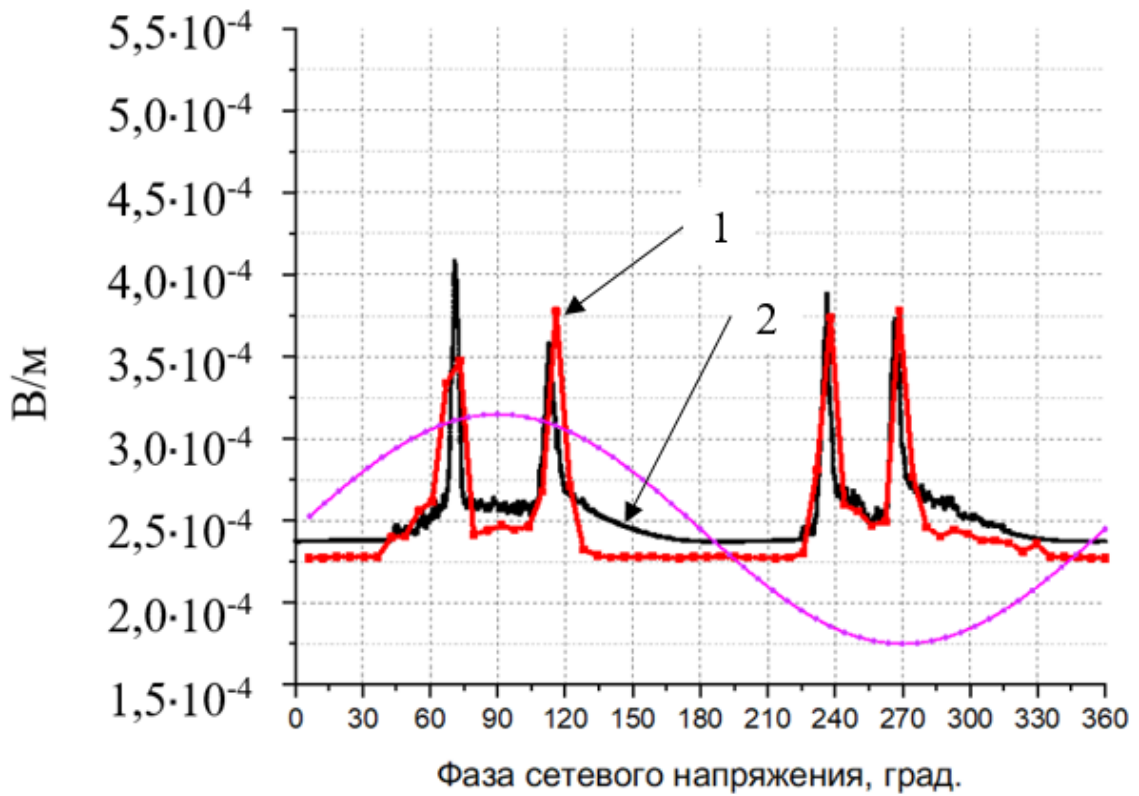


Рис. 2.35. Амплитудно-фазовое распределение ЧР изоляторов с ухудшенным состоянием, получено с помощью: 1 – Приемника-1; 2 – Приемника-2; напряжение возникновения разрядов 14,5 кВ, фазовый угол начала возникновения ЧР – 45 и 225 градусов

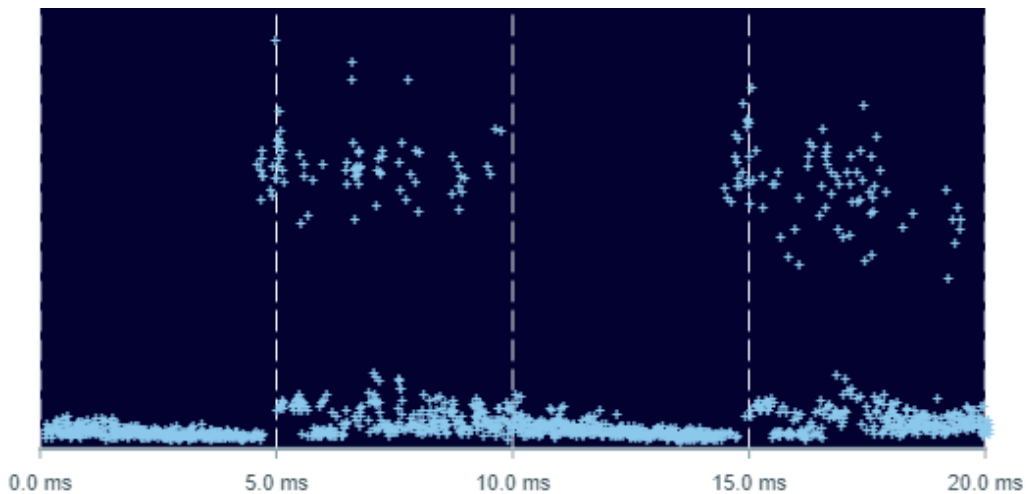


Рис. 2.36. Фазовое распределение в режиме накопления сигналов ЧР, получено с дефектоскопа NL-камера с ухудшенным состоянием, ЧР были определены прибором как поверхностные



Имеются ЧР порядка 100 пКл. Ультразвуковой дефектоскоп определил степень опасности как высокую. Напряженность в поле измерения электромагнитным методом равна  $4,3 \cdot 10^{-4}$  В/м, напряжение возникновения разрядов 7 кВ, фазовый угол начала возникновения ЧР в среднем – 20 и 200 градусов.

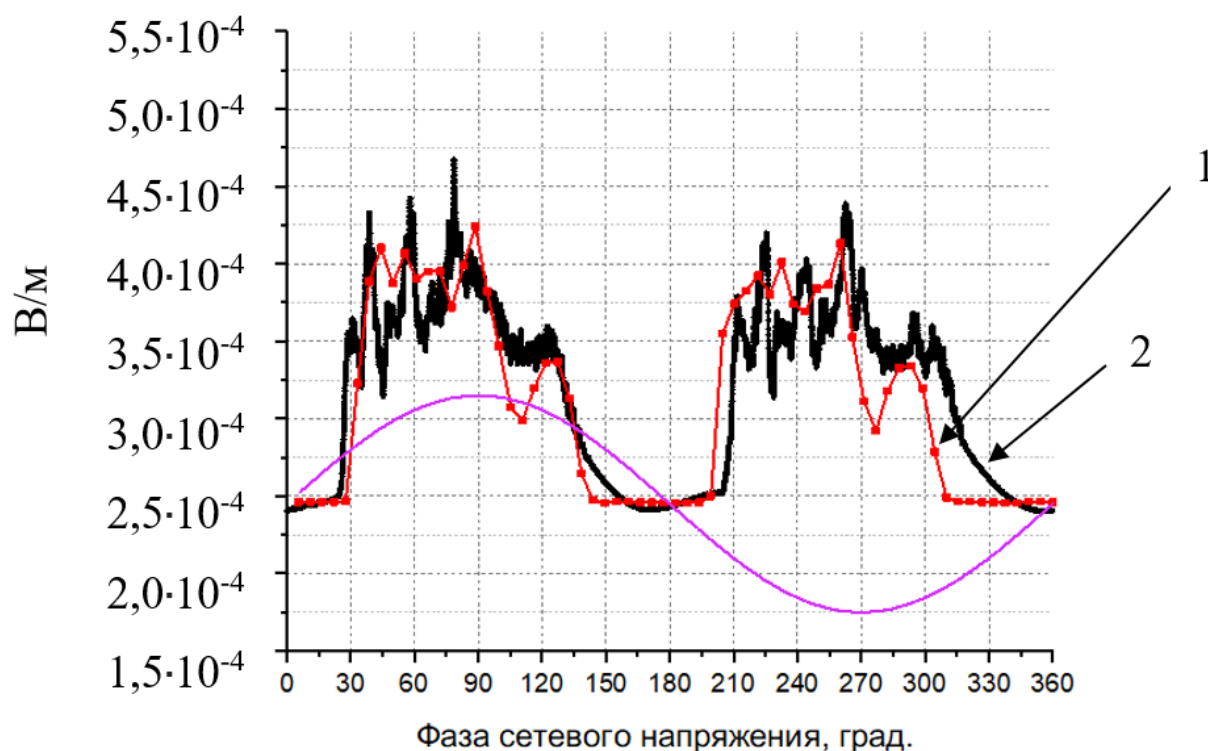


Рис. 2.37. Амплитудно-фазовое распределение ЧР изоляторов с предаварийным состоянием, получено с помощью: 1 – Приемника-1; 2 – Приемника-2; напряжение возникновения разрядов 7 кВ, фазовый угол начала возникновения ЧР – 20 градусов

Сравнение сигналов с трех типов гирлянд ВИ с различными уровнями состояния, выполненное с помощью разработанного метода и измерительного устройства, представлено на рис. 2.39.

На графике наблюдается снижение напряжения возникновения ЧР, и увеличение амплитуды в зависимости от увеличения загрязненности изоляторов. В ходе испытания выделены параметры характеристик ЧР.

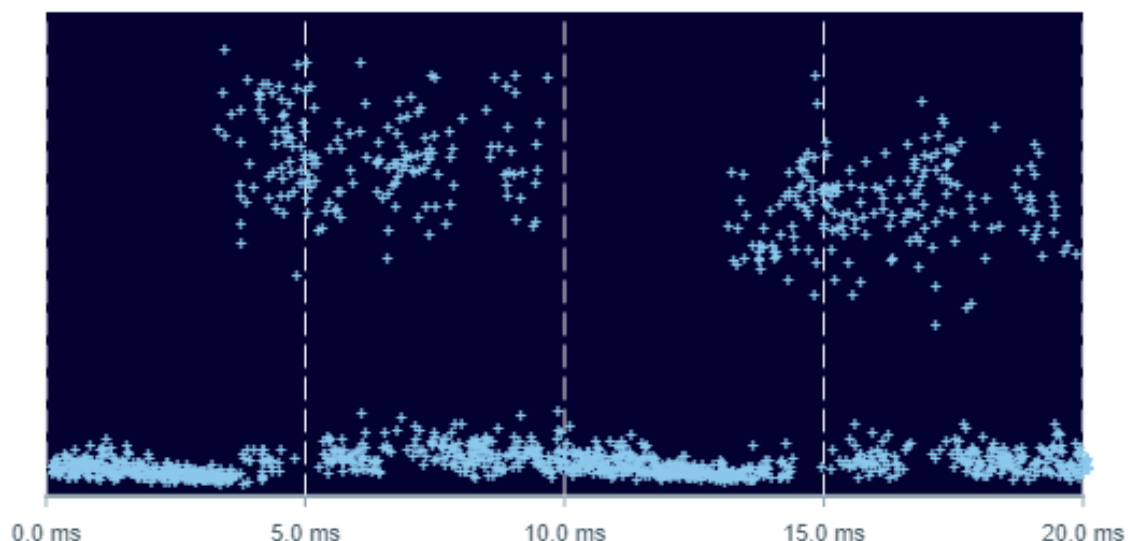


Рис. 2.38. Фазовое распределение в режиме накопления сигналов ЧР, получено с дефектоскопа NL-камера для изолятора с предаварийным состоянием, ЧР были определены прибором как поверхностные

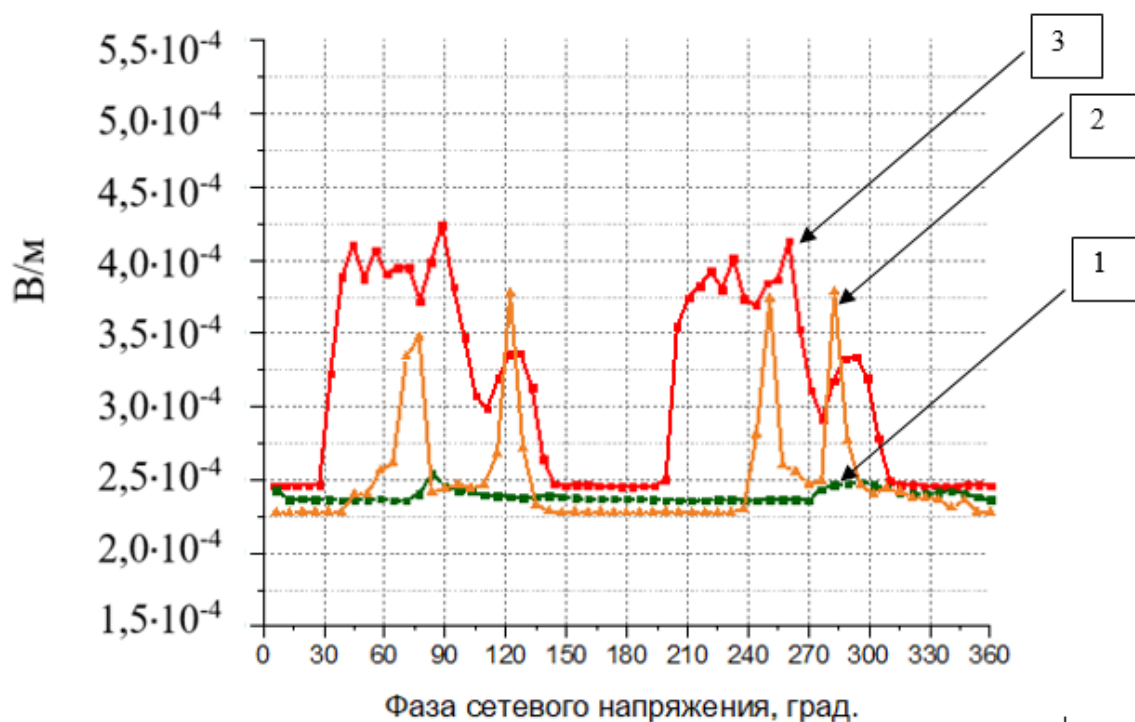


Рис. 2.39. Сравнение сигналов с трех групп гирлянд с различным уровнем загрязнения поверхности, полученное с помощью разработанного метода и Устройства: линия 1 – «нормальное» техническое состояние; 2 – «ухудшенное» (есть риск пробоя); 3 – «предаварийное» (предельный риск, необходима замена или очистка)

Таблица 2.10. Параметры для трех уровней состояния стеклянных высоковольтных изоляторов

Параметры	Состояние стеклянных ВИ		
	Нормальное	Ухудшенное	Предавварийное
Фазовый угол появления ЧР ( $\Delta\varphi$ ), град.	80-90	45-80	<45
Напряжение появления ЧР, кВ (для ЛЭП 35 кВ)	>20	14,5-20	<14,5

## Выводы по главе 2

На основе анализа способов локализации дефекта, было установлено, что определение разницы во времени прибытия сигналов ЧР до приемных устройств или сравнение амплитуд сигналов ЧР, являются сложными и дорогостоящими методиками, поскольку они требуют высоких вычислительных мощностей и синхронизации по времени, так как регистрируется каждый отдельный сигнал от ЧР.

Разработан метод мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов состояния высоковольтных изоляторов, регистрирующий ЧР в ВИ. Метод основан на регистрации с накоплением среднего уровня мощности ЭМ излучения и фазы сетевого напряжения. Метод не требует тактовой синхронизации по времени, что значительно уменьшает объем данных, и упрощает обработку.

Разработан лабораторный стенд для проведения испытаний и собран прототип измерительного устройства. На лабораторном стенде проведены испытания гирлянды стеклянных изоляторов с поверхностным дефектом. Исследования проводились различными способами: электрическим методом по ГОСТ55191, разработанным в диссертации методом и сертифицированным прибором, основанном на акустическом методе с помощью прибора NL Camera. Приведенная погрешность разработанного в диссертации метода в сравнении с

электрическим методом по фазному углу начала возникновения ЧР составила 5,3%, что свидетельствует о работоспособности предложенного метода.

В результате экспериментов установлено, что средняя мощность ЭМ излучения ЧР при загрязнении и поверхностных дефектах стеклянных изоляторов увеличивается при увеличении относительной влажности. Поэтому целесообразно состояние загрязнения или дефекта определять при 100%-ной относительной влажности, так как при более низких значениях влажности однозначно интерпретировать результаты контроля нельзя.

На основании ГОСТов [101-102] научных работ [103-106], 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 состояний стеклянных изоляторов: «нормальное», «ухудшенное» (есть риск пробоя) и «предаварийное» (предельный риск, необходима замена или очистка от загрязнений). Три состояния стеклянных изоляторов имитировались с помощью различного уровня загрязнения с различной плотностью солевых отложений на поверхности изолятора в соответствии с ГОСТ [101-102]. В качестве оценки состояния установлены фазовый угол и напряжение возникновения ЧР для каждого состояния.

### 3. РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СТЕКЛЯННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СОЗДАННОГО МЕТОДА

*(Материалы главы опубликованы в работах автора: А1, А4, А6, А8, А9, А12, А13)*

#### 3.1. Описание системы

Для установки на реальной ЛЭП на основе разработанного измерительного устройства, описанного во второй главе, было разработано устройство для эксплуатации на реальной ЛЭП, которое включает в себя (рис. 3.1) [А1, А9, А10, А13]:

- ЭМ приемник, измеряющий средний уровень мощности ЭМ излучения (модуль E70-868T14S2 [10], диапазон частот 861-876 МГц);

- датчик фазы (выполнен в виде металлической пластины в форме дуги, представляющей собой антенну для регистрации индуцированного фазным проводом ВЛЭП напряжения и его фазы. Он устанавливается перпендикулярно оси фазного провода);

- датчик температуры и относительной влажности;

- радиомодуль;

- микроконтроллер с АЦП (32-разрядный микроконтроллер SimpleLink™ Arm Cortex-M3);

- флеш-память.

Принципиальная электрическая схема устройства и спецификация представлены в Приложении Б. Внешний вид устройства представлен на рис. 3.2.

Три таких одинаковых откалиброванных устройства устанавливаются по одному на каждый фазный провод ВЛЭП. Вместе с пунктом сбора и обработки данных они формируются в группу для каждой опоры (рис. 3.3). Система представляет собой сеть из множества таких групп (одна группа на каждом пролете) на всей воздушной линии плюс компьютерная программа визуализации

на диспетчерском пульте [А5, А14]. Количество групп зависит от протяженности ЛЭП.

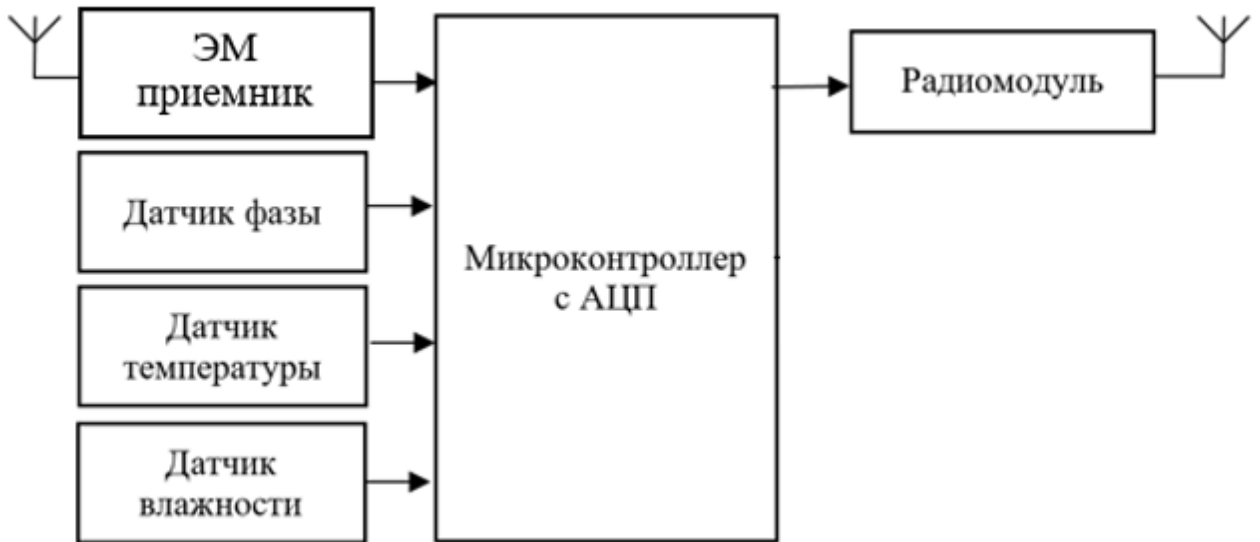


Рис. 3.1. Блок-схема устройства

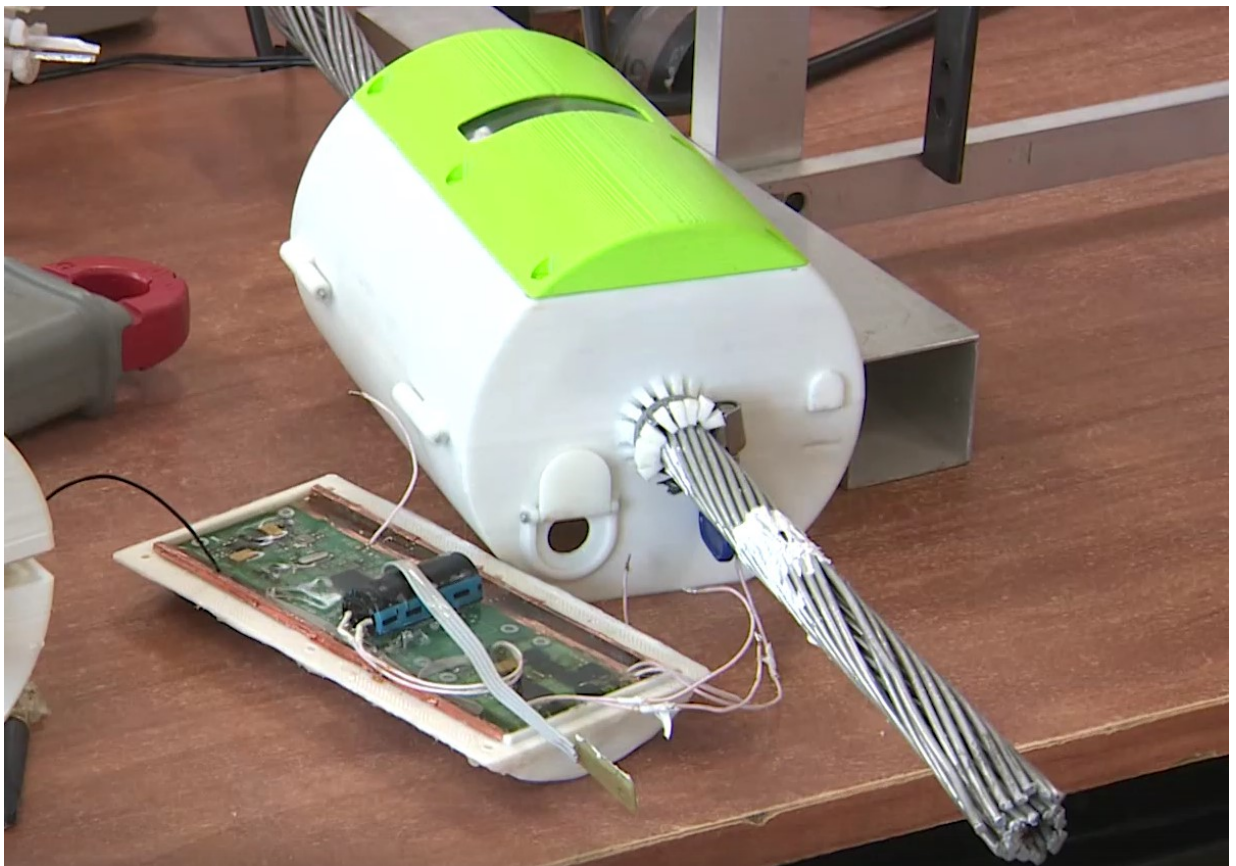


Рис. 3.2. Внешний вид устройства

Устройства измеряют и в режиме реального времени накапливают данные о средней мощности электромагнитного излучения ЧР, синхронизированной с фазой сетевого напряжения, учитывая относительную влажность окружающей среды. Принимается заключение об уровне состояния высоковольтных изоляторов (нормальное, ухудшенное и предаварийное). Система формирует заключение при 100%-ой относительной влажности окружающей среды (т.е. в период дождя, тумана, выпадения росы и т.д.), основываясь на фазовом угле возникновения ЧР и напряжении возникновения ЧР по таблице 2.10. При приближении к указанной влажности Система накапливает данные каждые 10 тыс. периодов сетевого напряжения и отправляет данные на диспетчерский пункт. При меньшей относительной 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.

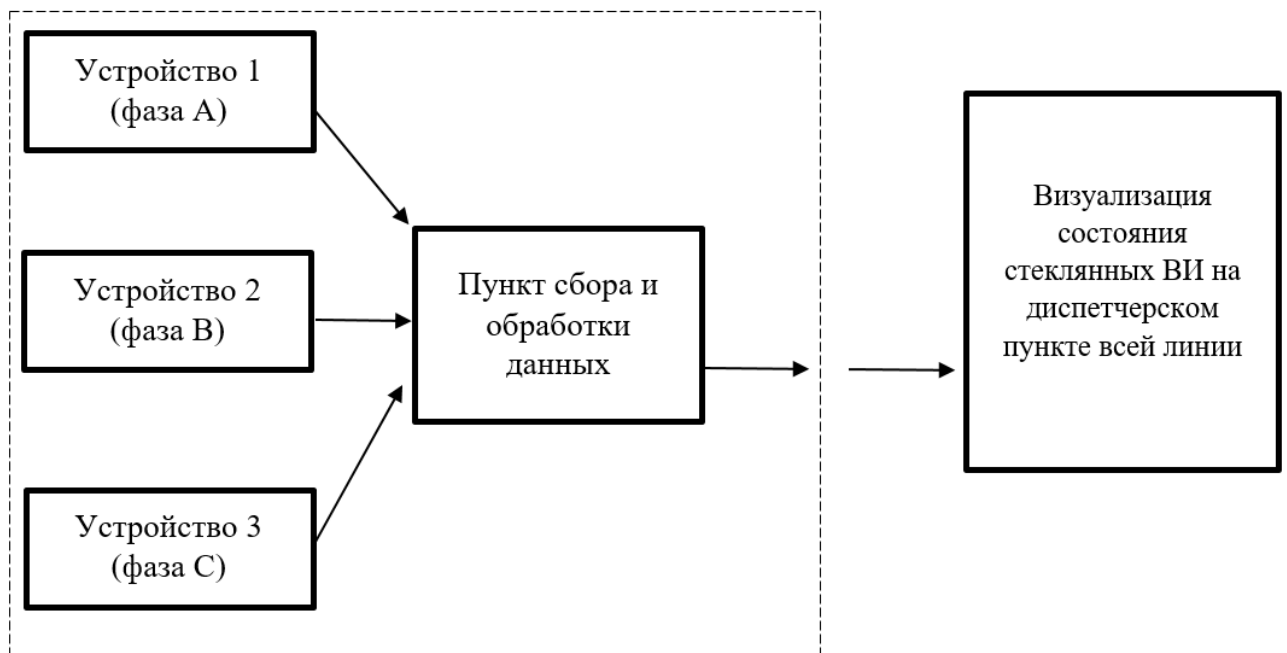


Рис. 3.3. Система контроля технического состояния ВИ

В пункте сбора и обработки данных производится локализация гирлянды изоляторов с загрязнением и поверхностным дефектом. Передача усредненных

данных с трех устройств по радиоканалу составляет 768 байт и осуществляется по беспроводному каналу (Zigbee) в соответствии с протоколом IEEE 15.4.

### 3.2. Локализация источника ЧР

Основываясь на [106, 108-110] в свободном пространстве точечный источник с мощностью  $P$  (Вт) на расстоянии  $r$  (м), излучает поток энергии, определяемый вектором Умова–Пойтинга:

$$\Pi = P / 4\pi r^2 \quad (3.1)$$

Известно, что среднее значение за период потока электромагнитной энергии выражается формулой:

$$\Pi = E_d H_d \quad (3.2)$$

Основные характеристики электромагнитного поля определяются его источником, окружающей средой и расстоянием от источника до точки наблюдения. В соответствии с этим окружающее антенну пространство, где существует электромагнитное поле, делится на ближнюю, промежуточную и дальнюю зоны излучения. Разработанные в диссертации устройства устанавливаются в дальней зоне излучения ( $r < \lambda/2\pi$ ), для которой характерно следующее соотношение действующего значения напряженности электрического поля радиоволны  $E_d$  (В/м) со значением напряженности магнитного поля радиоволны  $H_d$  (А/м) (используя штыревую антенну):

$$E_d / H_d = 120\pi \quad (3.3)$$

$120\pi$  – волновое сопротивление свободного пространства и выражается в Омах.

В дальней зоне как электрическая, так и магнитная составляющие поля затухают пропорционально  $1/r$ , где  $l$  – длина штыревой антенны,  $r$  – расстояние от источника до антенны.

В дальней зоне излучения средняя мощность  $P$  равна [106]

$$P = \frac{E_d^2 r^2}{30} \quad (3.4)$$



где  $E_d$  – действующее значение напряженности поля радиоволны (В/м),  $r$  – расстояние от источника. Отсюда

$$r = \frac{\sqrt{30P}}{E_d} \quad (3.5)$$

Расстояние от принимаемой антенны до источника излучения мы можем выразить также по формуле (2.3):

$$r = \frac{k^2 i \cdot l}{E_d 4\pi\omega\epsilon_a} \quad (3.6)$$

где  $E_d$  – действующее значение напряженности поля радиоволны;  $i$  – ток ЧР,  $l$  – длина пробойного промежутка,  $\omega$  – круговая частота колебаний,  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды,  $\lambda$  – длина волны,  $k$  – волновое число. Для одного дефекта, зарегистрированного устройствами  $\frac{k^2 il}{4\pi\omega\epsilon_a}$  будет неизменным коэффициентом. Изменяться будет только напряженность поля радиоволны в обратной пропорциональности от расстояния.

Таким образом, имея три устройства, закрепленные вблизи одной опоры, их координаты  $(x_i, y_i, z_i)$  и значения амплитуд  $U_i$  электромагнитных волн ЧР от изоляторов, измеренных каждым устройством, можно составить систему уравнений для определения расстояний  $r_i$  до устройств. Решение системы уравнений позволит определить пространственное положение гирлянды с ухудшенным и предаварийным состоянием (т.е. найти три расстояния до объекта  $r_1, r_2, r_3$  на рис.3.4).

Для проверки теории и с целью соотношения расстояния от источника ЧР до одного из устройств контроля был проведен эксперимент по регистрации затухания ЭМ сигнала от ЧР, в котором один ЭМ датчик отдаляли от источника известного искусственно созданного разряда на расстояния от 1 до 9 метров с шагом 1 метр и фиксировали в каждой точке значение мощности электромагнитного излучения [А7]. Схема эксперимента представлена на рис. 3.5.

В ходе эксперимента получена зависимость напряженности от расстояния

до источника, представленная на рис. 3.7, где черной линией (квадратные маркеры) указан полученный экспериментально график зависимости, а красной линией (круглые маркеры) – аппроксимация на основе алгоритма по уравнению (3.6).

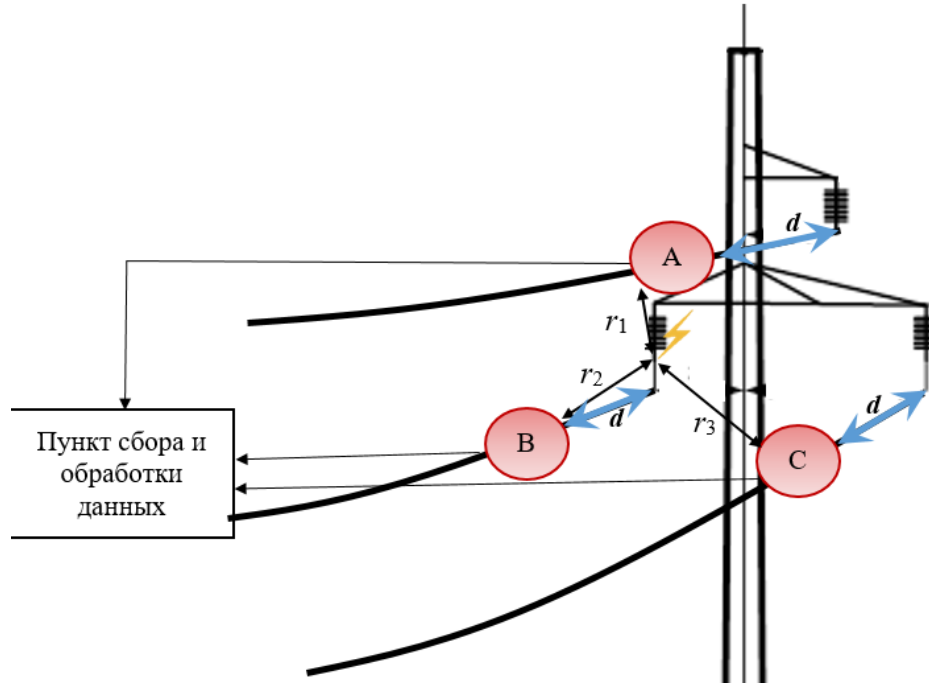


Рис. 3.4. Установленные устройства на ЛЭП, где  $A, B, C$  – сканирующие устройства на фазных проводах,  $r_1, r_2, r_3$  – соответствующие расстояния от устройства до гирлянды изоляторов с критической степенью аварийности, находятся по формуле (3.4),  $d$  – расстояние от точки подвеса провода до устройства

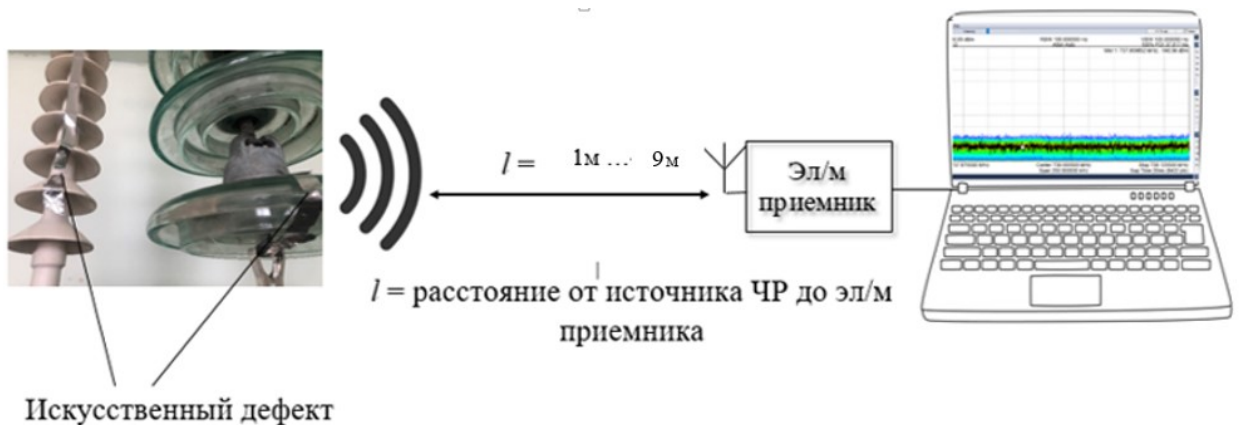


Рис. 3.5. Схема эксперимента по определению зависимости затухания ЭМ сигнала от расстояния

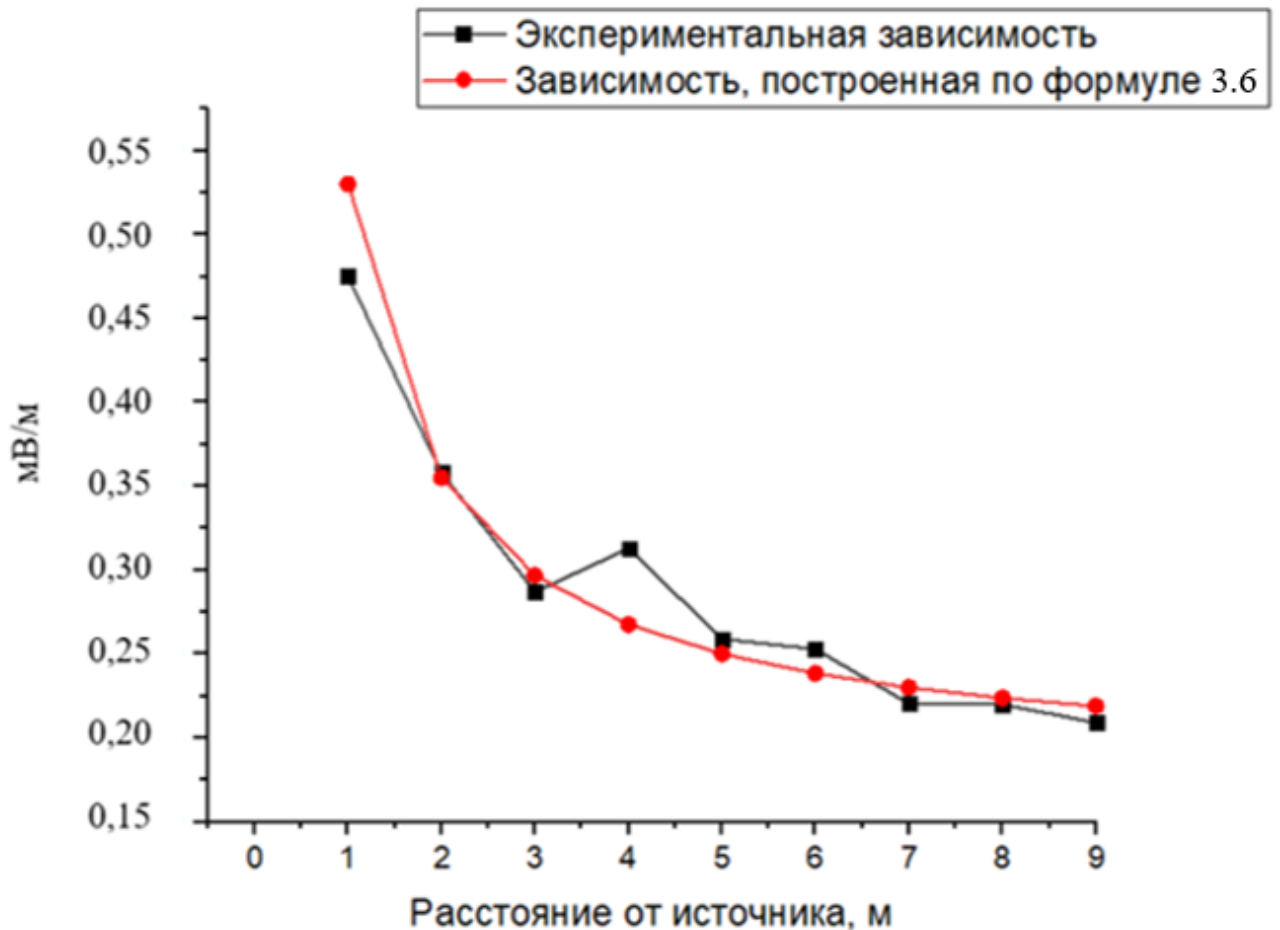


Рис.3.7. График зависимости напряженности поля радиоволны от расстояния Черной линией (квадратные маркеры) указан полученный экспериментально график зависимости, а красной линией (круглые маркеры) – по уравнению (3.4)

Коэффициент корреляции Пирсона между экспериментальными и модельными данными составил 0,93. Значение  $P$  (p-value) составляет  $8,7 \cdot 10^{-19}$ . Полученная зависимость уровня мощности ЭМ сигнала подтверждает возможность использования предложенного метода.

Таким образом, имея одно приемное устройство, по уровню мощности электромагнитного излучения мы можем определить расстояние до источника разряда, но не его пространственное положение. Для того чтобы определить последнее, нам необходимо еще минимум два таких же устройства.

### 3.3. Опытная эксплуатация системы дистанционного контроля высоковольтных изоляторов

С целью обеспечения круглосуточного функционирования системы дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов на ЛЭП, мы внедрили ее в качестве нового модуля диагностики ВИ в имеющуюся систему мониторинга СМГ-16, разработанную ранее в научно-исследовательской лаборатории КГЭУ [110]. СМГ-16 ранее диагностировала механические нагрузки на ВЛЭП, кручение провода, короткие замыкания и т.п.

СМГ-16 также устанавливается на каждый фазный провод, питается посредством трансформатора тока от самой линии и передает данные по радиоканалу (протокол Zigbee) по технологии Mesh-сети, которая обеспечивает передачу данных до диспетчерского пункта. С помощью добавления разработанного в диссертации нового модуля мониторинга ВИ в СМГ-16 появляется новая функция (рис.3.8). Данная модификация запатентована [А9, А10].



Рис. 3.8. Структурная блок-схема модернизированного устройства системы СМГ-16, модуль мониторинга ВИ представлена на рис. 3.1

Модернизированная система с разработанным нами модулем мониторинга ВИ внедрена в опытную эксплуатацию в ПАО «Татнефть» на ЛЭП 35 кВ около подстанции №204 (рис.3.9). Данный модуль в составе СМГ-16 успешно функционирует с марта 2022 года.



Рис. 3.9. Модернизированная Система, установленная на ЛЭП 35 кВ в ПАО «Татнефть»

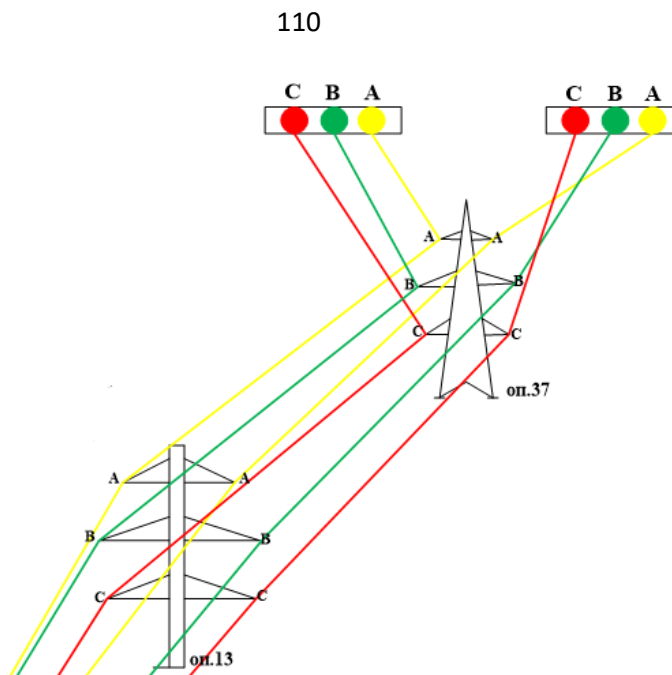


Рис.3.10. Схема фаз линии 35 кВ в ПАО «Татнефть»

Результат измерений одной группы за 10 тысяч периодов сетевого напряжения (т.е. с трех устройств, установленных на каждом фазном проводе и работающих синхронно) представлен на рис. 3.11-3.13.

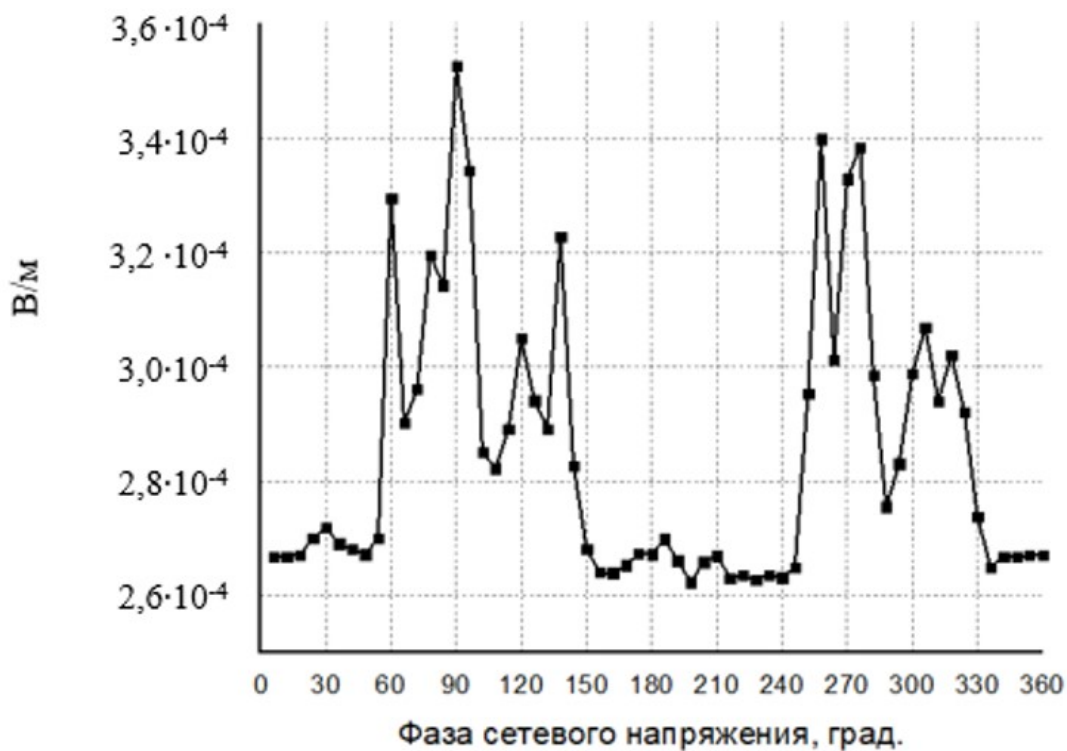


Рис. 3.11. Данные с устройства, установленного на фазе А

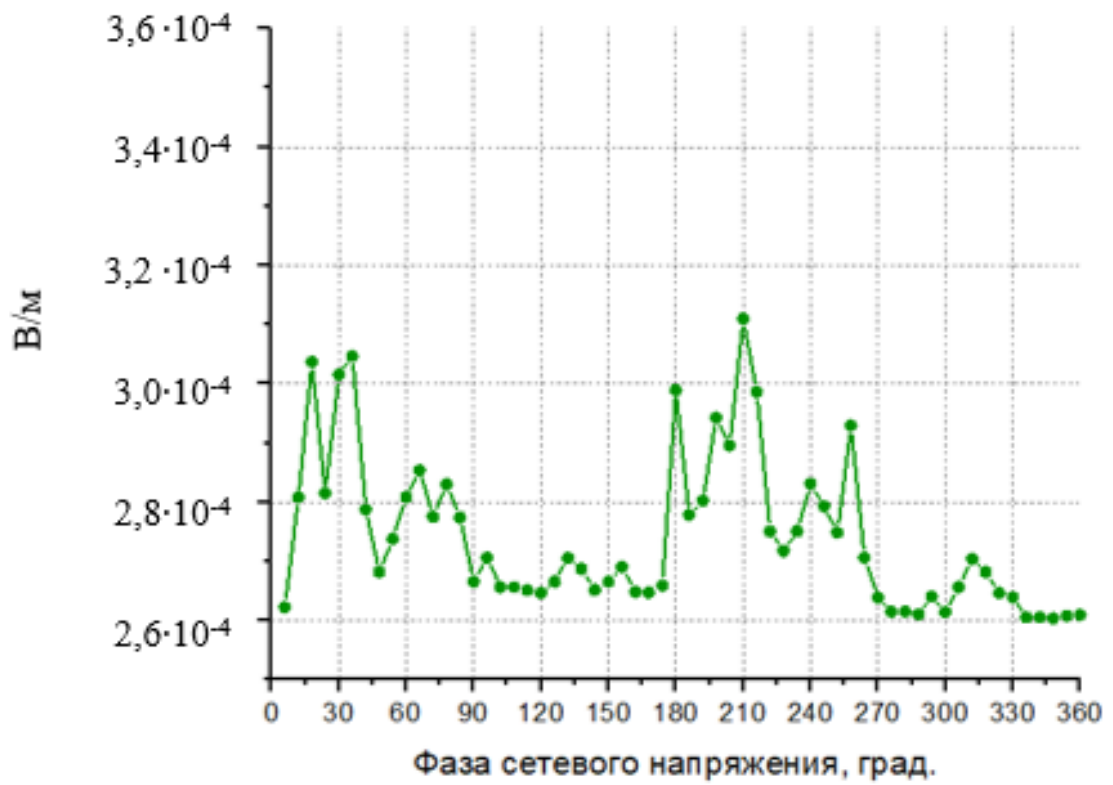


Рис. 3.12. Данные с устройства, установленного на фазе В

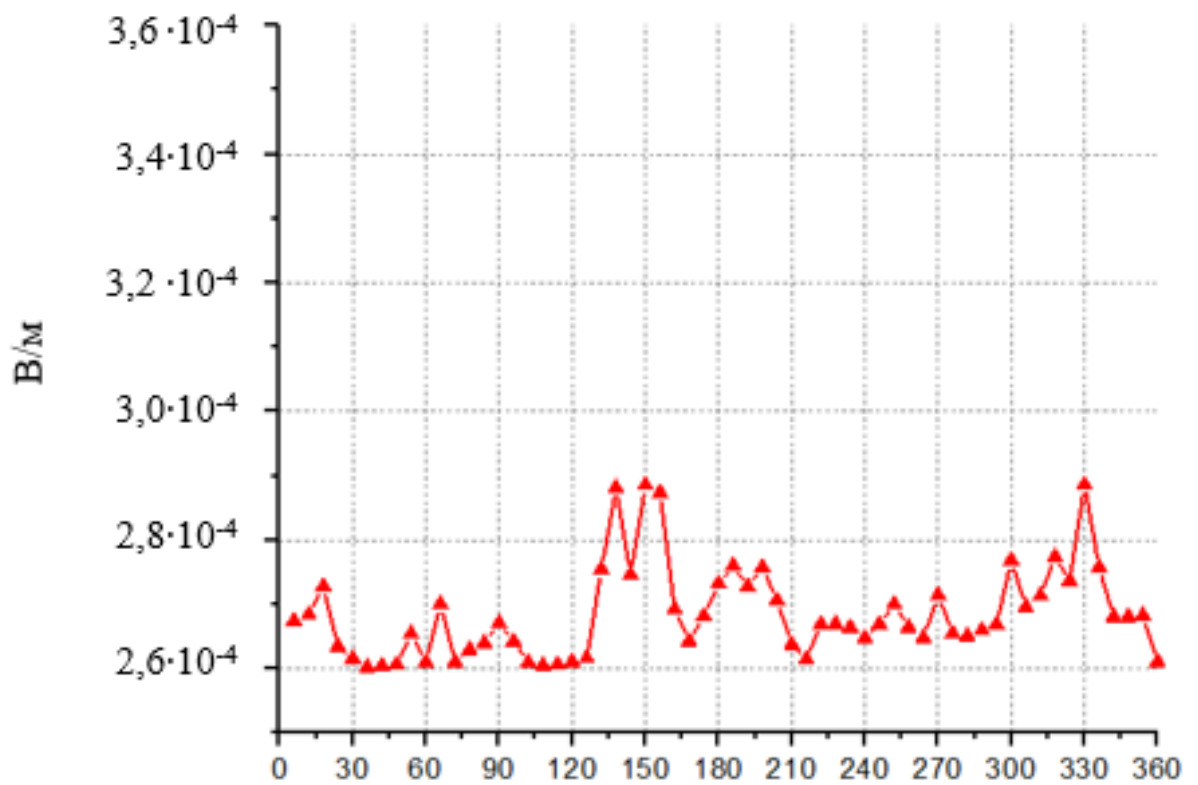


Рис. 3.13. Данные с устройства, установленного на фазе С

Для сравнения амплитуд совместим данные на одном графике, сместив Фазу В и фазу С к фазе А.

Данные, полученные с трех устройств, приведенные к одной фазе для возможности увидеть корреляцию формы данных между каждым устройством, и наглядного сравнения амплитуд, представлены на рис. 3.14.

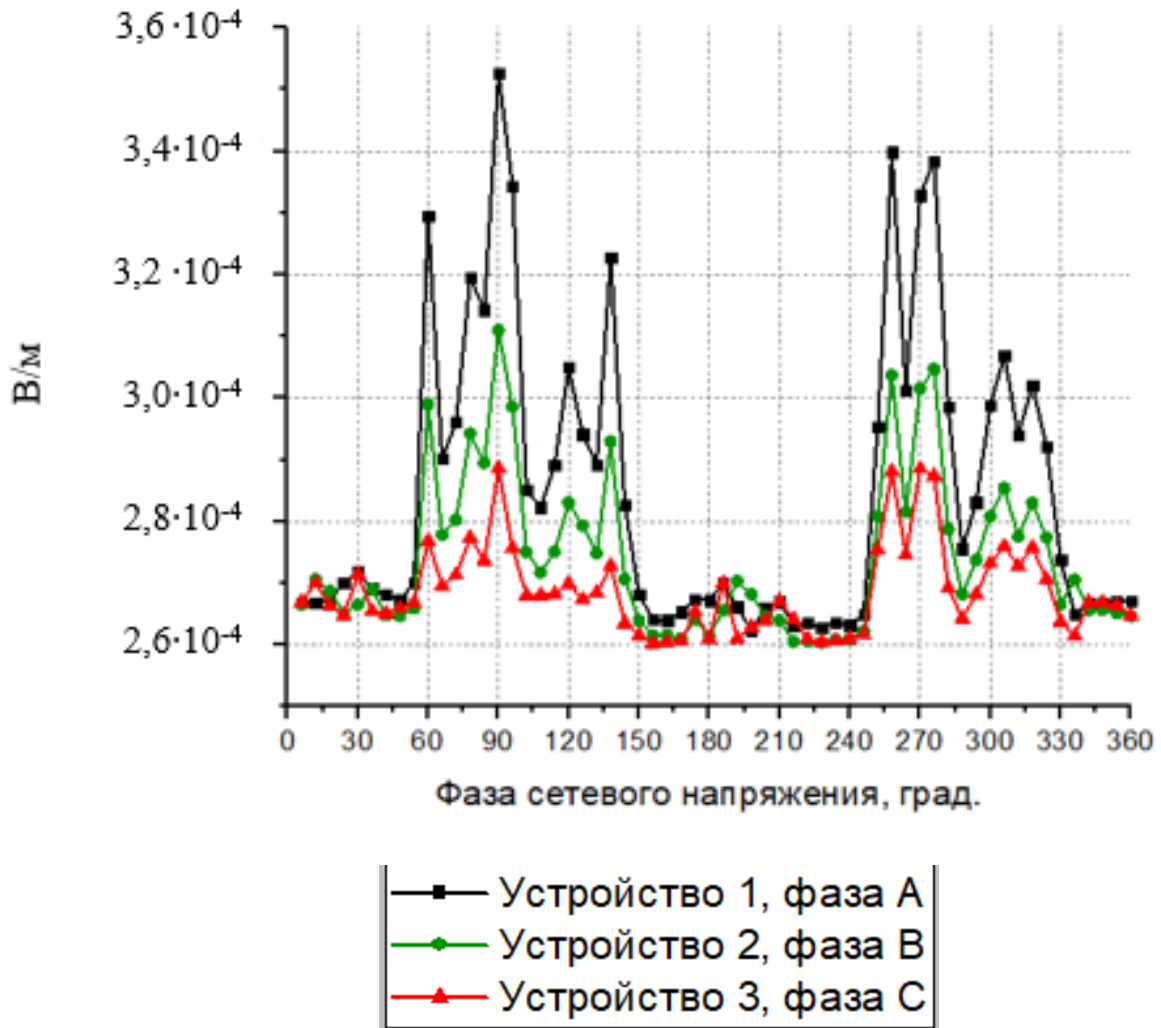


Рис.3.14. Полученные данные с трех устройств. Для наглядности все данные приведены к одной фазе: черная линия с квадратными маркерами – данные с устройства 1, зеленая линия с круглыми маркерами – устройство 2, красная линия с треугольными маркерами – устройство 3

По формуле 3.1 решением системы уравнений определяется пространственное положение гирлянды с наибольшими по амплитуде сигналами ЧР.



По данным на рис. 3.14 положение было определено с погрешностью порядка 1 метр и выявлено, что ЧР разряды распространялись с фазы А.

Таблица 3.1. Данные по уровню ЧР с устройств (только пиковые точки)

Устройство 1, В/м	Устройство 2, В/м	Устройство 3, В/м
$3,29 \cdot 10^{-4}$	$3,00 \cdot 10^{-4}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$
$5,25 \cdot 10^{-4}$	$3,11 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-4}$
$3,05 \cdot 10^{-4}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$	$2,73 \cdot 10^{-4}$
$3,23 \cdot 10^{-4}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$	$2,88 \cdot 10^{-4}$
$3,40 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$
$3,40 \cdot 10^{-4}$	$3,05 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-4}$
$3,07 \cdot 10^{-4}$	$2,86 \cdot 10^{-4}$	$2,76 \cdot 10^{-4}$
$3,02 \cdot 10^{-4}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$	$2,76 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3.2. Данные, полученные с устройства 1.

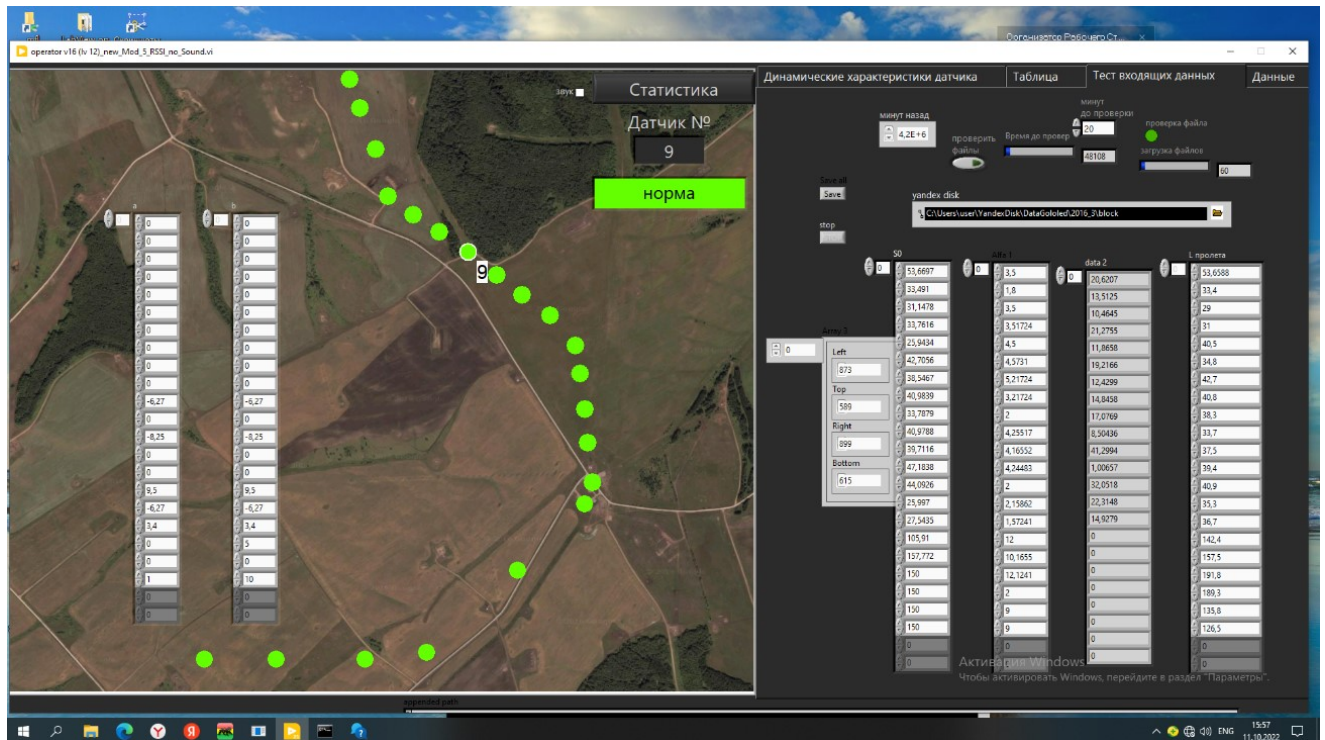
Номер и фаза датчика	Фазовый угол появления ЧР, град.	Напряжение появления ЧР, кВ	Напряженность в поле измерения антенны, мВ/м
1 (фаза А)	54	16	3,52

По результатам таблицы 2.10 «Параметры для трех уровней состояния стеклянных высоковольтных изоляторов» было установлено, что ВИ относится к группе ухудшенного состояния. Дальнейшая эксплуатация возможна.

С целью визуализации диагностических параметров разработан алгоритм обработки и визуализации диагностических параметров [А14] (блок-схема в Приложении Г), который внедрен в имеющуюся программу визуализации системы СМГ-16.

На лицевой панели обозначены места установки устройств с цветовым ранжированием: нормальное, ухудшенное и предаварийное состояние ВИ. Ранее система оповещала о гололёдных отложениях на проводах ЛЭП по трем

категориям: зеленый – нет гололеда, оранжевый – начальное образование гололеда, красный – образованы критические массы гололеда.



### 3.15. Лицевая панель модернизированной программы визуализации системы мониторинга СМГ-16

После внедрения нового алгоритма по мониторингу высоковольтных изоляторов, программа также оповещает диспетчера о трех состояниях высоковольтных изоляторов: зеленый – «нормальное» состояние, оранжевый – «ухудшенное», красный – «предавварийное».

## Выводы по главе 3

В главе разработана система дистанционного мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов, которая представляет собой три диагностических устройства, устанавливаемых на каждый фазный провод в каждом пролете. Устройства измеряют и в режиме реального времени накапливают данные о средней мощности электромагнитного излучения ЧР по фазе сетевого

напряжения, учитывая относительную влажность окружающей среды. Основное заключение о загрязнении и поверхностных дефектов высоковольтных изоляторов (нормальное, ухудшенное, предаварийное) Система формирует при 100%-ной относительной влажности окружающей среды (т.е. в период дождя, тумана, выпадения росы и т.д.), основываясь на напряжении возникновения ЧР. При приближении к указанной относительной влажности Система накапливает данные каждые 10 тыс. периодов сетевого напряжения и отправляет данные на диспетчерский пункт. При меньшей относительной влажности Система работает в режиме энергосбережения и направляет данные на диспетчерский пункт 1 раз в сутки или в случае уменьшения напряжения возникновения ЧР до уровня предаварийного состояния.

Разработана методика локализации дефектной гирлянды изолятора на основе модели затухания ЭМ излучения от ЧР.

С целью обеспечения круглосуточного функционирования системы дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов на ЛЭП, она внедрена в качестве нового модуля мониторинга ВИ в имеющуюся систему мониторинга ВЛЭП СМГ-16, разработанную ранее в научно-исследовательской лаборатории КГЭУ. СМГ-16 ранее диагностировала механические нагрузки на ВЛЭП, кручение провода, короткие замыкания и т.п. Данная модификация запатентована.

С целью визуализации диагностических параметров разработан алгоритм обработки и визуализации диагностических параметров, который внедрен в имеющуюся программу визуализации системы СМГ-16.

Модернизированная система с разработанным нами модулем мониторинга ВИ внедрена в опытную эксплуатацию в ПАО «Татнефть» на ЛЭП 35 кВ около подстанции №204. Данный модуль ВИ в составе СМГ-16 успешно функционирует с марта 2022 года.

Во время опытной эксплуатации была обнаружена гирлянда изоляторов с ухудшенным состоянием. Дальнейшая эксплуатация возможна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### 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 международной базе 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.

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.

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*

A6. 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.

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.

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.

*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».

A12. 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: опублик. 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: опублик. 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: опублик. 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 ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1994 - 496 с.
2. Дхомовская Л.Х., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С., и др. Техника высоких напряжений. М: Энергия, 1976.
3. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико. – Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.
4. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1979.
5. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. Дата введения 01.01.2014.
6. Сви П.М. Измерение частичных разрядов в изоляции оборудования высокого напряжения энергосистем. М.: Энергия, 1977.
7. Сви П.М. Методы обнаружения частичных разрядов в высоковольтной изоляции. М.: ЦИНТИ, 1960.
8. Кубарев А. Ю., Усачев А. Е. Программный комплекс обработки и анализа характеристик частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 3-4. – С. 101-108.
9. PD-Map – система диагностики изоляции высоковольтного оборудования подстанций. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.electronpribor.ru/catalog/113/pd-map.htm>. Дата обращения: 11.10.2022.
10. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 370 с. – ISBN 978-5-94614-177-2.
11. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». Утверждено решением Совета директоров ПАО «Россети» от 31.03.2021. (протокол от 02.04.2021 № 450).
12. СТО 56947007-29.240.003-2008. Методические указания по дистанционному оптическому контролю изоляции воздушных линий

электропередачи и распределительных устройств переменного тока напряжением 35-1150 кВ.

13. Анализ рынка изоляторов электрических в России. Агентство DISCOVERY Research Group. 24.12.2021. 113 с.

14. IEC TS 62478:2016. High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. Дата введения: 29.08.2016.

15. Бобров Ю.К., Гусейн-Заде Н.Г., Рухадзе А.А. и др. Физические модели и механизмы электрического пробоя газов. М: Изд-во Московского университета, 2011 – 368 с.

16. Ушаков В.Я. Физика и техника мощных импульсных систем/ Сб. ст. / Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова; Под ред. Е. П. Велихова. - М. : Энергоатомиздат, 1987. - 351 с.

17. Потери электроэнергии, связанные с погодными условиями: общие данные [Электронный ресурс]. URL: <https://pue8.ru/uchet-elektroenergii/2-3-poteri-opredelyaemye-pogodnymi-usloviyami-2-3-1-obshhaya-karakteristika.html> (Дата обращения: 27.08.22).

18. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://dimrus.ru/manuals/39\\_rus2.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://dimrus.ru/manuals/39_rus2.pdf) . Дата обращения: 02.10.2022.

19. Зарипов, Д. К., Насибуллин Р. А. Устройство оптической индикации загрязнения высоковольтной изолирующей конструкции // Контенант. – 2018. – Т. 17. – № 4. – С. 80-90.

20. Обзор аварийности и травматизма в электроэнергетических системах государств-участников СНГ за 2020 год. Инф. бюллетень № 21. Исп. ком. Электроэнергетического совета СНГ, 2021. 141 с..

21. Ефимов Е. Н., Тимашова Л. В., Ясинская Н. В. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110-750 кВ В 1997-2007 гг. Энергия единой сети – №5 – 2012 – с. 32-41.

22. Devins J. C. The Physics of Partial Discharges in Solid Dielectrics // IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol. 19, pp. 475-495, 1984.
23. Florkowski M. Influence of harmonics on partial discharge measurements and interpretation of phase-resolved patterns // Measurement. Vol. 196, 2022, P. 111198.
24. Bartnikas R., Novak J. P. On the Spark to Pseudoglow and Glow Transition Mechanism and Discharge Detectability // IEEE Trans. Electr. Insd., Vol. 27, 1992, pp. 3-14/
25. Tanaka T. Internal Partial Discharge and Material Degradation // IEEE Trans on Electr. Ins., Vol. 21, 1986, pp. 899-905.
26. Zheng Q., Luo L., Song H., et al. Intelligent learning approach for UHF partial discharge localisation in air-insulated substations // High Voltage, vol. 5, no. 5, 2020, pp. 583–590..
27. Zhou N., Luo L., Sheng G. and Jiang X. High Accuracy Insulation Fault Diagnosis Method of Power Equipment Based on Power Maximum Likelihood Estimation // in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 34, no. 4, 2018, pp. 1291-1299. DOI:10.1109/TPWRD.2018.2882230.
28. Li Z., Luo L., Sheng G., Liu Y. and Jiang X. UHF partial discharge localisation method in substation based on dimension-reduced RSSI fingerprint // IET Gener. Transm. Distrib. Vol. 12, Iss., 2018, pp. 398-405. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0601.
29. Fan W., Lingen L., Hui S., Gehao S. and Xiuchen J. UHF Partial Discharge Localization Methodology Based on Generalized Regression Neural Network // 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/CMD.2018.8535757.
30. Zhou N., Luo L., Song H., Sheng G. and Jiang X. A Substation UHF Partial Discharge Detection Method Based on Maximum Likelihood Estimation // 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2019, pp. 279-282.

31. Wu F., Luo L. G., Hu Y., Wang W., Sheng G. H., and Jiang X. C. Partial discharge direction finding method based on received signal strength and circular UHF wireless sensor array // *High Voltage Eng.*, vol. 46, no. 6, 2020, pp. 1939–1947.
32. Biswas S., Koley C., Chatterjee B., Chakravorti S. A methodology for identification and localization of partial discharge sources using optical sensors // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 1, 2012, pp. 18-28. DOI: 10.1109/TDEI.2012.6148498.
33. Зарипова А. Д., Зарипов Д. К., Усачев А. Е. Критерии выявления дефектов оборудования для тепловизионной системы контроля электрической подстанции // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* – 2017. – Т. 19. – №. 5-6.
34. Калинин Ю.А., Второва Л.В., Калинин Ф.А. Устройство ультразвукового контроля высоковольтных изоляторов под напряжением. Патент на полезную модель № RU 5925813 U1. Заявка 2006129500/22, 14.08.2006, опубл. 10.12.2006.
35. Голенищев-Кутузов, А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Дистанционный контроль технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* – 2018 – Т. 20 № 3-4. – с. 99-107.
36. Измерители характеристик частичных разрядов СКИ-2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://td-str.ru/file.aspx?id=27977>, Дата обращения: 11.10.2022.
37. Portugues I.E., Moore P.J., Glover I., et. al. RF-Based Partial Discharge Early Warning System for Air-Insulated Substations // in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, 2009, pp. 20-29. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2005464.
38. Moore P., Portugues I., Glover I. Partial discharge investigation of a power transformer using wireless // in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, 2006, pp. 528-530. doi: 10.1109/TPWRD.2005.848438.

39. Tenbohlen, S.; Denissov, D.; Hoek, S.; Markalous, S. Partial discharge measurement in the ultra high // *in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, 2008, pp. 1544-1552. doi: 10.1109/TDEI.2008.4712656.
40. Judd M., Yang L., Hunter I. Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors. Part 2: field experience // *in IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, no. 3, 2005, pp. 5-13. doi: 10.1109/MEI.2005.1437603.
41. Hou H.; Sheng G.; Jiang X. Robust Time Delay Estimation Method for Locating UHF Signals of Partial Discharge in Substation // *in IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, 2013, pp. 1960-1968. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2262315.
42. Harris, R.M.; Judd, M.D.; Moore, P.J.; Livie, J. Radiometric detection and analysis of arcing faults // *in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 3, 2015, pp. 1547-1558. doi: 10.1109/TDEI.2015.7116350.
43. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007- 29.240.35.270-2019 «Автоматизированная система мониторинга и технического диагностирования КРУЭ. Общие технические требования», Дата введения: 04.07.2019..
44. DIMRUS [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://dimrus.ru/manuals/dimloc\\_um.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://dimrus.ru/manuals/dimloc_um.pdf).
45. PD-Map – система оперативного поиска и локации дефектов оборудования открытых высоковольтных подстанций. Димрус. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dimrus.ru/manuals/pdmap.pdf> . Дата обращения: 04.09.2022.
46. Зарипов Д.К. Насибуллин Р.А., Ибрагимов Р.Р., Игтисамов М.Ч. Датчик для системы непрерывного контроля состояния изолирующих конструкций. Патент на полезную модель №2731169 РФ. заявитель и патентообладатель ОАО «Сетевая компания». Заявка № 2019145586; 30.12.2019; опубл. 31.08.2020.

47. Ультразвуковой детектор Distran Ultra Pro [Электронный ресурс], режим доступа: [https://www.pergam.ru/catalog/gas\\_leaks/portable-detectors/distran-ultra-m.htm](https://www.pergam.ru/catalog/gas_leaks/portable-detectors/distran-ultra-m.htm) (дата обращения: 13.09.2022).

48. [Ультразвуковой детектор частичных разрядов SonaVu. [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://www.diagnost.ru/shop>, Дата обращения: 13.09.2022].

49. NL Камера E версия — ультразвуковой дефектоскоп. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.electronpribor.ru/catalog/927/nl\\_kamera\\_e\\_versiya.htm#about](https://www.electronpribor.ru/catalog/927/nl_kamera_e_versiya.htm#about).

50. Акустические датчики для регистрации импульсов частичных разрядов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dimrus.ru/acoustic.html>. Дата обращения: 11.10.2022.

51. Куценко, С. М. Характеристики частичных разрядов в изоляторах из фарфора и поликарбоната / С. М. Куценко, Н. Н. Климов, В. И. Муратов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 82-87.

52. С.М. Куценко, Н.Н. Климов, В.И. Муратов [и др.]. Способ дистанционной акустоэлектромагнитной диагностики состояния линейной изоляции контактной сети переменного тока железнодорожного транспорта. Патент №2365928 РФ. заявитель ИрГУПС, опублик. 27.08.2009.

53. А. В. Голенищев-Кутузов, Д. А. Иванов, Р. И. Калимуллин, А. В. Семенников. Дистанционно измеряемые диагностические параметры, позволяющие оценивать остаточный ресурс высоковольтных изоляторов // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – № 12. – С. 1763-1766. DOI 10.31857/S0367676520120224.

54. Ультрафиолетовые камеры (дефектоскопы) COROCAM. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.corocam-uv.ru/cam\\_17.html](http://www.corocam-uv.ru/cam_17.html). Дата обращения: 11.10.2022.

55. ГОСТ 18328-73. Изоляторы стеклянные линейные подвесные и штыревые. Требования к качеству стекла и поверхности изоляционных деталей. Дата введения 01.01.74.

56. Важов В.Ф., Лавринович В.А. Техничка высоких напряжений / Учебник для бакалавров направления 140200 "Электроэнергетика" – ТПУ, 2014. – 263 с.
57. Федеральный институт промышленной собственности. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fips.ru/>. Дата обращения: 01.06.2022.
58. Google Patents. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://patents.google.com/>. Дата обращения: 01.06.2022.
59. Пат. RU2776589 РФ. Устройство для дистанционного мониторинга объектов электроэнергетики / Шпенст В. А., Морозова О. Ю., Зюлин В. А. № 2021130997: заявл. 25.10.2021: опубл. 22.07.2022.
60. Пат. 2726305 РФ. Устройство для диагностики состояния высоковольтных изоляторов / Г.Н. Ахобадзе. № 2019139851, заявл. 06.12.2019, опубл. 13.07.2020.
61. Пат. 107368 РФ. Система мониторинга состояния изоляции /В.М. Руцкий, Комолов А.А. № 2011110662/28, заявл. 21.03.2011, опубл. 10.08.2011..
62. Пат. 2425389 РФ. Датчик для мониторинга высоковольтной изоляции / Стьюарт Б.Г., Несбитт А., Макмикин С.Г. № 2008111562/28, заявл. 05.09.2006, опубл. 27.07.2011.
63. Пат. 2679759 РФ. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов/В.А. Голенищев-Кутузов, А.В.Голенищев-Кутузов, Д.А.Иванов, Г.Д.Марданов, А.В.Семенников. № 2018110016, заявл.21.03.2018, опубл.12.02.2019.
64. Пат. 2359280 РФ. Способ бесконтактного и дистанционного контроля состояния гирлянд изоляторов воздушных высоковольтных линий электропередачи/М.Н.Бадретдинов, А.М. Гатауллин, В.Л. Матухин, Д.Ф. Губаев. № 2007133044/28, заявл. 03.09.2007, опубл. 20.06.2009.
65. Пат. 2058559 РФ.Способ бесконтактного и дистанционного контроля электропрочности гирлянд изоляторов воздушных высоковольтных линий электропередачи / Н.М. Шмидт, И.М. Шмидт. № 93045793/28, заявл. 16.09.1993, опубл. 20.04.1996..



66. Пат. 2483315 РФ. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных полимерных изоляторов / В. А. Голенищев-Кутузов, А.В. Голенищев-Кутузов, Л.И. Евдокимов, А.Ю. Черномашенцев. № 2011153348/28, заявл. 26.12.2011, опубл. 27.05.2013.

67. Пат. 2566391 РФ. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных полимерных изоляторов / А.М. Гатауллин. № 2014135317/28, заявл. 28.08.2014, опубл. 27.10.2015.

68. Пат. 2753811 РФ. Способ и устройство бесконтактного дистанционного контроля технического состояния высоковольтных линейных изоляторов воздушных линий электропередач / В.И. Катков, Ю.К. Евдокимов, Р.К. Сагдиев, Г.П. Охоткин, №2020126832, опубл.23.08.21.

69. Патент USA №WO/1991/005415. Received signal strength indicator. Авторы: Kurtzman Gary, A., Heck Joseph P. Патентообладатели: motorola, INC.; опубл. 06.05.1991, Заявка № PCT/US1990/005050, 24.09.1990, Режим доступа: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO1991005415>.

70. Зарипов Д. К., Насибуллин Р. А. Экспериментальная система непрерывного контроля изоляции воздушных линий и подстанций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 1. – С. 1-8.

71. Hara S., Anzai D., Yabu T., et al. A perturbation analysis on the performance of TOA and TDOA localization in mixed LOS/NLOS environments // IEEE Trans. Commun., 2013, 61, (2), pp. 679–689.

72. Sinaga H.H., Phung B.T., Blackburn T.R. Partial discharge localization in transformers using UHF detection method // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2012, 19, (6), pp. 1891–1900.

73. Rabinowitz M., Enge P. Robustness of TOA and TDOA positioning under suboptimal weighting conditions // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 2007, 43, (3), pp. 1177–1180.

74. Zeng F., Tang J., Huang L., et al. A semi-definite relaxation approach for partial discharge source location in transformers // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2015, 22, (2), pp. 1097–1103.

75. Dhara S., Koley C. and Chakravorti S. A UHF Sensor Based Partial Discharge Monitoring System for Air Insulated Electrical Substations // in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 6, pp. 3649-3656, Dec. 2021. doi: 10.1109/TPWRD.2020.3046276.
76. Xue N., Yang J., Shen D., Xu P., Yang K., Zhuo Z., Zhang L., and Zhang J. The location of partial discharge sources inside power transformers based on TDOA database with UHF sensors // in IEEE Access, vol. 7, 2019, pp. 146732–146744.
77. Ha S.-G., Cho J., Lee J., Min B.-W., Choi J., and Jung K.-Y. Numerical study of estimating the arrival time of UHF signals for partial discharge localization in a power transformer // J. Electromagn. Eng. Sci., vol. 18, no. 2, 2018, pp. 94-100.
78. Jiang J., Wang K., Zhang C., Chen M., Zheng H., and Albarracín R. Improving the error of time differences of arrival on partial discharges measurement in gas-insulated switchgear // Sensors, 2018, vol. 18, no. 11, p. 4078.
79. Ariannik M., Azirani M. A., Werle P., and Azirani A. A. UHF measurement in power transformers: An algorithm to optimize accuracy of arrival time detection and PD localization // IEEE Trans. Power Del., 2019, vol. 34, no. 4, pp. 1530–1539.
80. Wang S., He Y., Yin B., Zeng W., Li C., and Ning S. Multi-resolution generalized S-transform denoising for precise localization of partial discharge in substations // IEEE Sensors J., 2021, vol. 21, no. 4, pp. 4966–4980.
81. Szirtes M., Cselkó R., and Berta I. Developing a filtering algorithm for partial discharge location approximation using the emitted electromagnetic signals of corona discharges // IEEE Trans. Ind. Appl., 2021, vol. 57, no. 1, pp. 932–940.
82. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.180.01.207-2015 Методика измерения частичных разрядов в маслобарьерной изоляции силового трансформаторного оборудования. Дата введения: 18.12.2015.
83. Показатель уровня принимаемого сигнала. [Электронный ресурс], URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Показатель\\_уровня\\_принимаемого\\_сигнала](https://ru.wikipedia.org/wiki/Показатель_уровня_принимаемого_сигнала) . Дата обращения: 21.09.2022.

84. 802.15.4-2006 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements. Part 15.4. vol., no., pp.1-320, 7 Sept. 2006, doi: 10.1109/IEEESTD.2006.232110.

85. CC253x System on chip solution for 2.4 GHz IEEE 802.15.4 and Zigbee application. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.ti.com/lit/ug/swru191f/swru191f.pdf](http://www.ti.com/lit/ug/swru191f/swru191f.pdf). Дата обращения 21.09.2022.

86. Iorkyase T., Tachtatzis Ch., Lazaridis P., et al. Low-complexity wireless sensor system for partial discharge localization // IET Wireless Sensor Systems, Vol. 9, Is. 3. June 2019, pp. 158-165.

87. Куценко С.М., Муратов В.И., Климов Н.Н. Диагностические признаки неисправной фарфоровой изоляции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2012. Т. 1. С. 295-299.

88. Upton D.W.; Mistry K.K.; Mather P.J.; Zaharis Z.D.; Atkinson R.C.; Tachtatzis C.; Lazaridis P.I. A Review of Techniques for RSS-Based Radiometric Partial Discharge Localization. Sensors 2021, Vol. 21, P. 909. <https://doi.org/10.3390/s21030909>.

89. Tenbohlen S.; Denissov D.; Hoek S.M.; Markalous S.M. Partial Discharge Measurement in the Ultra High Frequency (UHF) Range. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2008, 15, 1544–1552.

90. Приемник RTL2832 SDR. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/>. Дата обращения 21.09.2022.

91. Игнатьев Н.И. Исследование и совершенствование метода электромагнитного контроля электроэнергетического оборудования, находящегося под рабочим напряжением [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.09.05. Владивосток, 2020. - 173 с.

92. Пат. RU2566391C1. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных полимерных изоляторов. Гатауллин А.М. Заяв. 28.08.2014 № 2014135317/28, Оpubл. 27.10.2015. Патентообладатель: ФГБОУ ВПО «КГЭУ».

93. Колечицкий Е.С., Плис А.И., Шульгин В.Н. Регулирование электрических полей в бумажно-масляной изоляции с конденсаторными обкладками Ч.1 // Электричество. – 1995 – №9.

94. Чан Ки Фук. Расчет распределения электрического поля в твердой высоковольтной изоляции, содержащей газы // Электричество. – 1995 - №12.

95. Матвеев Ю.Н., Симончик К.К., Тропченко А.Ю., Хитров М.В. Цифровая обработка сигналов. Учебное пособие. – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 166 с.

96. АИД-70М — аппарат испытания диэлектриков. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.electronpribor.ru/catalog/2/aid-70m.htm>. Дата обращения: 01.10.2022.

97. CC1310 texas instruments. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.ti.com/product/CC1310>, дата обращения: 17.09.2022.

98. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. IEEE 802.15.4-2020. [Электронный ресурс], URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/7029/>. Дата обращения: 17.09.2022.

99. ICM series Accessories: Calibrators. Power Diagnostyx System. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.pdix.com/products/calibrators.html>. Дата обращения: 05.10.2022.

100. ГОСТ 56735-2015 (IEC/TS 60815-1:2008). Изоляторы высокого напряжения для работы в загрязненных условиях выбор и определение размеров. Стандартиформ, 2016.

101. ГОСТ 10390-2015. Электрооборудование на напряжение свыше 3 кВ. Методы испытаний внешней изоляции в загрязненном состоянии. Дата введения 01.03.2017.

102. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. Дата введения: 01.01.1999.

103. 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.

104. Белушкин М.Ю. Моделирование и регистрация электромагнитных полей электроэнергетического оборудования высоковольтных подстанций [Текст]: дис...канд. техн. наук: 05.09.03 / Белушкин Михаил Юрьевич. – Владивосток, 2004.

105. Rocha P.H.V., Costa E.G., Serres A.R., Xavier G.V.R., Peixoto J.E.B., Lins R.L. Inspection in overhead insulators through the analysis of the irradiated RF spectrum // Electrical Power and Energy Systems, 2019, Vol. 113, pp. 355-361.

106. 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.

107. AOR AR-5000A Широкополосный сканирующий приемник. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://alpha-com.ru/product/aor-ar5000a/>. Дата обращения: 05.10.2022.

108. Гейн Э. Э., Курганов Л. С. Техника измерения напряженности поля радиоволн - М.: Связь, 1967. - 151 с.

109. Крысюк Н.П., Дымович Н.Д. Электродинамика и распространение радиоволн. Учебное пособие для радиотехнических вузов и факультетов. М.: Высшая школа, 1974. - 536 с.

110. Н.А. Малков, А.П. Пудовкин. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 88 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ  
Главный специалист ОЭиЭ  
Управления энергетики ПАО «Татнефть»  
\_\_\_\_\_ Р.Р. Мухаметдинов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

## АКТ

о внедрении и практическом использовании результатов разработки сотрудников КГЭУ Ярославского Данила Александровича, Иванова Дмитрия Алексеевича, Садыкова Марата Фердинантовича, Галиевой Татьяны Геннадьевны – системы автоматического мониторинга состояния ВЛЭП и подстанций на основе собственных аппаратных разработок

В рамках выполнения работ по договору №0002/52/63 06.04.2020 г. «Разработка и внедрение приборов и методики по слежению за техническим состоянием оборудования подстанций 110/35/6 кВ» на ПС 35/6 кВ №204 ПАО «Татнефть» разработаны датчики гололедообразования, температуры и регистрации высокочастотных разрядов, которые установлены на воздушные линии электропередач и ПС. Внедрены в опытную эксплуатацию датчик контроля провиса провода, датчик частичных разрядов, датчик температуры шин и токопроводов. Реализована система мониторинга технического состояния ПС с контролем следующих диагностических параметров, необходимых для оценки технического состояния оборудования:

- контроль гололедообразования;
- контроль температуры провода;
- контроль температуры токопровода разъединителя;
- регистрация высокочастотных разрядов;
- контроль относительной влажности и температуры окружающей среды.

Диагностические параметры регистрируются и анализируются в режиме реального времени для определения технического состояния оборудования подстанции. Контроль состояния изоляции на основании регистрации и анализа частичных разрядов позволяет определить тип дефекта в изоляции, оценить степень опасности выявленного дефекта для дальнейшей эксплуатации трансформатора.

Ответственный за внедрение:  
Заместитель директора по развитию сетей  
ООО «Татнефть-Энергосбыт»

Гимадиев Р.А.

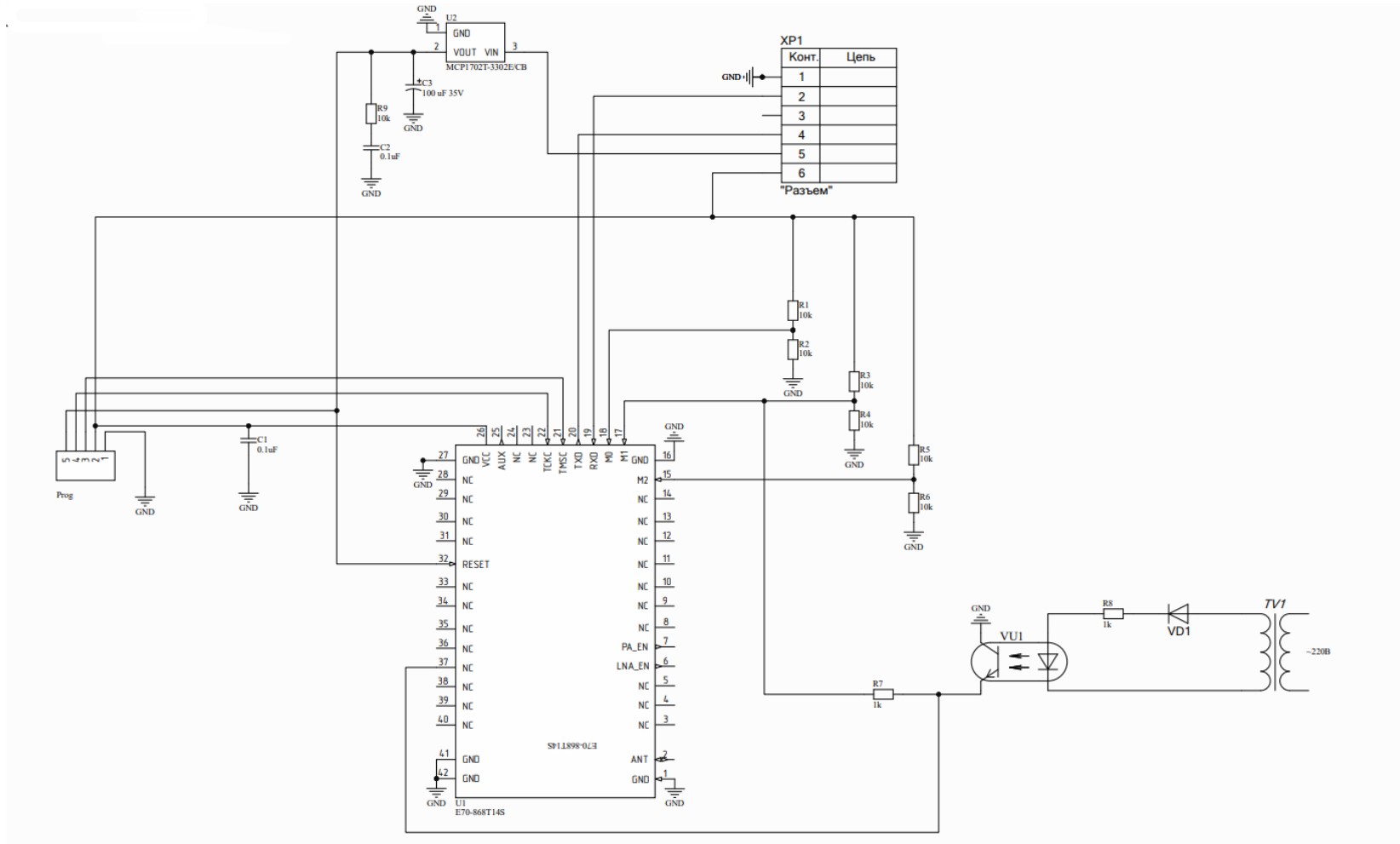
Лист согласования к документу № 54/Орд от 08.04.2022

Инициатор согласования: Хазиев И.Н. Начальник отдела энергоэффективности

Согласование инициировано: 08.04.2022 13:53

Лист согласования			Тип согласования: смешанное	
№	ФИО, должность	Передано на визу	Срок согласования	Результат согласования
Тип согласования: параллельное				
1	Хазиев И.Н., Начальник отдела энергоэффективности	08.04.2022 - 14:04		Согласовано 08.04.2022 14:04:47
2	Гимадиев Р.А., Заместитель директора по развитию сетей	08.04.2022 - 14:04		Согласовано 08.04.2022 14:08:42
Тип согласования: последовательное				
3	Мухаметдинов Р.Р., Главный специалист отдела энергообеспечения и энергоэффективности Управления энергетики	08.04.2022 - 14:08		Подписано 08.04.2022 14:33:33

## Принципиальная электрическая схема разработанного устройства



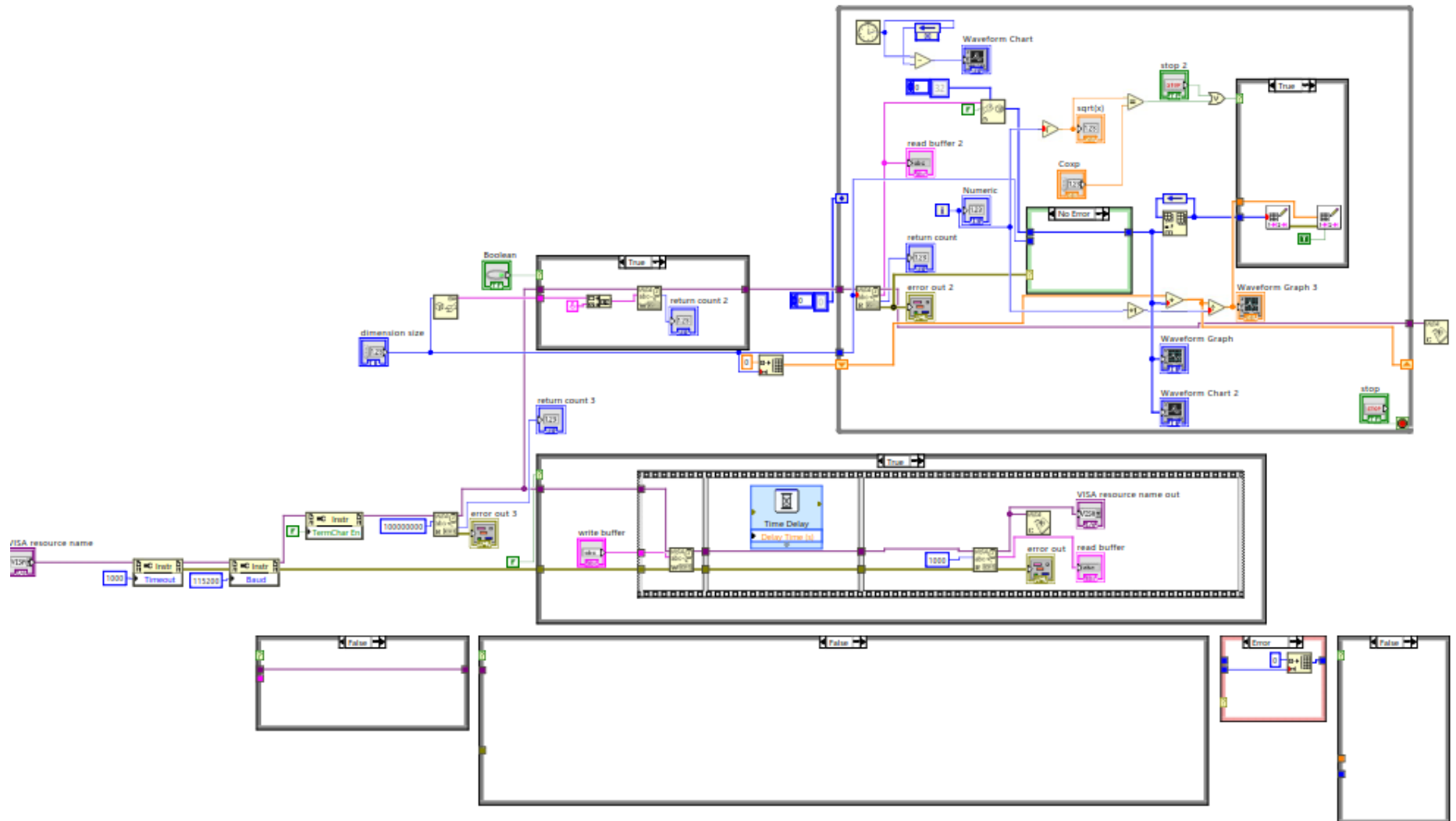


## Спецификация

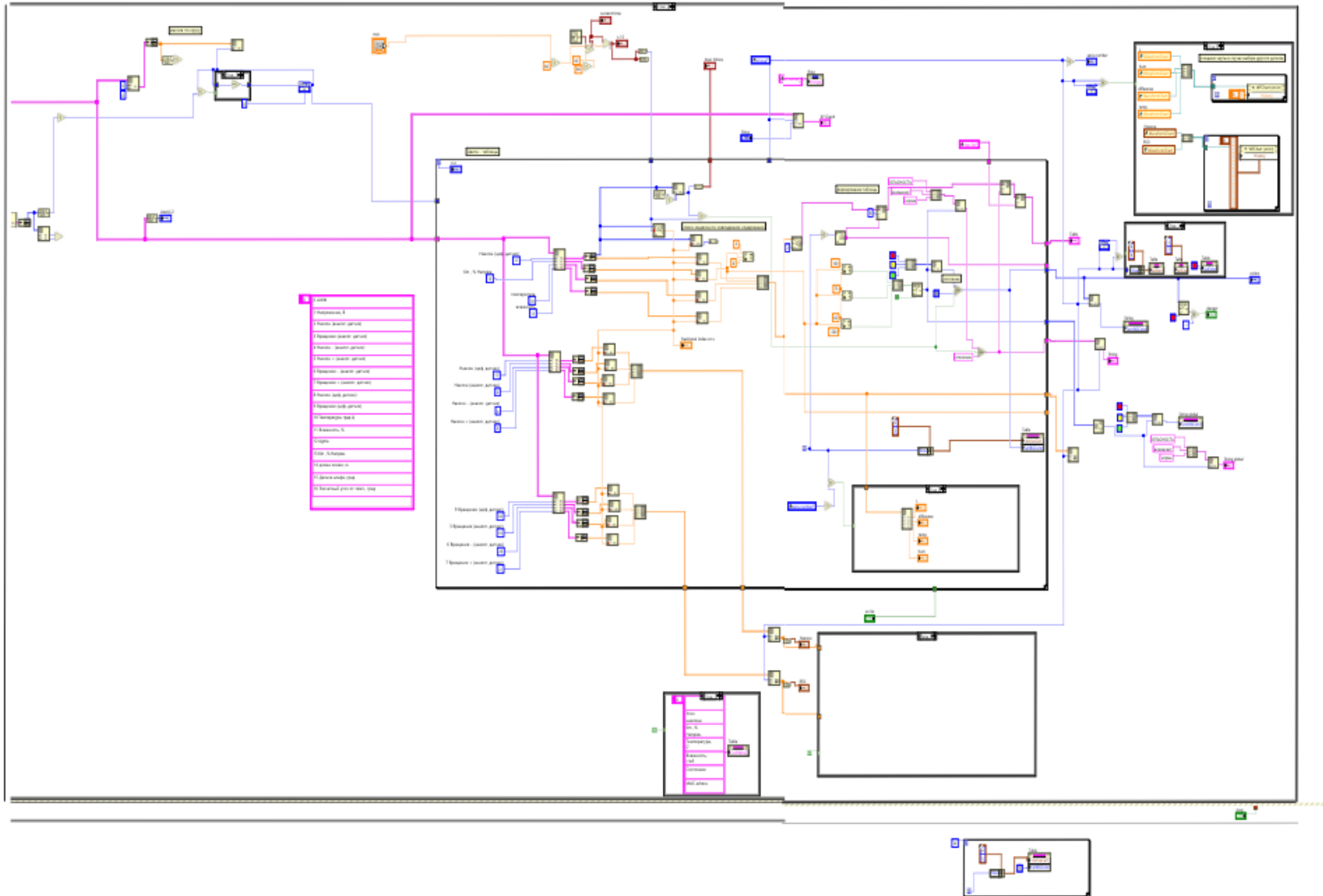
Формат	Зона	Лаз	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
<i>Документация</i>						
A3				<i>Схема электрическая</i>		
				<i>принципиальная</i>		
A4				<i>Спецификация</i>		
				<i>Прочие изделия</i>		
<i>Микросхемы</i>						
				<i>E70-868T14S</i>	1	U1
				<i>MCP1702T-3302E/CB</i>	1	U2
<i>Конденсаторы</i>						
				<i>Конденсатор керамический</i>	2	C1, C2
				<i>smd 0.1мкФ X7R 10%</i>		
				<i>1кВ 2220, GRM55DR73A104K</i>		
				<i>ECAP SMD, 100 мкФ, 35 В,</i>	1	C3
				<i>105°C, 20% 6.3x7.7мм,</i>		
				<i>Конденсатор электролитический</i>		
				<i>алюминиевый SMD</i>		
<i>Резисторы</i>						
				<i>0.0628m 0402 10 кОм, 1%, Чип резистор (SMD)</i>	7	R1-R6,
<i>Изм. лист № докум. Подп. Дата</i>						
Инв. № подл.	Разраб.				Лит.	Лист
	Проб.					Листов
						1
						2
	Н.контр.					
	Ств.					



## Блок-диаграмма программы обработки сигнала с электромагнитных датчиков



## Программа обработки и визуализации данных для системы мониторинга состояния ВЛЭП и подстанций



Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс  
ФГБОУ ВО «КГЭУ»



«УТВЕРЖДАЮ»  
Первый проректор –  
проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный  
энергетический университет»  
А.В. Леонтьев  
«01» сентября 2022 года

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Галиевой Т.Г.  
«Метод и система мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов  
стеклянных изоляторов на основе определения средней мощности  
электромагнитного излучения частичных разрядов» в учебный процесс

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы ассистента Галиевой Т.Г. на тему «Метод и система мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения частичных разрядов» внедрены в учебный процесс кафедры «Теоретические основы электротехники» и используются при лабораторных работ в рамках дисциплин «Теоретические основы электротехники» подготовки бакалавров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Использование указанных результатов позволило повысить качество образовательного процесса.

Заведующий кафедрой  
«Теоретические основы электротехники»,  
д.т.н., профессор

М.Ф. Садыков

И.о. директора Института  
электроэнергетики и электроники,  
к.т.н.

Р.В. Ахметова

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в научно-исследовательскую деятельность ФГБОУ ВО «КГЭУ»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и  
коммерциализации, д.т.н., проф.  
И.В. Ившин

« 20 » октября 2022 г.



АКТ

о внедрении в научно-исследовательскую деятельность результатов диссертации Галиевой Татьяны Геннадьевны «Метод и система мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения частичных разрядов»

Настоящий акт составлен о том, что при выполнении научных исследований и разработок в Инжиниринговом центре применялись наработки и результаты диссертационного исследования Галиевой Татьяны Геннадьевны:

- метод дистанционного мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных высоковольтных изоляторов на основе определения средней мощности электромагнитного излучения частичных разрядов с синхронным накоплением с фазой сетевого напряжения, с учетом относительной влажности окружающей среды;
- лабораторный стенд с целью изучения электрофизических процессов в высоковольтных изоляторах под воздействием высоких напряжений и проведения экспериментальных исследований;
- программы и алгоритмы, обеспечивающие обработку и визуализацию диагностических данных для мониторинга загрязнений и поверхностных дефектов стеклянных изоляторов.

Директор ИЦ

М.Ф. Садыков

Начальник УНИР

И.З. Гатиятов